



**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 PERÍODO EFECTIVO.

**T E S I N A**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**ESPECIALISTA EN GEOTECNIA**

P R E S E N T A :

**ING. JOSÉ ARMANDO JUÁREZ ORTA**

DIRECTOR DE TESINA: DR. HÉCTOR RAÚL AGUILAR BECERRIL

MÉXICO, D.F.  
MAYO 2015

## INDICE

I.	Introducción.....	(1)
	I.1 Objetivos y metas.....	(2)
II.	Antecedentes.....	(3)
III.	Fenómeno de interacción dinámica suelo-cimentación-estructura.....	(4)
IV.	Determinación del periodo efectivo en estructuras con cimentaciones Superficiales. ....	(6)
	IV.1 Periodo fundamental de vibración efectivo.....	(8)
	IV.2 Funciones de impedancia .....	(10)
V.	Factores que influyen en la interacción dinámica.....	(13)
VI.	Efecto de los factores que participan en la interacción dinámica y su Efecto en la respuesta estructural.....	(16)
	VI.1 Modo de traslación horizontal.....	(24)
	VI.2 Modo de rotacional o cabeceo.....	(25)
VII.	Análisis paramétrico de los factores que participan en la interacción Dinámica. ....	(30)
VIII.	Conclusiones. ....	(50)
IX.	Referencias. ....	(52)

## **I INTRODUCCIÓN**

Se sabe que cualquier estructura estará sometido a varios factores en su comportamiento estático o dinámico, Un ingeniero en su proyecto ingenieril de cualquier tipo no deberá hacer a un lado las acciones dinámicas que puedan actuar en esta. Las acciones dinámicas son factores de gran importancia a considerar en un diseño, para poder alcanzar el buen funcionamiento y comportamiento de una estructura.

El comportamiento sísmico en una estructura, se hace prevalecer y jerarquizar al período natural de vibración, al amortiguamiento y a las formas modales; ya que son los factores más determinantes en dicha estructura cuando se encuentra a excitaciones dinámicas.

En la ciudad de México como ya se sabe, es una zona que tiene grandes depósitos de suelos blandos de alta compresibilidad (arcillas), Al presentarse un sismo, estos depósitos tienen un comportamiento importante que el ingeniero proyectista también deberá considerar. Hay una parte importante en las áreas de la ingeniería sísmica y la ingeniería estructural para el comportamiento sísmico de una construcción desplantada en el valle de la ciudad de México, para lo cual se ha venido implementado un análisis del fenómeno de interacción suelo-estructura en depósitos de suelos blandos, donde se estudia la respuesta sísmica de dicha interacción. Un sistema de interacción suelo-estructura tiene dos propiedades dinámicas importantes que son el período efectivo y amortiguamiento efectivo.

Un análisis de este fenómeno, tiene la finalidad de obtener los valores de estas propiedades para poder entender el comportamiento del sistema suelo-estructura.

La respuesta sísmica de la interacción suelo-estructura, produce efectos inerciales y efectos cinemáticos existentes por la estructura y además los efectos de la flexibilidad del suelo. Las modificaciones de los factores dinámicos de la estructura y del suelo son debidas a la interacción suelo-estructura.

Por lo tanto, es de suma importancia verificar como es la influencia de los factores que intervienen en la interacción suelo-estructura para el comportamiento y determinación de

los parámetros como son el período de vibración efectivo y el amortiguamiento efectivo de la estructura.

En este trabajo se tratará el análisis de interacción suelo-estructura, para entender el comportamiento del período efectivo respecto a factores paramétricos determinantes en un comportamiento sísmico de una estructura desplantada en un depósito de suelos blandos. De acuerdo, al Manual de Construcción de Obras Civiles “diseño por sismo” de la comisión federal de electricidad y del centro de investigaciones eléctricas.

### **I.1 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, observando el comportamiento del período fundamental efectivo 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 período efectivos 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.

## **II. 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.

### III. FENÓMENO DE INTERACCIÓN DINÁMICA SUELO CIMENTACIÓN

#### ESTRUCTURA

La interacción dinámica suelo-estructura se refiere a la respuesta dinámica de la propia estructura provocando la deformación del suelo de apoyo y de igual manera la respuesta dinámica del suelo influye en el movimiento de la misma. De otro punto de vista la interacción suelo estructura está compuesto o consiste en dos tipos de efectos conocidos, como cinemáticos e inerciales. Estos son transmitidos a la estructura y al suelo cuando se encuentran en acciones dinámicas, provocando modificaciones importantes en los parámetros dinámicos de la estructura.

**La interacción cinemática**, el suelo al estar sometido a acciones dinámicas tendrá un movimiento diferente en la presencia de un sistema de cimentación, debido a que esta cuenta con una rigidez considerablemente mayor que la del suelo, ocasionando que este no sufra un movimiento de igual forma a como se movía sin la presencia de la cimentación. A esta modificación de movimiento se le llama interacción cinemática. Este efecto permite disminuir la intensidad de las frecuencias, también puede presentar el cabeceo o rotación con respecto a un eje horizontal y al igual la torsión con respecto a un eje vertical.

Por lo tanto, la rigidez, la geometría, la profundidad de desplante y dimensiones de la cimentación, además de la longitud de onda del movimiento del terreno, Son puntos importantes a considerar en el efecto de la interacción cinemática.

Por otro lado, para explicar lo anteriormente mencionado, existirá una mayor interacción cinemática, cuan entre mayor sea la diferencia entre la rigidez de la cimentación y la rigidez del suelo.

La interacción inercial se presenta cuando al venir un acción dinámica, el movimiento en la base de la estructura es modificado por la presencia y movimiento de la misma, ya que son el resultado de las fuerzas inerciales debidas a su masa, todos los efectos que involucran las interacción inercial son tomados en cuenta como los más importantes en comparación con la interacción cinemática y se presentan cuando la estructura se encuentra desplantada en depósitos de suelos muy blandos, también cuando la estructura tenga mayor masa y sea muy esbelta.

Con estas características los efectos de interacción inercial son más importantes que los efectos de interacción cinemática. Estos se ven reflejados al introducir una flexibilidad adicional al sistema dinámico y el incremento del amortiguamiento.

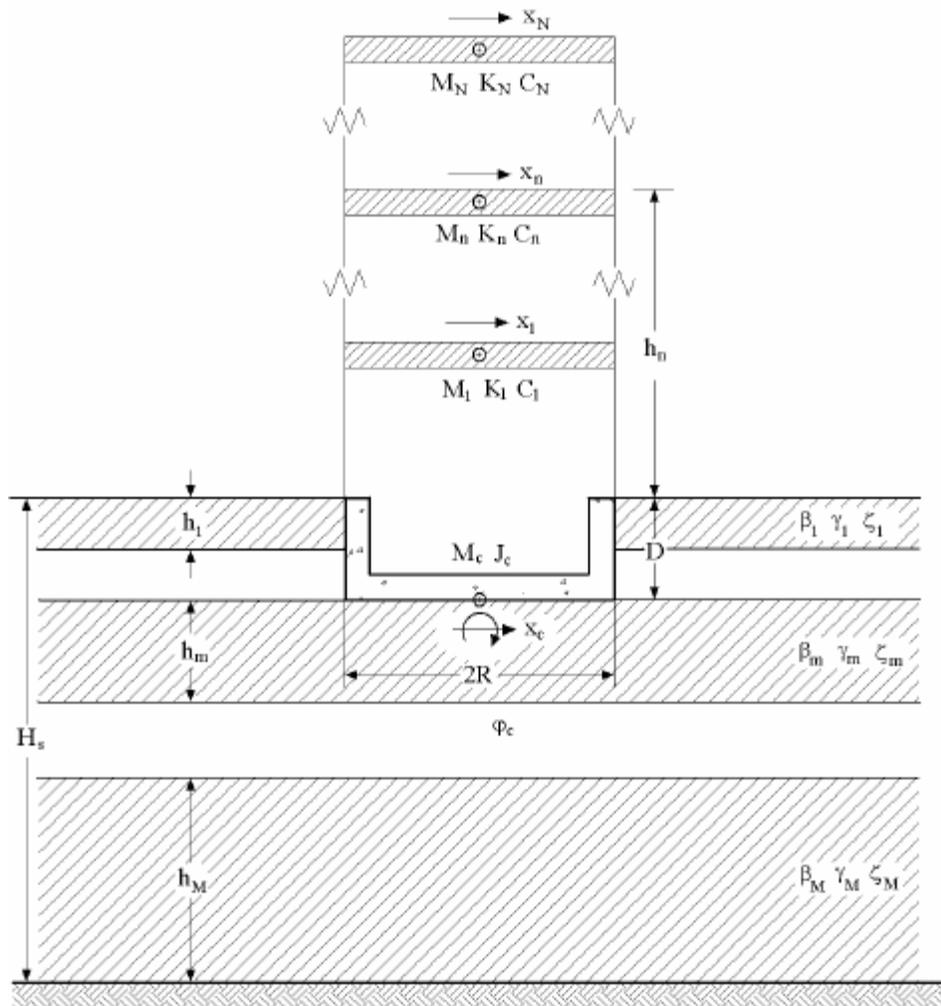
En otras palabras el sistema sufrirá un incremento en el período fundamental de vibración modificando las formas modales de vibración y en el incremento del amortiguamiento.

El incremento del amortiguamiento de un sistema suelo-estructura, es debido a una disipación adicional de energía, resultado del amortiguamiento material y geométrico del suelo. El período fundamental de vibración, es el que refleja las características dinámicas más importantes del suelo, su modificación se ve afectada en el alargamiento del período por la deformabilidad del suelo donde se encuentra desplantada la estructura.

#### IV. DETERMINACIÓN DEL PERIODO EFECTIVO EN ESTRUCTURAS CON CIMENTACIONES SUPERFICIALES.

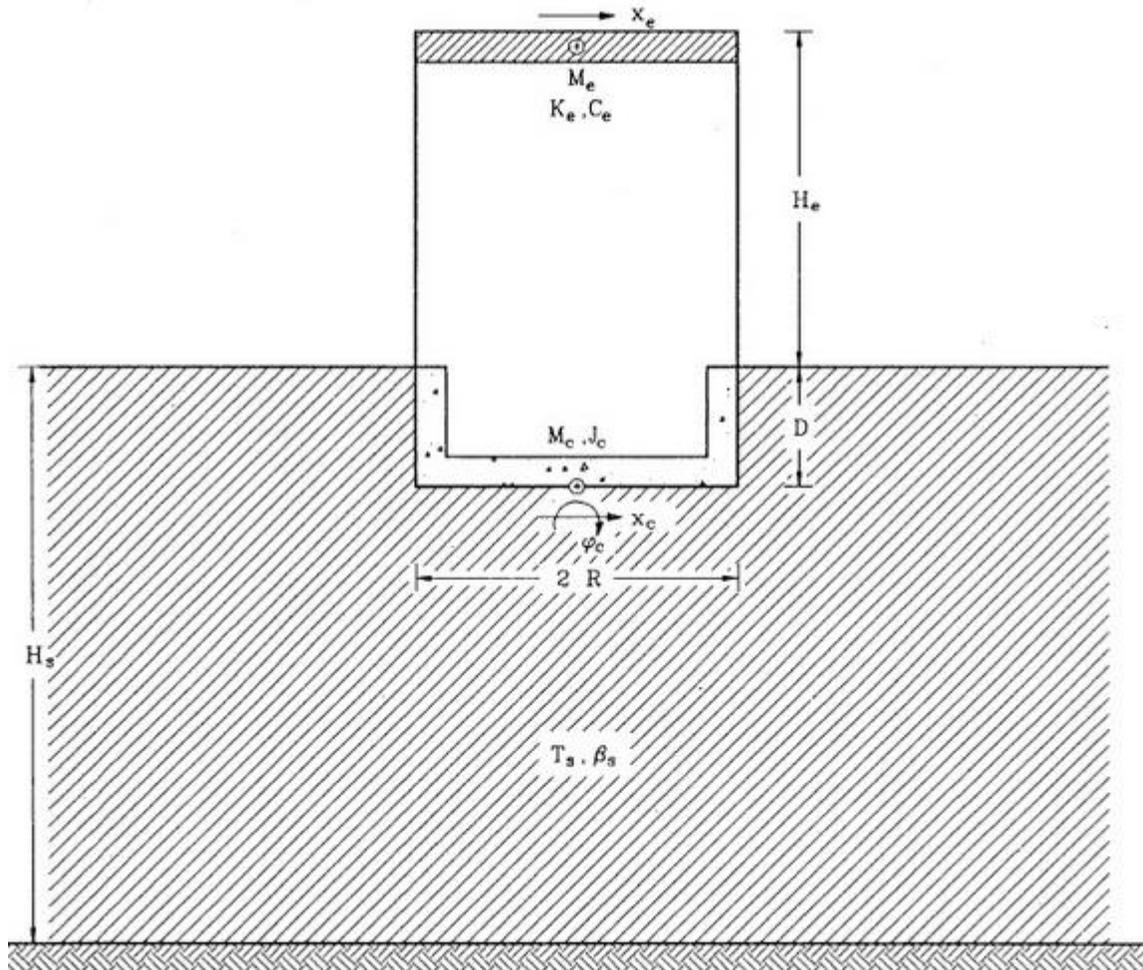
El diseño sísmico de las estructuras ubicadas en la zona I y II se debe tomar en cuenta los efectos de interacción suelo-estructura, en este caso el período y el amortiguamiento juegan un gran papel, ya que son los parámetros que dan lugar al efecto de la interacción inercial de un sistema suelo-estructura.

Para estructuras de varios grados de libertad y con depósitos de suelos estratificados considerándolo como un sistema completo, como se muestra en la figura siguiente.



**Figura 1. Sistema suelo-estructura completo.<sup>(1)</sup>**

Considerando que la estructura cuenta con varios grados de libertad, se comporta como un oscilador que tienen un grado de libertad, además cuenta con una base rígida y el depósito del suelo es homogéneo e isótropo. Como se observa en la siguiente imagen.



**Figura 2. Sistema equivalente de interacción suelo-estructura <sup>(2)</sup>**

Podemos ver que con el sistema equivalente, a la estructura se supone como si se contará sólo con un grado de libertad y el depósito del suelo será homogéneo a lo largo de su profundidad. Dando lugar a que su caracterización de la estructura real será mediante el período fundamental, su masa y su altura efectiva, y desde luego el depósito de suelo tendrá como características principales al período y su velocidad efectiva.

La masa, la rigidez y el amortiguamiento son efectivos debido a que la estructura es supuesta base rígida vibrando en su modo fundamental y  $H_e$  será la altura del centroide de las fuerzas de inercia actuantes. Dando pie que el período y el amortiguamiento del modo fundamental de un sistema equivalente contando con tres grados de libertad representan al período y el amortiguamiento efectivo de la estructura interactuando con el suelo.

Antes de la determinación del período fundamental y amortiguamiento efectivo, se analiza si se puede verificar los efectos de interacción suelo-estructura con la siguiente expresión.

$$\frac{T_e}{T_s} * \frac{H_s}{H_e} < 2.5 \quad (1)$$

#### **IV.1 Periodo fundamental de vibración efectivo**

Se puede determinar el periodo fundamental de vibración efectivo del Análisis de interacción suelo-estructura con la siguiente expresión.

$$\sim T_e = (T_e^2 + T_h^2 + T_r^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$T_e$ : Periodo fundamental de vibración de la estructura sin sistema acoplado.

$T_h$ : Periodo natural de la estructura suponiendo que es infinitamente rígida y cuya base sólo puede trasladarse.

$$T_h = 2\pi \left( \frac{M_e}{K_h} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Donde  $K_h$  es la rigidez horizontal de la cimentación, la cual es una fuerza horizontal que provoca un desplazamiento unitario en dirección de esta fuerza.  $M_e$ , es la masa de la estructura, también puede quedar expresada la ec.3 en términos de peso.

$$T_h = \frac{2\pi}{\sqrt{g}} \sqrt{\frac{W_e}{K_h}} \quad (4)$$

$T_r$ : Periodo natural de la estructura suponiendo que es infinitamente rígida y cuya base sólo puede rotar.

$$T_r = 2\pi \left( \frac{M_e (H_e + D)^2}{K_r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Donde  $K_r$  es la rigidez de cabeceo o de rotación de la cimentación, la cual es un momento que provoca un giro unitario en la dirección de este,  $D$  (m) es la profundidad de desplante y  $H_e$  es la altura efectiva de la estructura, Al igual esta ecuación puede ser expresada en términos de peso.

$$T_r = \frac{2\pi}{\sqrt{g}} \sqrt{\frac{W_e (H_e + D)^2}{K_r}} \quad (6)$$

Para la determinación del periodo efectivo pueden ser utilizadas las rigideces estáticas y dinámicas. Para estas últimas se tomarán en cuenta para su cálculo la frecuencia fundamental  $\omega_e$  de la estructura con base indeformable.

El cálculo más aproximado es realizando iteraciones, aplicando la ec.1 partiendo de un valor inicial de la frecuencia fundamental  $\omega_e$ , hasta encontrar la frecuencia efectiva  $\sim\omega_e$ .

Después que ya se haya obtenido el periodo efectivo del sistema, se procede a estimar el amortiguamiento efectivo fundamental del sistema acoplado. Solo se mencionará, ya que no está en los alcances del trabajo. Aplicando la ec.6 mostrada a continuación, En un sistema equivalente para su cálculo del amortiguamiento efectivo se parte despreciando la masa de la cimentación y del momento de inercia que se genera en ella.

$$\sim\zeta_e = \zeta_e \left( \frac{T_e}{\sim T_e} \right)^3 + \frac{\zeta_h}{1 + 2(\zeta_h)^2} \left( \frac{T_h}{\sim T_e} \right)^2 + \frac{\zeta_r}{1 + 2(\zeta_r)^2} \left( \frac{T_r}{\sim T_e} \right)^2 \quad (7)$$

Para la determinación de los amortiguamientos  $\zeta_h$  y  $\zeta_r$  (amortiguamiento por traslación horizontal y amortiguamiento por rotación o cabeceo), se consideran los amortiguamientos de la cimentación  $C_h$  y  $C_r$  modo traslación y rotación conocidas como funciones de impedancia o rigideces dinámicas. Donde  $\zeta_e$  es el amortiguamiento de la estructura inicial sin considerar la interacción suelo-estructura.

## IV.2 Funciones de impedancia

Las Funciones de impedancia o rigideces dinámicas son relaciones de fuerza, en el caso de momento aplicado y el desplazamiento rotacional en dirección de dicha fuerza, despreciando la masa de la cimentación y considerando las acciones dinámicas como un movimiento armónico.

Las funciones de impedancia, son funciones que dependen de las características del suelo, como anteriormente se mencionó que físicamente representan los resortes y amortiguamientos del subsuelo, también considerando las características de la cimentación y la frecuencia de la excitación.

La frecuencia es la fundamental de la estructura debido a que se está considerando con una base rígida.

m: significa el modo de vibrar ya sea traslación o rotación.

$$K_m = K_m^\circ (k_m - 2\zeta_s \eta_m c_m) \quad (8)$$

$$\omega C_m = K_m^\circ (\eta_m c_m - 2\zeta_s k_m) \quad (9)$$

En las ecuaciones anteriores de rigideces y amortiguamiento  $k_m$  y  $c_m$  estas están en función de los coeficientes de rigidez y amortiguamiento ya sea de modo de traslación o rotación, además considerando el acoplamiento de estos dos modos.

También estas ecuaciones se encuentran en función de las rigideces estáticas expresadas como,  $K_m^\circ$  al igual que los coeficientes se determinan para modo de traslación y para modo de rotación.

$$K_h^\circ = \frac{8G_s R_h}{2-\nu_s} \left(1 + \frac{R_h}{2H_s}\right) \left(1 + \frac{2D}{3R_h}\right) \left(1 + \frac{5D}{4H_s}\right) \quad (10)$$

$$K_r^\circ = \frac{8G_s R^3}{3(1-\nu_s)} \left(1 + \frac{1R_r}{6H_s}\right) \left(1 + \frac{2D}{R_r}\right) \left(1 + 0.71 \frac{D}{H_s}\right) \quad (11)$$

De las ecuaciones anteriores se observa que están en función de algunos parámetros, donde  $H_s$  es el espesor del estrato,  $\nu_s$  es el módulo de relación de Poisson,  $R_r$  y  $R_h$  son radios de círculos

que tienen equivalencia a la superficie de desplante de igual área y de igual momento de inercia y se determinan con las siguientes expresiones.

$$R_h = \left(\frac{A}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$R_r = \left(\frac{4I}{\pi}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (13)$$

**I**: es el momento de inercia de la superficie de cimentación respecto a su centroide sobre el eje rotacional, **A** es el área neta de la superficie de cimentación. Por lo tanto la frecuencia normalizada queda definida de la siguiente manera.

$$\eta_{r,h} = \frac{\omega R_{h,r}}{V_s} \quad (14)$$

Para el modo de traslación horizontal se usara  $\eta_h$ , en el modo de rotación o cabeceo se tomará  $\eta_r$ , para el sistema acoplado en modo de traslación horizontal que se expresa como  $\eta_s$  se tomara de la siguiente manera.

$$\eta_s = \frac{\pi R_h}{2H_s} \quad (15)$$

De igual manera en el sistema acoplado se considerará a  $\eta_p$  en modo rotación o cabeceo, como se indica a continuación.

$$\eta_p = \sqrt{\frac{2(1-\nu_s)}{(1-2\nu_s)}} * \frac{\pi R_r}{2H_s} \quad (16)$$

Para la determinación de los coeficientes de amortiguamiento y rigideces empleados en las ecuaciones (7) y (8) se tomarán en cuenta de la siguiente manera.

$$K_h = 1 \quad (17)$$

$$\mathbf{C}_h \left\{ \begin{array}{l}
 \mathbf{si} \, \eta_{hs} = \frac{\eta_h}{\eta_s} \leq \mathbf{1} \quad ; \quad \frac{0.65\zeta_s \eta_{hs}}{1-(1-2\zeta_s)\eta_{hs}^2} \\
 \mathbf{si} \, \eta_{hs} = \frac{\eta_h}{\eta_s} > \mathbf{1} \quad ; \quad \mathbf{0.576}
 \end{array} \right. \quad (18)$$

$$\mathbf{K}_r = \mathbf{1} - \mathbf{0.2}\eta_r \quad (19)$$

$$\mathbf{C}_r \left\{ \begin{array}{l}
 \mathbf{si} \, \eta_{rp} = \frac{\eta_r}{\eta_p} \leq \mathbf{1} \quad ; \quad \frac{0.5\zeta_s \eta_{rp}}{1-(1-2\zeta_s)\eta_{rp}^2} \\
 \mathbf{si} \, \eta_{rp} = \frac{\eta_r}{\eta_p} > \mathbf{1} \quad ; \quad \frac{0.3\eta_r^2}{1+\eta_r^2}
 \end{array} \right. \quad (20)$$

## **V. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA INTERACCIÓN DINÁMICA**

Como ya se explicó anteriormente la interacción suelo-estructura está dividida en efectos cinemáticos e inerciales, también ya se estableció que los efectos inerciales son los que más influyen en el comportamiento del sistema suelo-estructura. Por lo tanto, vale la pena destacar la importancia de los factores predominantes y considerados para analizar el fenómeno de interacción suelo-estructura.

La altura **H** de la estructura (H del edificio) toma un papel importante en los efectos que pueda tener la interacción suelo-estructura, el cual es a considerar ya que dependiendo de este valor van a depender muchos algunos factores dinámicos de la estructura, donde entran el periodo fundamental de vibración de la estructura y el amortiguamiento de la misma. Además la altura influye mucho en el peso de la estructura.

Para la realización de la interacción suelo-estructura, la **H<sub>e</sub>** efectiva se considera como la altura del centroide de las fuerzas de inercia, que para fines de cálculo para el método dinámico la altura efectiva no deberá ser menor que 0.7 veces la altura de la estructura. Por lo tanto.

$$\mathbf{H_e=0.7 H.} \quad (21)$$

Donde H<sub>e</sub>, es la altura efectiva y H es la altura de la estructura.

De igual forma el peso o masa es un factor o característica importante de la estructura para los efectos de la interacción suelo-estructura, en gran parte depende de la altura y de la geometría de la estructura. También este factor se deberá tomar un peso efectivo donde debe ser menor que 0.7 veces el peso de la estructura. Po lo tanto.

$$\mathbf{W_e= 0.7 W.} \quad (22)$$

W<sub>e</sub>, es el peso o masa efectiva y W es el peso o masa de la estructura.

La geometría de la estructura de cimentación tiene importancia en los factores mecánicos que se puedan presentar, por ejemplo es importante conocer el área de la cimentación denominada como  $A$ , ayudándonos a la determinación del momento de inercia y de los radios equivalentes de la superficie de la base, ecu. (12) y (13). Son fundamentales para el cálculo de las rigideces estáticas que se presentan.

La profundidad de desplante  $D$  va depender mucho del diseño ejecutivo del proyecto o de las características de la zona geotécnica donde se esté proyectando la estructura. Viene siendo un factor importante en la determinación de las rigideces estáticas del sistema suelo-estructura, Considerándose un factor muy importante en el sistema.

Como ya se explicó párrafos anteriores, que los factores dinámicos de la estructura dependientes en la mayoría de los casos de las características de la misma, como por ejemplo el período fundamental de vibración  $T_e$  y el amortiguamiento  $\zeta_e$ . su influencia de los dos factores es importante en el comportamiento de la estructura regularmente su valor se establece de 5% en el caso del amortiguamiento, en el caso del periodo va depender la mayor parte de la altura del edificio y de las zona geotécnica donde esté ubicada la estructura. Son fundamentales en el análisis de interacción suelo-estructura.

Ahora pasemos hablar de los factores y/o propiedades importantes del suelo, que van a depender de la zona geotécnica donde se establezca la ubicación de la estructura. Gracias a la campaña de exploración previa al análisis, podremos tener el conocimiento de las propiedades mecánicas y físicas del suelo.

Una de las características importantes en este análisis es el espesor del estrato  $H_s$ , es una propiedad física que interviene de manera importante, esta propiedad debido a que para un análisis de interacción suelo-estructura en zonas donde se encuentran depósitos de suelo blando,  $H_s$ , tendrá una función importante en los efectos de interacción inercial del sistema y en el factor del periodo fundamental del suelo. Este factor se obtiene a partir de pruebas de campo.

La velocidad de propagación de ondas de corte  $V_s$ , también se obtiene de pruebas de campo o de laboratorio, es una propiedad dinámica del suelo determinante para el sistema suelo-estructura, al igual que  $H_s$  ayudan a la determinación del periodo fundamental. Pero con  $V_s$  se puede determinar otra propiedad que es la rigidez dinámica del suelo  $G$ . la rigidez dinámica del suelo, que es importante en la determinación de la rigideces estáticas de la interacción suelo-estructura.

El periodo del suelo  $T_s$  y el amortiguamiento del suelo  $\zeta_s$ , son factores determinantes en los efectos de interacción suelo-estructura. Estos parámetros tanto del suelo como de la estructura son muy característicos en su comportamiento ante excitaciones dinámicas, es por eso que en un sistema de interacción suelo-estructura su influencia es fundamental.

$$T_s = \frac{4 \cdot H_s}{V_s} \quad (23)$$

Además hay diferentes formas de calcularlo, pero esta ecuación es para indicar los factores que influyen directamente en el periodo del suelo.

También hay dos propiedades del suelo que suman su influencia al realizar un análisis de interacción suelo-estructura. El módulo de relación de Poisson y el peso volumétrico del suelo, el primero representado como  $\nu$  tomado en cuenta para el cálculo de las rigideces estáticas. Normalmente se considera con un valor de 0.45 o 0.49. El peso volumétrico  $\gamma_m$  va a depender del tipo de suelo en el que estará desplantada la estructura, es un parámetro o una propiedad que ayuda en la determinación de la Rigidez dinámica del suelo  $G$  y en la antes ya mencionada con anterioridad  $V_s$  equivalente del suelo que puede ser calculado de diferentes maneras.

$$G = V_s^2 * \frac{\gamma_m}{9.81} \quad (24)$$

Donde  $9.81 \text{ m/s}^2$  es la aceleración de la gravedad.

Todos los factores son importantes en este análisis, aunque algunos no intervengan directamente en el sistema o en la respuesta de la interacción suelo-estructura son de

suma importancia porque estos factores influyen directamente pero en otro factor que si lo haga en el sistema o bien en la respuesta de la misma.

## **VI. EFECTO DE LOS FACTORES QUE PARTICIPAN EN LA INTERACCIÓN DINÁMICA Y SU EFECTO EN LA RESPUESTA ESTRUCTURAL.**

Es importante conocer de los factores que ya fueron mencionados en el capítulo anterior la influencia, su respuesta y que tanto es su intervención de cada uno de los ellos en todo el análisis de interacción suelo-estructura. Todos estos factores serán analizados a continuación ya que tomaremos un ejemplo del manual de diseño de obras civiles por sismo de 1993 para realizar el análisis de interacción suelo estructura y poder observar los efectos de cada uno de los factores y su respuesta del periodo efectivo del sistema.

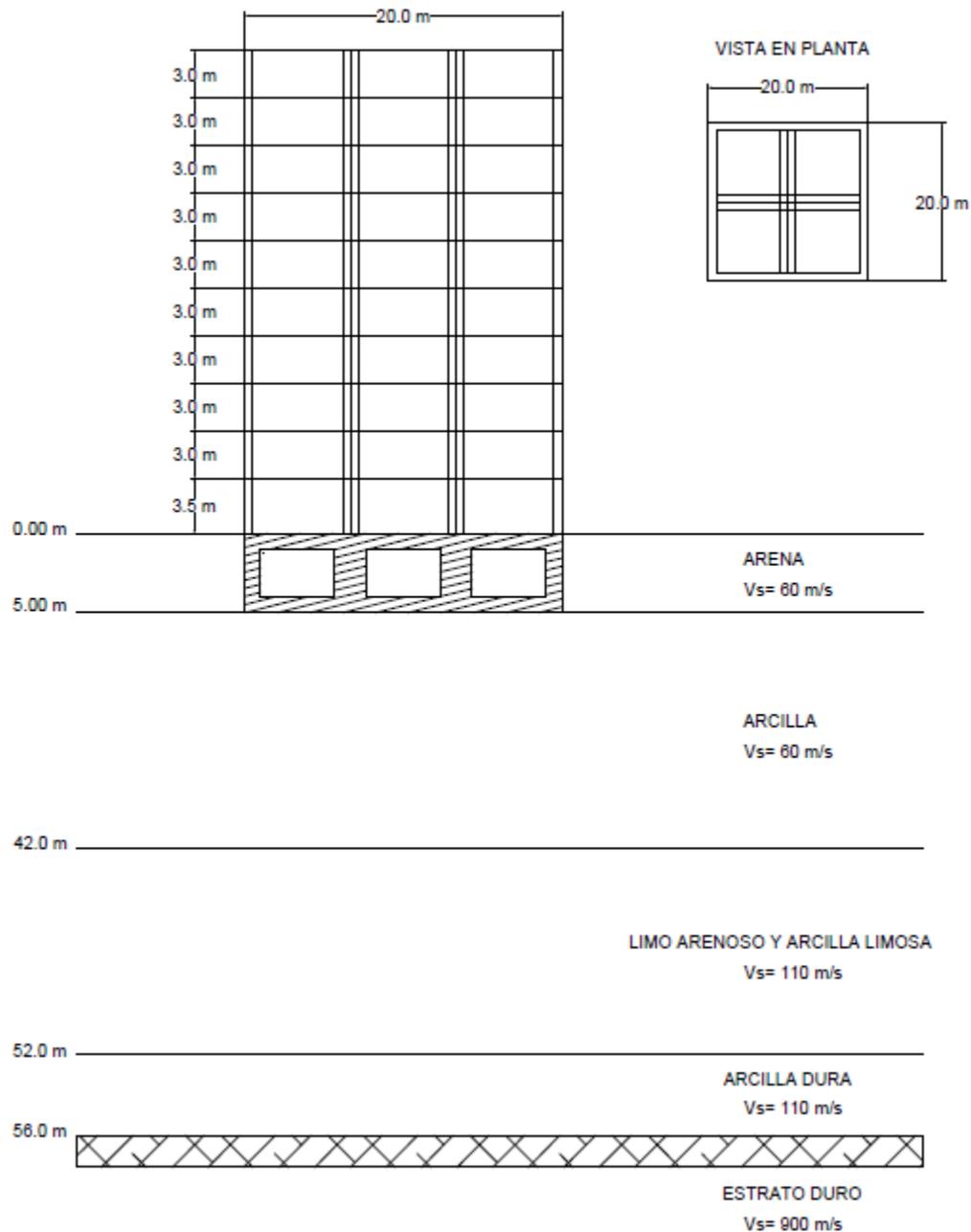
Se muestra un edificio de concreto de 10 niveles que se desplanta en un depósito de suelo estratificado con una profundidad a la roca basal de 56 m. la construcción se ubica de acuerdo a la regionalización sísmica del país a la zona B tipo 1. Para el análisis de interacción suelo-estructura se debe determinar el periodo y amortiguamiento efectivo de la estructura interactuando con el suelo. Para fines de este trabajo sólo se realizará el cálculo para el periodo efectivo. El análisis de interacción suelo-estructura será analizado en una sola dirección ya que la construcción cuenta con las mismas características en las dos direcciones.

Se considera que el peso de cada nivel es igual a  $1 \text{ T/m}^2$  y el amortiguamiento de la estructura supuesta con base rígida es del 5 por ciento.

La cimentación se modela como un cajón rígido con una geometría de base cuadrada que es desplatada a 5 m, cuya superficie es igual a  $400 \text{ m}^2$  puesto que  $B= 20\text{m}$  y  $L= 20 \text{ m}$ .

El suelo se toma como un depósito estratificado horizontalmente indicando su velocidad de propagación de ondas de cortante y espesores. Además el peso volumétrico se un promedio de cada espesor para el depósito en general. La relación de Poisson se tomará con un valor de 0.45 y un amortiguamiento del 5 por ciento como parámetros del sitio.

Para despreciar los efectos no lineales del suelo, se considera que las propiedades mecánicas del depósito de suelo se consideran compatibles con los niveles de deformación a raíz de la presencia de un sismo intenso.



**Figura 3. Ejemplo idealizado de un sistema equivalente suelo-estructura.**

Primero se calculará el periodo dominante de vibración del suelo  $T_s$  y la velocidad efectiva de propagación  $V_s$ . se determinaran con la técnica del promedio de las lentitudes de la formación estratificada del sitio. Para la determinación del periodo fundamental de vibración  $T_s$ , se pasa a utilizar la ec. (23).

$$V_s = \frac{\sum_i^n h_i}{\sum_i^n \frac{h_i}{V_{s_i}}} \quad (25)$$

Aplicando la ec. (25) tenemos que:

$$V_s = \frac{(5) + (37) + (10) + (4)}{\left(\frac{5}{60}\right) + \left(\frac{37}{60}\right) + \left(\frac{10}{110}\right) + \left(\frac{4}{110}\right)}$$

$$V_s = 67.7 \frac{m}{s}$$

De acuerdo a la ec. (23) el periodo fundamental de vibración efectivo del suelo será.

$$T_s = \frac{4 * (56m)}{67.7 \left(\frac{m}{s}\right)}$$

$$T_s = 3.31 \text{ s.}$$

El periodo fundamental de vibración de la estructura  $T_e$  se considera de 1.16 s.

La masa y la altura del edificio se considerarán aplicando la ec. (21) para el caso de la altura efectiva del edificio y la ec. (22) para el caso del peso efectivo de la estructura.

$$H_e = 0.7 (30.5 \text{ m})$$

$$H_e = 21.35 \text{ m.}$$

Para el peso efectivo

$$W_e = 0.7 * (W)$$

Pero para el cálculo del peso de la estructura se determinará como se indica a continuación

$$W = (\sigma * B * L * \# \text{ niveles}) \quad (26)$$

Por lo tanto el peso efectivo será.

$$W_e = 0.7 * (1 * 20 * 20 * 10)$$

$$W_e = (0.7) * 4000 \text{ ton} = 2800 \text{ ton}$$

Para revisar si es necesario la realización de un análisis de interacción suelo-estructura, de acuerdo a los valores de  $W_e$ ,  $H_e$ ,  $T_s$  y  $T_e$ . Los sustituimos en ec. (1).

$$\frac{1.16}{3.91} * \frac{56}{21.35} < 2.5$$

$$0.920 < 2.5$$

Por lo tanto, si es necesario realizar análisis de interacción suelo-estructura.

Para determinar el periodo fundamental de vibración efectivo  $\sim T_e$  del sistema suelo-estructura, Se obtendrá mediante iteraciones en la frecuencia utilizando rigideces dinámicas aproximadas. También se determinará el amortiguamiento efectivo  $\sim \zeta_e$  aunque no se encuentre contemplado en los objetivos de este trabajo.

Hay factores como ya se dijo anteriormente que interviene directamente e indirectamente en el cálculo del periodo efectivo  $\sim T_e$  y del amortiguamiento efectivo  $\sim \zeta_e$ . que se muestran a continuación además de los ya determinados e indicados anteriormente.

Si tiene que la velocidad propagación de ondas de cortante efectiva del depósito de suelo  $V_s$  es igual a 67.71 m/s, y también sabemos que el peso volumétrico efectivo  $\gamma_m$  es igual a 1.50 t/m<sup>3</sup> tenemos la rigidez dinámica igual a ecu. (24).

$$G = (67.71)^2 * \frac{1.50}{9.81}$$

$$G = 700.81 \text{ t/m}^2.$$

Después determinamos los radios de círculos equivalentes de la superficie de desplante del modo traslación horizontal y rotacional utilizando los ecus. (12) y (13). Se deberá calcular el momento de inercia de acuerdo a la geometría de la cimentación en este caso contamos con una cimentación cuadrada por lo tanto se ocupará la siguiente expresión.

$$I = \frac{BxL^3}{12} \quad (27)$$

$$I = \frac{20x(20)^3}{12}$$

$$I = 13,333.33 \text{ m}^4$$

Ahora tenemos que:

$$R_h = \left( \frac{20x20}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$R_h = 11.28 \text{ m}$$

$$R_r = \left( \frac{4x13,333.33}{\pi} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$R_r = 11.41 \text{ m}$$

Con lo anterior ya determinado, se pueden obtener los valores de las rigideces estáticas del modo horizontal y rotacional del sistema de interacción suelo-estructura utilizando la ecus. (10) y (11).

$$K^{\circ}_h = \frac{8 * (700.81)(11.28)}{2 - 0.45} \left(1 + \frac{11.28}{2 * (56)}\right) * \left(1 + \frac{2(5)}{2(11.28)}\right) * \left(1 + \frac{5(5)}{4(56)}\right)$$

$$K^{\circ}_h = 64,693.21 \text{ t/m}$$

$$K^{\circ}_r = \frac{8 * (700.81)(11.41^3)}{3(1 - 0.45)} \left(1 + \frac{11.41}{6 * (56)}\right) * \left(1 + \frac{2(5)}{(11.41)}\right) * \left(1 + 0.71 \frac{(5)}{(56)}\right)$$

$$K^{\circ}_r = 10,424,200.6 \text{ t/m}$$

Antes de pasar a calcular las rigideces dinámicas en los dos tipos de modos, tenemos que calcular las frecuencias normalizadas del modo en traslación horizontal y rotacional, ec (14), además de los modos acoplados en traslación horizontal y rotacional, empleando las ecus. (15) y (16).

La primer frecuencia para la primera iteración se calculada como sigue, Ec. (28).

$$\omega = \frac{2\pi}{T_e} \quad (28)$$

Por lo tanto

$$\omega = \frac{2\pi}{1.16 \text{ s}}$$

$$\omega = 5.417 \text{ rad}$$

Ahora aplicando las ec. (14) para las frecuencias normalizadas de los dos tipos de modo, traslación horizontal y rotacional, tenemos que.

$$\eta_h = \frac{(5.417 * 11.28)}{67.71}$$

$$\eta_h = 0.903$$

$$\eta_h = \frac{(5.417 * 11.41)}{67.71}$$

$$\eta_r = 0.913$$

Para las frecuencias normalizadas en los modos acoplados se tiene que, ecus (15) para modo acoplado traslación horizontal y ec. (16) para modo acoplado rotacional o cabeceo.

$$\eta_s = \frac{\pi * 11.28}{2(56)}$$

$$\eta_s = 0.317$$

$$\eta_p = \sqrt{\frac{2(1 - 0.45)}{(1 - (2 * 0.45))}} * \frac{\pi * 11.41}{2(56)}$$

$$\eta_p = 1.062$$

En los coeficientes de amortiguamiento y rigideces se utilizarán como ya se dijo anteriormente, las ecus. (17) y (18) para modo de traslación horizontal y ecus. (19) y (20) para el modo rotacional o cabeceo.

Primero que nada vemos las condiciones de desigualdades para determinar el coeficiente de amortiguamiento,  $C_h$ .

La primera desigualdad se determina como sigue:

$$\eta_{hs} = \frac{0.903}{0.317} = 2.852$$

No se cumple la desigualdad, para menor igual a 1.

$$\eta_{hs} = \frac{\eta_h}{\eta_s} \leq 1$$

La segunda desigualdad se determina como sigue:

$$\eta_{hs} = \frac{0.903}{0.317} = 2.852$$

Aquí si se cumple la desigualdad cuando es mayor a uno, por lo tanto;

$$C_h = 0.576.$$

El coeficiente de rigidez  $K_h$  del modo de traslación horizontal, será determinado como se expresa la ec. (17)

$$k_h = 1$$

Ahora verificamos las condiciones de desigualdades para determinar el coeficiente de amortiguamiento  $C_r$ .

La primera desigualdad se determina como sigue:

$$\eta_{rp} = \frac{0.913}{1.062} = 0.860$$

No se cumple la desigualdad, para menor igual a uno.

$$\eta_{rp} = \frac{\eta_r}{\eta_p} > 1$$

La segunda desigualdad se determina como sigue:

$$\eta_{rp} = \frac{0.913}{1.062} = 0.860$$

Aquí si se cumple la desigualdad cuando es menor igual uno, por lo tanto  $C_r$  se calculara de la siguiente manera.

$$c_r = \frac{0.5(0.05) * (0.860)}{1 - (1 - 2(0.05)) * (0.860^2)} = 0.0643$$

El coeficiente de rigidez para el modo de rotación o cabeceo  $k_r$ , se determinará de acuerdo a la ecuación (19).

$$K_r = 1 - 0.2(0.903)$$

$$K_r = 0.817$$

Se procede con el cálculo de las funciones de impedancia,  $K_h$  y  $C_h$  para el caso del modo de traslación horizontal,  $K_r$  y  $C_r$  para el caso de del modo rotacional o cabeceo rigideces. De acuerdo a las ecus. (8) y (9).

### **VI. 1 Modo de traslación horizontal.**

$$K_h = (64693.21) * \{(1 - 2(0.05 * 0.903 * 0.572))\}$$

$$K_h = 61,329.10 \text{ t/m}$$

$$C_h = \frac{(64693.21) * \{(0.903 * 0.572) - 2(0.05 * 1)\}}{5.417}$$

$$C_h = 7,405.15 \text{ t/m}$$

## VI.2 Modo rotacional o cabeceo.

$$K_r = (10,424,200.6) * \{(0.817 - 2(0.05 * 0.913 * 0.064))\}$$

$$K_r = 8,458,970.77 \text{ t/m}$$

$$C_r = \frac{(10,424,200.6) * \{(0.913 * 0.064) - 2(0.05 * 0.817)\}}{5.417}$$

$$C_r = 270,325.09 \text{ t/m}$$

Ya que se determinaron las funciones de impedancia del sistema de interacción-suelo estructura, procedemos a la determinación de periodo fundamental de vibración efectivo del sistema. A partir de la ec. (2), pero antes hay que determinar los periodos naturales de la estructura para el modo de traslación horizontal y rotacional o cabeceo ( $T_h$  y  $T_r$ ) empleando las ecus. (3) y (4).

Aplicando (3) y (4) tenemos que:

$$T_h = \frac{2\pi}{\sqrt{9.81}} \sqrt{\frac{2800}{61,329.10}}$$

$$T_h = 0.429 \text{ seg}$$

$$T_r = \frac{2\pi}{\sqrt{9.81}} \sqrt{\frac{2,800(21.35 + 5)^2}{8,458,970.77}}$$

$$T_r = 0.962 \text{ seg}$$

Por lo tanto, para aplicar periodo fundamental vibración efectivo se aplicará la ec. (2).

$$\sim T_e = \sqrt{1.16^2 + 0.429^2 + 0.962^2}$$

$$\sim T_e = 1.567 \text{ seg.}$$

Para la segunda iteración se tomará la frecuencia correspondiente al periodo efectivo obtenida en la primera iteración, de esta forma se puede continuar el proceso del cálculo de la segunda iteración de forma menos detalla.

## SEGUNDA ITERACIÓN

### \*Ciclo 1

$\omega =$	4.011	Rad
$R_h$	11.2838	m
$R_r$	11.4146	m

$\eta_h =$	0.668
$\eta_r =$	0.676
$\eta_s =$	0.317
$\eta_p =$	1.062

*MODO TRASLACIÓN HORIZONTAL				
$K_h =$	1			
$C_h =$	0.5760	si	$\eta_{hs} = 2.11 \leq 1$	-0.0228
		si	$\eta_{hs} = 2.11 > 1$	0.576

$K_h^0 =$	64693.21	
$C_h =$	7823.80 t/m	
$K_h =$	62202.23 t/m	

*MODO CABECEO		
$k_r =$	0.86	
$c_r =$	0.0251	si $\eta_{rp} = 0.64 \leq 1$ 0.0251
		si $\eta_{rp} = 0.63 > 1$ 0.094
$K_r^0 =$	10424200.59	
$C_r =$	268818.35 t/m	
$K_r =$	8996690.552 t/m	

$T_h =$	0.42 s
$T_e =$	1.16 s
$T_r =$	0.93 s
$T_e \sim =$	1.548 s

### TERCERA ITERACIÓN

#### \*Ciclo 2

$\omega =$	4.058	Rad
$R_h$	11.28	m
$R_r$	11.41	m

$\eta_h =$	0.677
$\eta_r =$	0.684
$\eta_s =$	0.316
$\eta_p =$	1.062

*MODO TRASLACIÓN HORIZONTAL		
$K_h =$	1	
$C_h =$	0.5760	si $\eta_{hs} = 2.14 \leq 1$ -0.0172

		si	$\eta_{hs} =$	2.14	>	1	0.576
$K_h^0 =$	64693.21						
$C_h =$	7804.67 t/m						
$K_h =$	62172.33 t/m						

*MODO CABECEO							
$k_r =$	0.86						
$c_r =$	0.026	si	$\eta_{rp} =$	0.64	$\leq$	1	0.026
		si	$\eta_{rp} =$	0.64	>	1	0.096
$K_r^0 =$	10424200.59						
$C_r =$	266892.47 t/m						
$K_r =$	8979089.591 t/m						

$T_h =$	0.426 s
$T_e =$	1.16 s
$T_r =$	0.933 s
$T_e \sim =$	1.549 s

#### CUARTA ITERACIÓN

##### \*Ciclo 3

$\omega =$	4.0573	Rad
$R_h$	11.28	m
$R_r$	11.41	m

$\eta_h =$	0.676
$\eta_r =$	0.684
$\eta_s =$	0.316
$\eta_p =$	1.062

<b>*MODO TRASLACIÓN HORIZONTAL</b>		
$K_h =$	1	
$C_h =$	0.5760	si $\eta_{hs} = 2.14 \leq 1$ -0.0172
		si $\eta_{hs} = 2.14 > 1$ 0.576
$K_h^0 =$	64693.21	
$C_h =$	7805.26 t/m	
$K_h =$	62173.28 t/m	

<b>*MODO CABECEO</b>		
$k_r =$	0.86	
$c_r =$	0.025706488	si $\eta_{rp} = 0.64 \leq 1$ 0.0257
		si $\eta_{rp} = 0.64 > 1$ 0.096
$K_r^0 =$	10424200.59	
$C_r =$	266951.42 t/m	
$K_r =$	8979644.565 t/m	

$T_h =$	0.426 s
$T_e =$	1.16 s
$T_r =$	0.933 s
$T_e \sim =$	1.549 s

El proceso iterativo se detendrá cuando la diferencia que se tiene entre los periodos efectivos calculados en las dos últimas iteraciones sea nula.

## VII. ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE LOS FACTORES QUE PARTICIPAN EN LA INTERACCIÓN DINÁMICA.

### VII.1 Comportamiento del período fundamental de vibración en el análisis paramétrico.

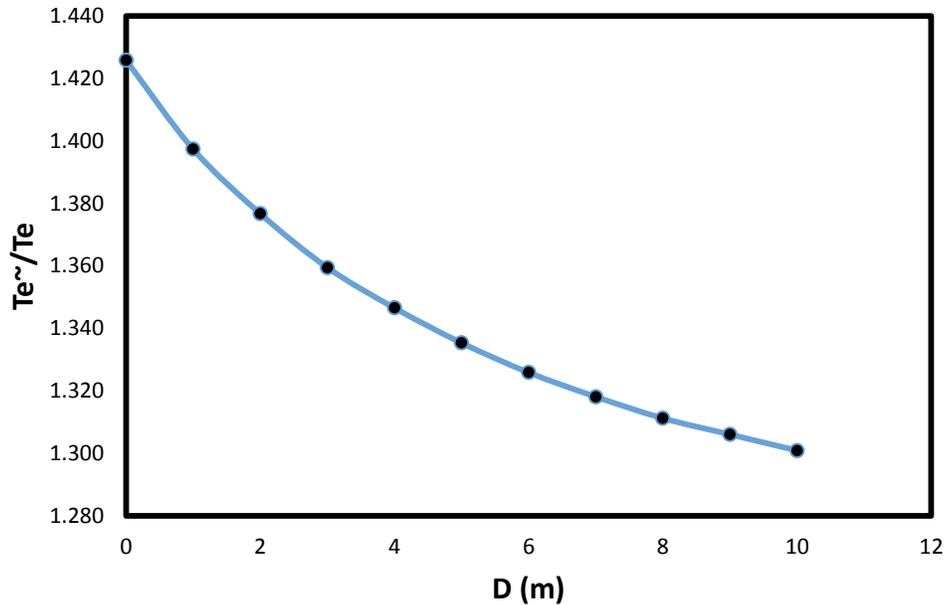
Para el analizar el comportamiento del período efectivo, se hizo un análisis paramétrico de cada uno de los factores que intervienen en el sistema de interacción suelo-suelo-estructura; se estableció que el parámetro a analizar se fue variando y los demás datos del sistema se consideraron constantes en dicho sistema y así poder observar la variación del periodo efectivo.

El primer análisis se hizo dando diferentes valores de profundidad de desplante en un rango de 0 m a 10 m, Tabla 1, donde se puede observar que entre más grande sea la profundidad de desplante el sistema tendrá un periodo efectivo menor y viceversa entre más pequeña sea la profundidad de desplante el periodo efectivo será mayor, figura 4.

La profundidad de desplante es un factor que interviene en la determinación de las rigideces estáticas del modo traslación y cabeceo; por lo tanto, entre menor sea la profundidad de desplante, esta rigidez, ya sea de traslación o cabeceo ira disminuyendo y con ello provocará una disminución en el periodo efectivo del sistema.

D(m)	$T_e \sim / T_e$
0	1.426
1	1.397
2	1.377
3	1.359
4	1.347
5	1.335
6	1.326
7	1.318
8	1.311
9	1.306
10	1.301

**Tabla 1. Valores de periodo efectivo variando la profundidad de desplante D (m).**



**Figura 4. Gráfica  $T_{e\sim}/T_e$  vs D**

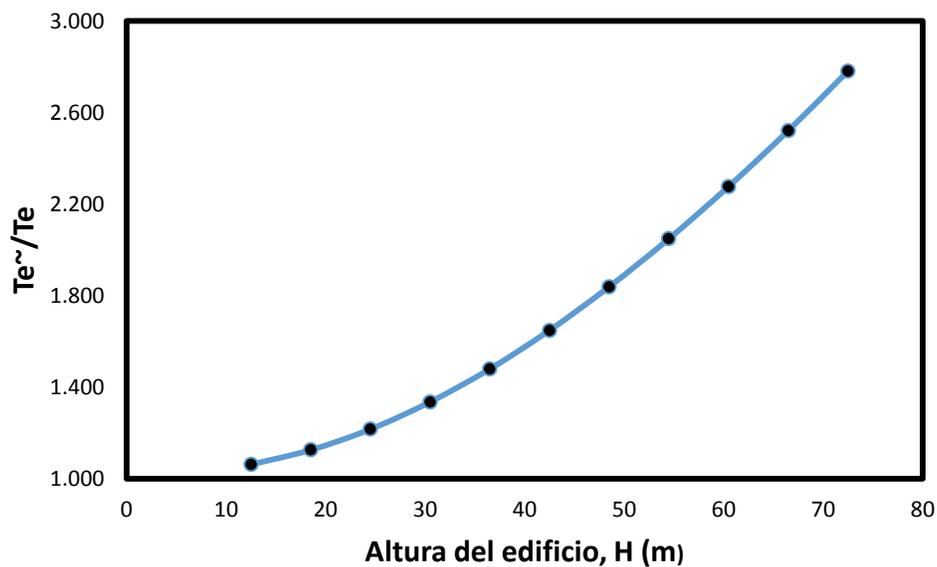
El periodo efectivo va ser menor si la  $H$  (m) de la estructura es más pequeña y va ser mayor si  $H$  (m) es más grande, como se muestra en la tabla 2. La  $H$  (m) es otro factor característico de la estructura, al igual que el análisis anterior se consideró valores de  $H$  (m) en donde está en función del número de niveles del edificio, considerando en un rango de 4 a 24 niveles y considerando los demás factores constantes, pudiendo observar la variación del periodo efectivo respecto a estas características de  $H$  (m) de la estructural Figura 5.

El periodo fundamental de vibración de una estructura, va estar en función de la altura del edificio, pero para el análisis de interacción suelo-estructura este factor influye directamente en la determinación del periodo de vibración del sistema en el modo cabeceo o rotacional ( $T_r$ ), entonces entre menos niveles (altura menor) tenga en este caso el edificio,  $T_r$  disminuye y viceversa si el edificio tiene más niveles, por lo tanto  $H$ , es mayor y  $T_r$  aumenta.

Entonces se puede decir que el periodo efectivo ( $T_{e\sim}/T_e$ ) tabla 2. Presentará el mismo comportamiento que  $T_r$ , como se observa en la figura (5).

Niveles	H(m)	$T_e \sim / T_e$
4	12.5	1.062
6	18.5	1.126
8	24.5	1.216
10	30.5	1.335
12	36.5	1.479
14	42.5	1.648
16	48.5	1.839
18	54.5	2.048
20	60.5	2.277
22	66.5	2.521
24	72.5	2.781

**Tabla 2. Valores de periodo efectivo variando la altura del edificio H (m).  
variando la altura de la estructura H (m).**



**Figura 5. Gráfica  $T_e \sim / T_e$  vs H (m)**

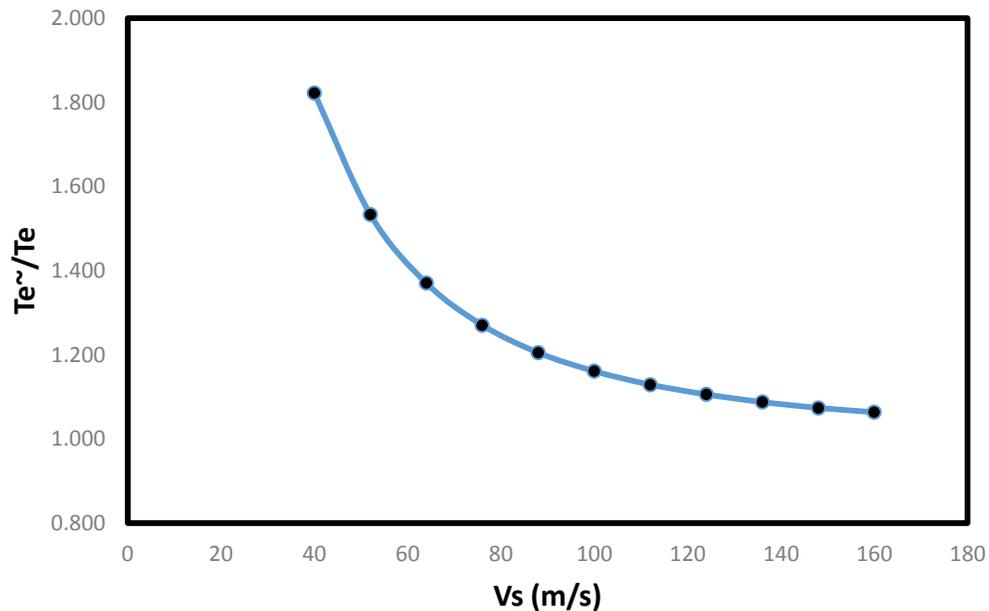
Ahora pasamos al análisis sobre la velocidad de ondas de propagación de corte efectivo del suelo, al igual que los análisis anteriores, para observar el efecto que provoca la  $V_s$  en el periodo efectivo del sistema de interacción suelo-estructura, se estableció un rango de 40 a 160 (m/s) haciendo los demás factores constantes en el análisis. Tabla (3).

Se puede decir que entre más pequeña sea la  $V_s$  el periodo efectivo irá aumentando y si  $V_s$  es más grande el periodo efectivo irá disminuyendo. Esto se debe a que la velocidad de propagación de ondas de corte es una propiedad dinámica de los suelos importante en la determinación del periodo fundamental de vibración del suelo  $T_s$  y como ya se explicó anteriormente que  $V_s$  influye indirectamente en un análisis de interacción suelo-estructura, pero es de suma importancia en la determinación del módulo de rigidez dinámico del suelo; donde este influye en el cálculo de las rigideces estáticas  $K_h^\circ$  y  $K_r^\circ$  del sistema.

Indicándonos que si la  $V_s$  es mayor las rigideces estáticas serán grandes, por lo tanto, el periodo efectivo del sistema será pequeño. De manera en que  $V_s$  va decreciendo las rigideces estáticas estarán disminuyendo y el periodo efectivo se va haciendo más grande. Figura (6).

$V_s(\text{m/s})$	$T_e \sim / T_e$
40	1.822
52	1.534
64	1.371
76	1.271
88	1.205
100	1.161
112	1.129
124	1.106
136	1.088
148	1.074
160	1.064

**Tabla 3. Valores del periodo efectivo variando la altura de la velocidad de propagación de ondas de cortante del suelo  $V_s$  (m/s).**

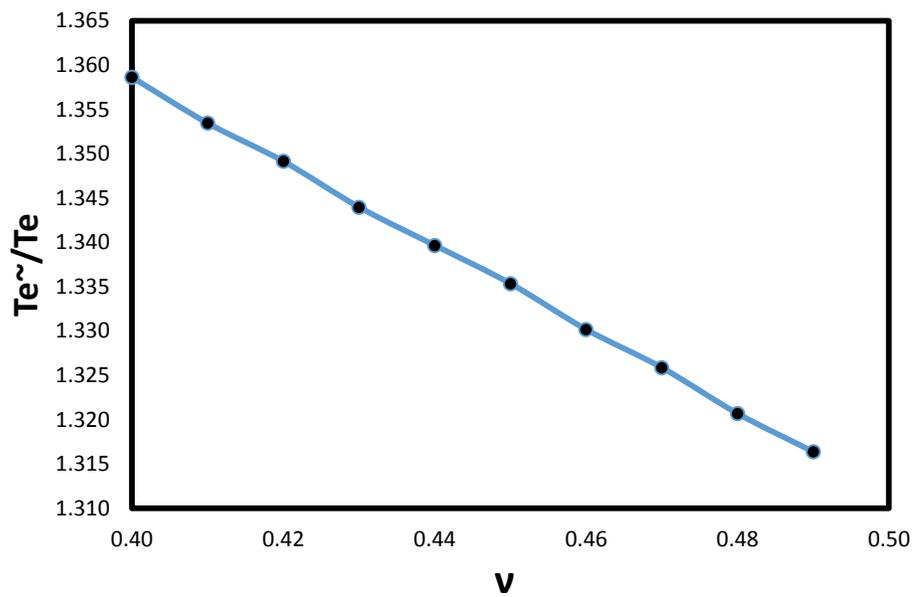


**Figura 6. Gráfica  $T_e~/T_e$  vs  $V_s$  (m/s)**

El peso volumétrico del suelo  $\gamma_m$  y el módulo de relación de Poisson  $\nu$ , son factores del suelo que en un análisis de interacción suelo-estructura influyen de manera indirecta; ya que hay otros factores del suelo dependientes de estos, por ejemplo, el análisis anterior tenemos que un suelo tiene una  $V_s$  (m/s) grande, quiere decir que el depósito tendrá un peso volumétrico proporcional a  $V_s$ , por lo tanto en la figura (8). Se puede observar que a menor peso volumétrico, tendremos un periodo efectivo en aumento y a mayor peso volumétrico tendremos un periodo efectivo decreciente. Lo mismo pasa con el módulo de relación de Poisson figura (7).

$\nu$	$T_e \sim / T_e$
0.40	1.359
0.41	1.353
0.42	1.349
0.43	1.344
0.44	1.340
0.45	1.335
0.46	1.330
0.47	1.326
0.48	1.321
0.49	1.316

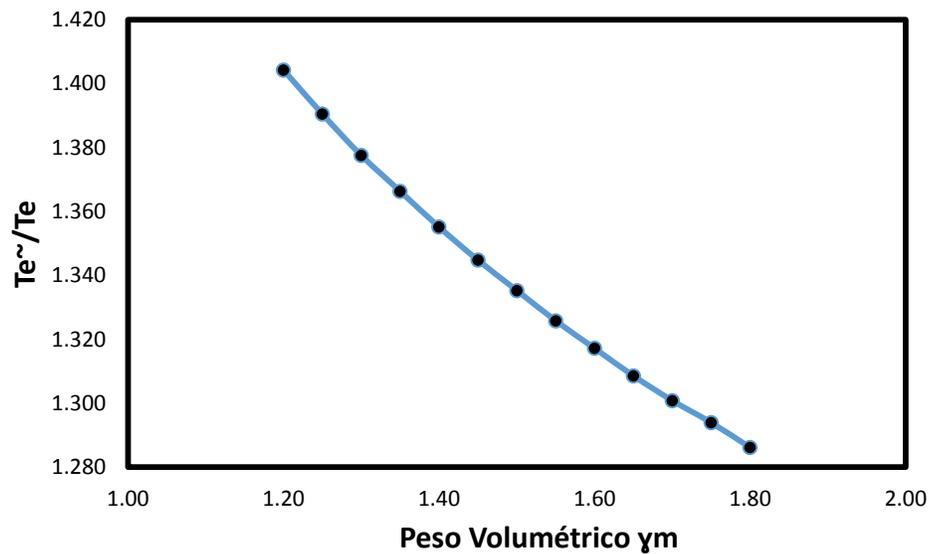
**Tabla 4. Valores del periodo efectivo variando el Módulo de relación de Poisson  $\nu$ .**



**Figura 7. Gráfica  $T_e \sim / T_e$  vs  $\nu$  (m/s).**

$\gamma_m$	$T_e \sim / T_e$
1.20	1.404
1.25	1.391
1.30	1.378
1.35	1.366
1.40	1.355
1.45	1.345
1.50	1.335
1.55	1.326
1.60	1.317
1.65	1.309

**Tabla 5. Valores del periodo efectivo variando  
Peso volumétrico del suelo ( $t/m^3$ ).**



**Figura 8. Gráfica  $T_e \sim / T_e$  vs  $\gamma_m$  ( $t/m^3$ ).**

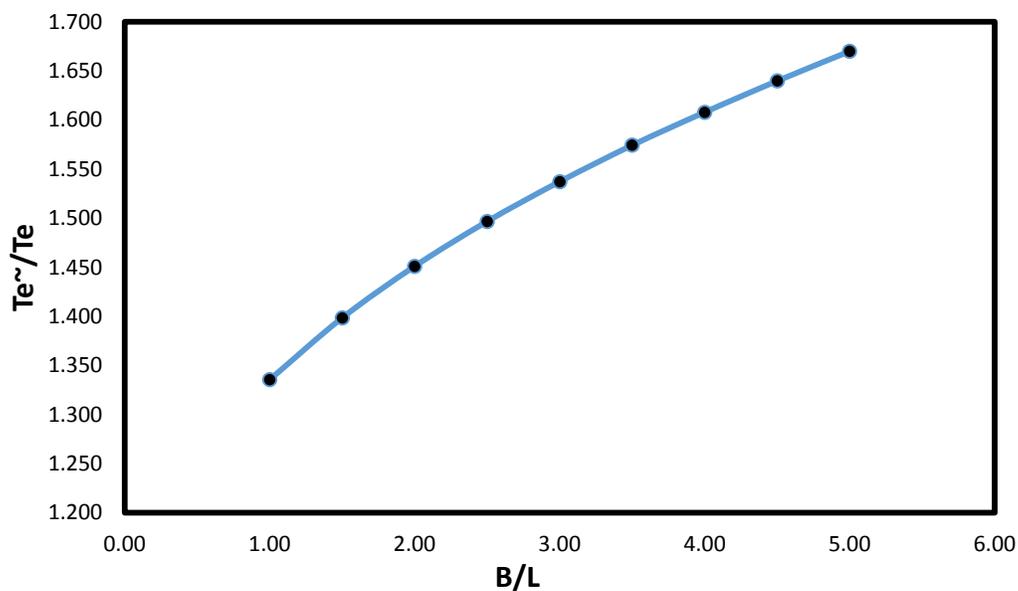
Las dimensiones de la cimentación son fundamentales en el cálculo de los radios equivalentes  $R_h$  y  $R_r$  del análisis. Para verificar el comportamiento del periodo efectivo cambiando, se hizo una variación de relación de dimensiones de la cimentación  $B/L$ ,

pudiendo observar que a menor relación B/L menor va ser el periodo efectivo, ahora a mayor B/L mayor será el periodo efectivo del análisis de interacción suelo-estructura.

Tabla (6), Debido a que esta relación va aumentando los radios equivalentes  $R_h$  y  $R_r$  también lo hacen y de la misma manera las rigideces estáticas  $K_r^o$  y  $K_h^o$ , modificando las funciones de impedancia  $K_h$  y  $K_r$ . por lo tanto entre mayor sea B/L menor será el período efectivo  $T_e \sim /T_e$ . Figura (9).

B/L	$T_e \sim /T_e$
1.00	1.335
1.50	1.398
2.00	1.451
2.50	1.497
3.00	1.537
3.50	1.574
4.00	1.608
4.50	1.640
5.00	1.670

**Tabla 6. Valores del periodo efectivo variando la relación de las dimensiones de la estructura de cimentación B/L.**



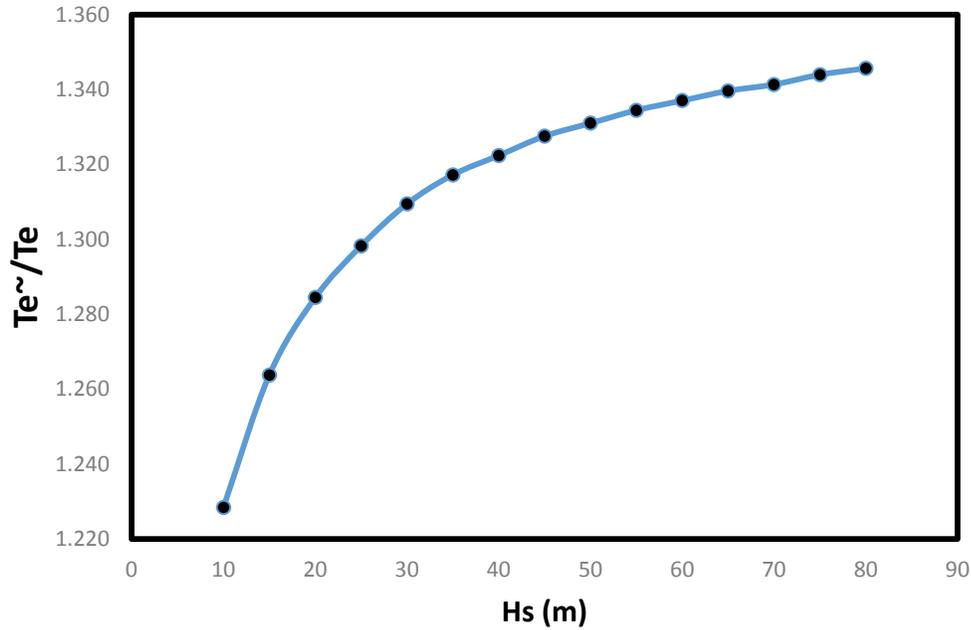
**Figura 9. Gráfica  $T_e \sim /T_e$  vs B/L.**

El espesor de depósito  $H_s$  (m) también es una propiedad del suelo que influye mucho en la determinación de las rigideces estáticas  $K_h^\circ$  y  $K_r^\circ$ . Para observar las variaciones del periodo efectivo se estableció un rango de espesores del depósito, se pueden observar de la tabla (7). A menor espesor  $H_s$  menor será el periodo efectivo y entre más grande sea  $H_s$ , el periodo fundamental estará aumentando, figura (10). Debido a que las funciones de impedancias se verán afectadas directamente por  $H_s$ .

Se puede llegar al análisis, que a menor espesor mayor serán las funciones de impedancias y a mayor espesor del depósito de suelo las funciones de impedancias serán menores.

$H_s$	$T_e \sim / T_e$
10	1.228
15	1.264
20	1.284
25	1.298
30	1.309
35	1.317
40	1.322
45	1.328
50	1.331
55	1.334
60	1.337
65	1.340
70	1.341
75	1.344
80	1.346

**Tabla 7. Valores del periodo efectivo variando el espesor del depósito  $H_s$  (m).**



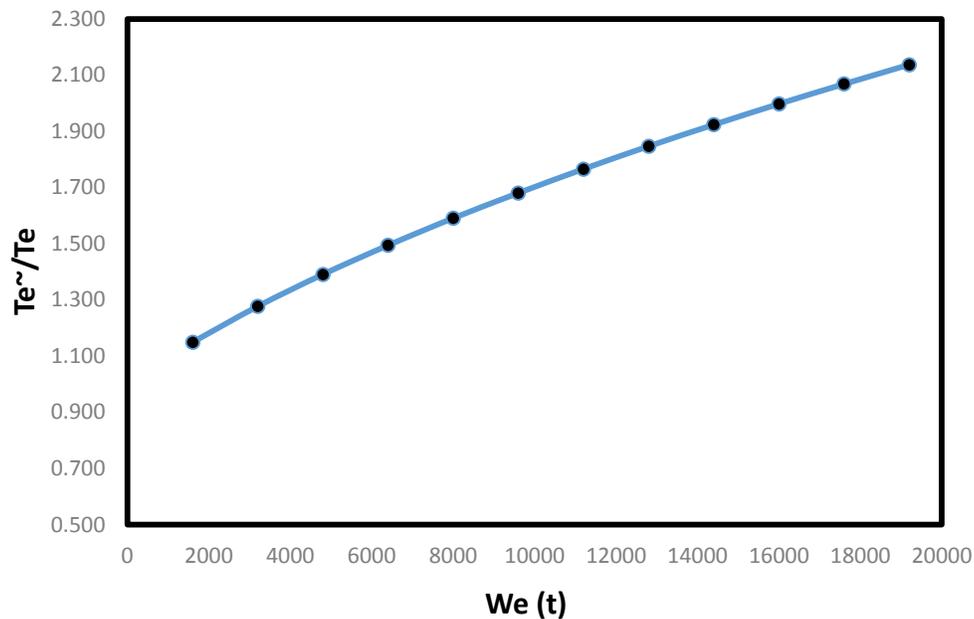
**Figura 10. Gráfica  $T_{e\sim}/T_e$  vs  $H_s$  (m).**

Continuando con el análisis de cada uno de los factores que intervienen, procedemos con el  $W(T)$  de la estructura, al igual que en los anteriores para observar el comportamiento del periodo efectivo a diferentes pesos de la estructura se estableció un rango de  $W(T)$  de 1600 a 12800 toneladas de la tabla (8), se pueden observar los diferentes pesos de la estructura y la variación del periodo efectivo del sistema suelo-estructura. Esta característica del edificio, en el análisis de interacción suelo-estructura afecta directamente con los periodos de vibración  $T_h$  y  $T_r$  del sistema, que a su vez estos periodos intervienen en el cálculo final del período efectivo.

Por lo tanto, de la figura (11) se observa que a menor peso, menor será el período efectivo y a mayor peso, mayor será el período efectivo. Ya que entre más pesos más grandes serán las fuerzas inerciales de la estructura que aplicará al suelo.

W	$T_e \sim / T_e$
1600	1.149
3200	1.277
4800	1.391
6400	1.494
8000	1.591
9600	1.680
11200	1.766
12800	1.847
14400	1.923
16000	1.997

**Tabla 8. Valores del periodo efectivo variando el peso de la estructura W (t).**

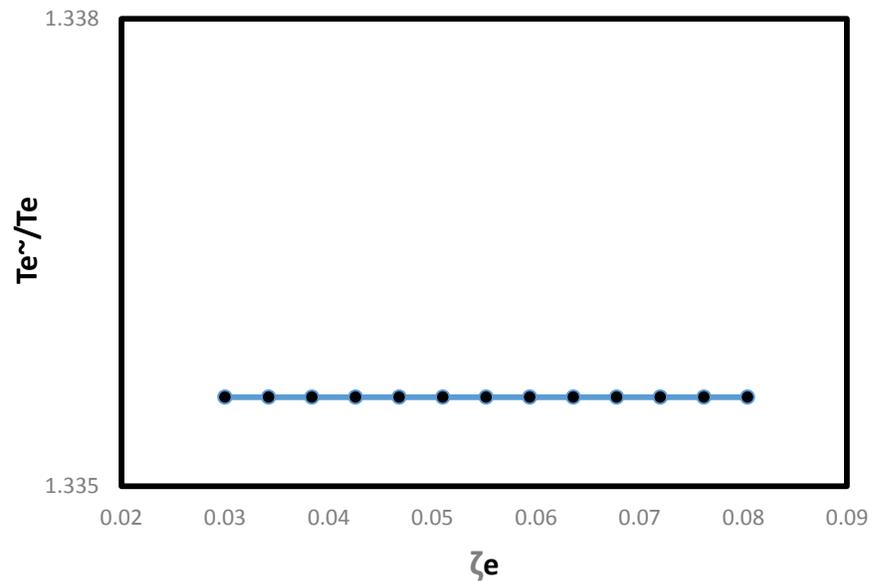


**Figura 11. Gráfica  $T_e \sim / T_e$  vs W (t).**

En el análisis del comportamiento del período efectivo cambiando valores del amortiguamiento de la estructura  $\zeta_e$  como se puede ver en la tabla (9), y en la figura (12). El amortiguamiento a pesar de que va incrementando, no afecta en el período efectivo ya se comporta constante para cada valor del incremento del  $\zeta_e$ .

$\zeta_e$	$T_{e\sim}/T_e$
0.03	1.335
0.0342	1.335
0.0384	1.335
0.0426	1.335
0.0468	1.335
0.051	1.335
0.0552	1.335
0.0594	1.335
0.0636	1.335
0.0678	1.335
0.072	1.335
0.0762	1.335

**Tabla 9. Valores del periodo efectivo variando el amortiguamiento de la estructura  $\zeta_e$ .**



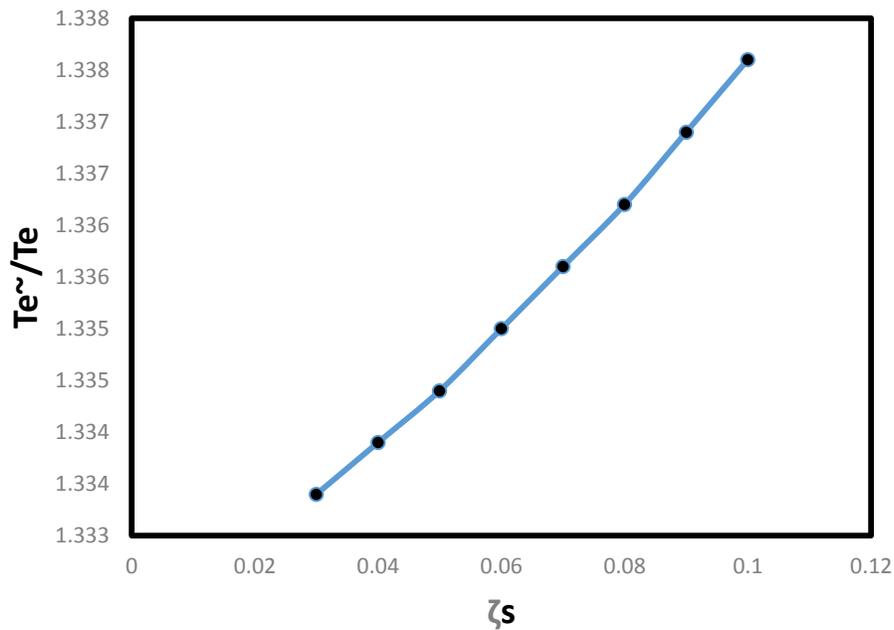
**Figura 12. Gráfica  $T_{e\sim}/T_e$  vs  $\zeta_e$**

Ahora haciendo el análisis cambiando solamente los valores del amortiguamiento del suelo  $\zeta_s$ , se puede observar en la tabla (10), a valores pequeños de  $\zeta_s$ , también el período efectivo será pequeño y si el amortiguamiento del suelo es más grande el período efectivo irá aumentando. Figura (13).

Por lo tanto, si el amortiguamiento crece las funciones de impedancia  $C_h$  y  $C_r$  también aumentan, provocando que  $T_e \sim / T_e$  lo haga de la misma manera y los mismo pasa a la inversa, si  $\zeta_s$  disminuye las funciones de impedancia  $C_h$  y  $C_r$  también lo hacen provocando una disminución en el periodo efectivo de un análisis de interacción suelo estructura.

$\zeta_s$	$T_e \sim / T_e$
0.02	1.333
0.03	1.333
0.04	1.334
0.05	1.334
0.06	1.335
0.07	1.336
0.08	1.336
0.09	1.337
0.1	1.338

**Tabla 10. Valores del periodo efectivo variando el amortiguamiento del suelo  $\zeta_s$ .**

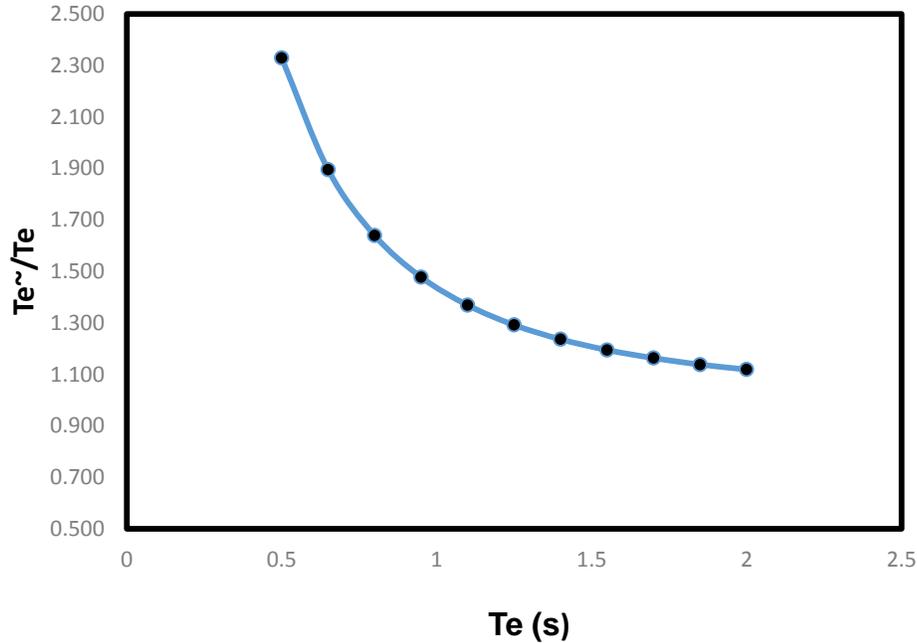


**Figura 13. Gráfica  $T_e \sim / T_e$  vs  $\zeta_s$**

Como ya sea mencionado con antes el periodo fundamental de la estructura  $T_e$ , es importante en el análisis de interacción suelo-estructura. Para observar cómo afecta este al periodo efectivo  $T_e \sim /T_e$  del sistema, se le dieron diferentes valores en un rango de 0.5 a 2.0 segundos como se indican en la tabla (11). Se observa también en la figura (14), que si la estructura tiene un periodo fundamental bajo, el periodo efectivo estará en aumento y si él  $T_e$  va aumentando el periodo efectivo estará disminuyendo, esto quiere decir que el análisis de interacción suelo-estructura hace una modificación en el periodo fundamental en este caso considerando dicha interacción.

$T_e$	$T_e \sim /T_e$
0.5	2.230
0.65	1.895
0.8	1.640
0.95	1.478
1.1	1.334
1.25	1.292
1.4	1.236
1.55	1.195
1.7	1.164
1.85	1.338
2.0	1.119

**Tabla 11. Valores del periodo efectivo variando el periodo fundamental de vibración de la estructura  $T_e$**



**Figura 14. Gráfica  $T_{e\sim}/T_e$  vs  $T_e$  (s).**

Anteriormente se realizó un análisis de los factores que intervienen en la interacción suelo estructura por separado, observando cómo estos influyen en los diferentes valores del periodo efectivo. Para así dejar claro la importancia que tiene cada factor en un análisis de interacción suelo-estructura.

También es importante verificar como es su comportamiento del análisis suelo-estructura cambiando simultáneamente los valores de cada factor de la estructura y del suelo.

El cambio del periodo estructural por interacción dinámica expresión. (29), se presenta en la figura (15). Donde el análisis se hizo simultáneamente entre la  $H$  (m),  $T_e$  (m) y  $V_s$  (m), como se muestra en la tabla (12). Además también conforme íbamos aumentando la altura del edificio, proponíamos una profundidad de desplante a razón de  $H$  (m).

$$\frac{4*H}{V_s*T_e} \quad (29)$$

Se estableció un rango de diferentes niveles de la estructura, por lo que  $H$  (m) está en función de los niveles y  $T_e$  (s) está en función de  $H$  (m). La  $V_s$  se estableció en un rango

de 40 a 175 (m/s) proponiendo para una estructura de menor altura una velocidad menor y conforme aumenta la altura la velocidades se aumentaron, y llegamos a la figura (15).

NIVELES	H	Te	Vs	D(m)	4H/VsTe	Te ~	Te ~/Te
4	12.5	0.4	40	2.083	2.778	0.814	2.035
5	15.5	0.5	45	2.583	2.480	0.907	1.814
6	18.5	0.6	50	3.083	2.242	0.998	1.663
7	21.5	0.7	55	3.583	2.048	1.089	1.556
8	24.5	0.8	60	4.083	1.885	1.179	1.474
9	27.5	0.9	65	4.583	1.746	1.271	1.412
10	30.5	1	70	5.083	1.627	1.363	1.363
11	33.5	1.1	75	5.583	1.523	1.456	1.324
12	36.5	1.2	80	6.083	1.431	1.548	1.290
13	39.5	1.3	85	6.583	1.350	1.641	1.262
14	42.5	1.4	90	7.083	1.278	1.733	1.238
15	45.5	1.5	95	7.583	1.213	1.826	1.217
16	48.5	1.6	100	8.083	1.155	1.919	1.199
17	51.5	1.7	105	8.583	1.102	2.012	1.184
18	54.5	1.8	110	9.083	1.053	2.105	1.169
19	57.5	1.9	115	9.583	1.009	2.198	1.157
20	60.5	2	120	10.083	0.968	2.291	1.146
21	63.5	2.1	125	10.583	0.930	2.385	1.136
22	66.5	2.2	130	11.083	0.896	2.478	1.126
23	69.5	2.3	135	11.583	0.863	2.572	1.118
24	72.5	2.4	140	12.083	0.833	2.666	1.111
25	75.5	2.5	145	12.583	0.805	2.760	1.104
26	78.5	2.6	150	13.083	0.779	2.854	1.098
27	81.5	2.7	155	13.583	0.755	2.949	1.092
28	84.5	2.8	160	14.083	0.732	3.043	1.087
29	87.5	2.9	165	14.583	0.710	3.138	1.082
30	90.5	3	170	15.083	0.690	3.233	1.078

**Tabla 12. Valores del periodo efectivo variando H (m) y Te(s) de la estructura y Vs del suelo.**

Se observa la distribución para el cambio del periodo estructural por interacción dinámica, con una cimentación tipo cajón y para las condiciones de este depósito de suelo.

Por ejemplo:

Si  $H= 10$  m y  $T_e= 1.16$  (s) con la  $V_s= 67.7$  (m/s) para el caso del depósito de suelo donde se desplantará la estructura.

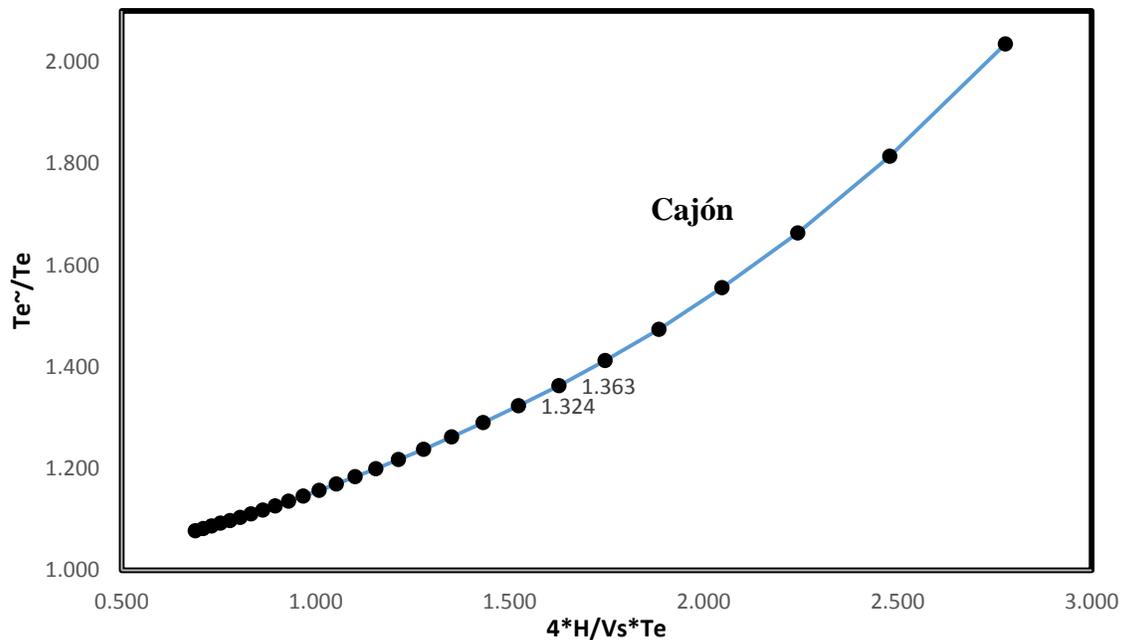
Aplicando la ecuación (29). Tenemos que:

$$\frac{4 * H}{V_s * T_e} = 1.554$$

Entrando en la figura (15) con el valor de  $\frac{4*H}{V_s*T_e}$  podemos obtener el periodo efectivo por análisis de interacción suelo-estructura.  $T_e \sim /T_e$ .

De acuerdo a la gráfica aproximadamente sería 1.33.

Comparando este resultado con el análisis de las iteraciones podemos ver que  $T_e \sim = 1.548$  y si aplicamos  $T_e \sim /T_e = 1.334$ .



**Figura 15. Gráfica  $T_e \sim / T_e$  vs  $[4 * H / V_s * T_e]$ . En la gráfica se señala el intervalo donde se encuentra el valor de  $(4 * H / V_s * T_e) = 1.554$**

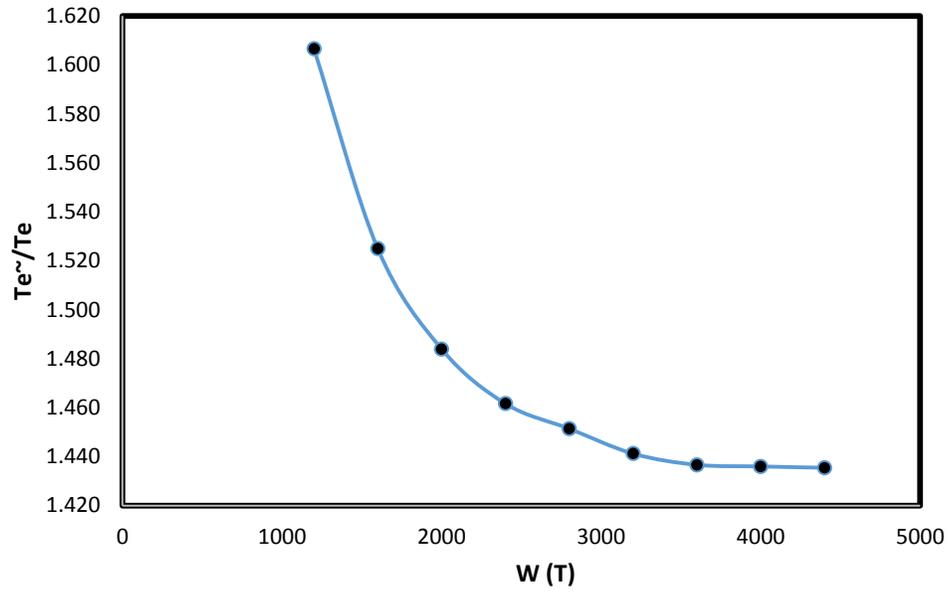
También se realizó un análisis de la variación del periodo efectivo, cambiando simultáneamente, las características de la estructura, H (m), W (T),  $T_e$ (s) y D (m), dejando constantes los valores de las propiedades del suelo. Estos son Factores que intervienen directamente en un análisis de interacción suelo estructura. Tabla (13).

<b>NIVELES</b>	<b>H</b>	<b>W</b>	<b><math>T_e</math></b>	<b>D(m)</b>	<b><math>T_e \sim</math></b>	<b><math>T_e \sim / T_e</math></b>
<b>3</b>	9.5	1200	0.3	1.583	0.482	1.607
<b>4</b>	12.5	1600	0.4	2.083	0.61	1.525
<b>5</b>	15.5	2000	0.5	2.583	0.742	1.484
<b>6</b>	18.5	2400	0.6	3.083	0.877	1.462
<b>7</b>	21.5	2800	0.7	3.583	1.016	1.451
<b>8</b>	24.5	3200	0.8	4.083	1.153	1.441
<b>9</b>	27.5	3600	0.9	4.583	1.293	1.437
<b>10</b>	30.5	4000	1	5.083	1.436	1.436
<b>11</b>	33.5	4400	1.1	5.583	1.579	1.435

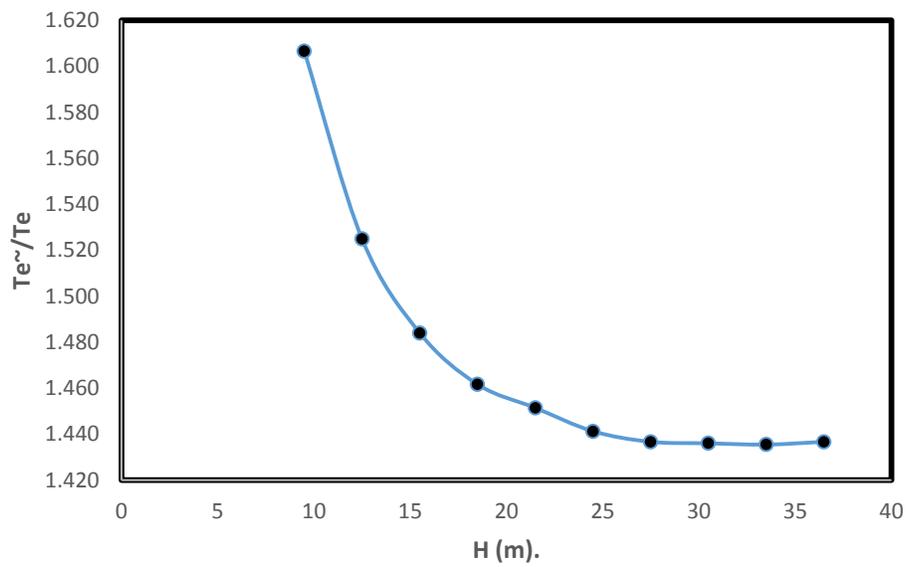
**Tabla 13. Valores del periodo efectivo variando H (m),  $T_e$ (s), D (m) y el W (T) de la estructura.**

A continuación del texto se desglosan las figuras, donde se puede observar la variación del periodo efectivo para cada factor analizado.

En cada una de las gráficas trazadas podemos observar la variación del periodo efectivo y la tendencia de cada una de ellas, comparándolas se observa que son similares para cada factor. Deduciendo que si los valores son chicos de cada uno de los factores el período efectivo será mayor y conforme estos factores vayan aumentando el período efectivo disminuye y tiende hacerse constante en el incremento de cada uno de estos.



**Figura 16. Gráfica  $T_e \sim / T_e$  vs  $W$  (T).**



**Figura 17. Gráfica  $T_e \sim / T_e$  vs  $H$  (m).**

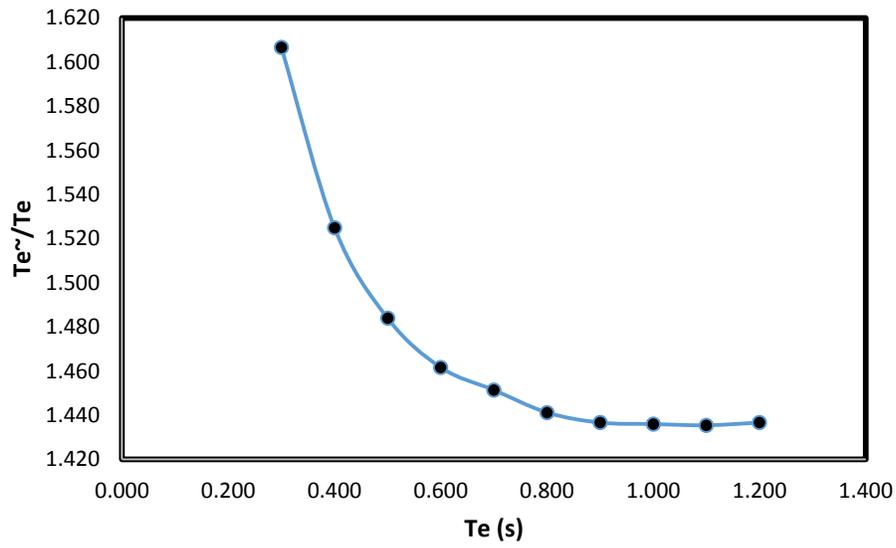


Figura 18. Gráfica  $T_e \sim / T_e$  vs  $T_e$  (s)

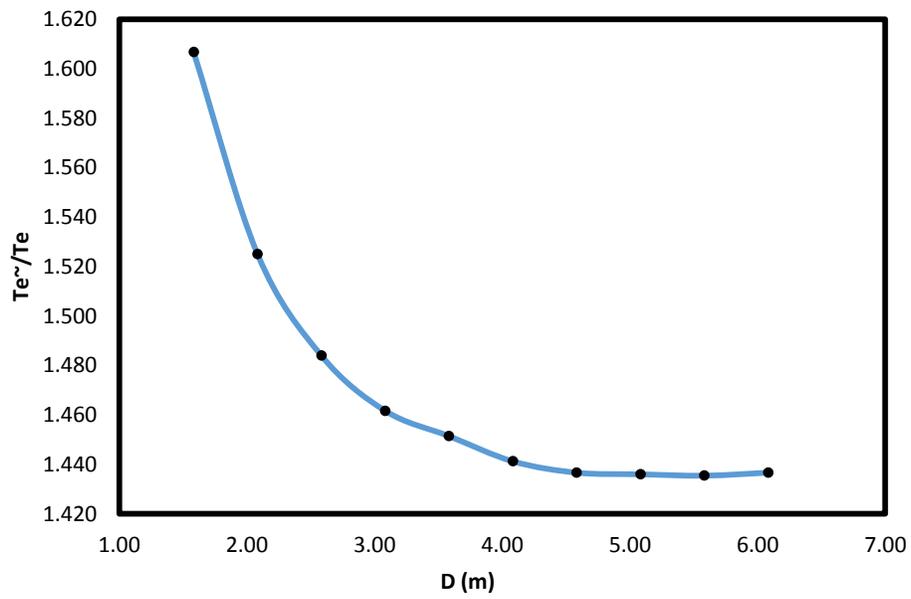


Figura 19. Gráfica  $T_e \sim / T_e$  vs  $D$  (m)

## VIII. CONCLUSIONES

Dentro del campo de la dinámica de suelos, un análisis de interacción suelo-estructura es un punto importante en el ámbito de la ingeniería civil y más en el caso del ingeniero mexicano ya que en el valle de México existen grandes depósitos de suelos blandos de espesores considerables y también no olvidar que estos tipos de suelos son muy susceptibles a las acciones dinámicas.

Por lo tanto, el ingeniero civil mexicano, deberá entender el fenómeno de interacción suelo-cimentación-estructura y su importancia que este fenómeno implica para la excelente realización de un diseño geotécnico y estructural que este requiera.

Además no olvidar que un proyecto de ingeniería deberá cumplir con las cuestiones económicas, de seguridad y funcionalidad. Para poder así decir que este proyecto está cumpliendo o cumplió con todas las expectativas planteadas.

Este trabajo se hace hincapié en el procedimiento de un análisis de interacción suelo-estructura, para poder llegar a conocer el valor del periodo efectivo de dicho sistema. La determinación del período efectivo, siendo el producto del análisis nos ayuda comprender y comparar las propiedades dinámicas iniciales de una estructura sin análisis o realizando un análisis de interacción suelo-estructura. Pudiendo observar que  $T_e < T_{e\sim}$  y así poder decir que el período efectivo como su nombre lo dice es el valor efectivo a considerar para un buen diseño geotécnico y estructural del proyecto.

Los factores que participan en el análisis de interacción suelo-estructura, principalmente son características y/o propiedades de la estructura y del depósito de suelo. De los resultados obtenidos en el análisis realizado podemos decir que aquellos factores que intervienen directamente en la determinación de las funciones de impedancia rigidez y amortiguamiento del sistema ( $K_{h,r}$  y  $C_{h,r}$ ), provocando un aumento o una disminución en el período efectivo, son los más considerables para poder entender que tanto ayudan en el comportamiento de la estructura o también para ubicarlos con un grado de importancia cuando se está realizando un diseño geotécnico y/o estructural, para así poder dar una

solución óptima al problema y además poder proponer dichas soluciones en el proyecto, en el caso de que estos provoquen un comportamiento desfavorable para el sistema suelo-cimentación-estructura.

Hay factores que en el análisis que entre más pequeños sean establecidos, provocan un cambio ascendente en el período efectivo y hay otros factores que entre más grandes sean provocan que los valores del período efectivo del sistema también sufra cambios ascendentes. Por lo tanto, el análisis paramétrico de cada factor es fundamental para poder comprender el grado de importancia de cada uno de ellos en el que provocarían una modificación interesante en el período efectivo debido a los efectos inerciales o cinemáticos que estos puedan ocasionar.

Algo importante por comentar, es el cambio que sufre el dicho período efectivo cuando se hace un análisis cambiando valores simultáneamente de los factores de la estructura, dejando los valores iniciales constantes del suelo. Se puede ver que las condiciones más desfavorables de la estructura con estas características del suelo, son cuando los factores que provocan los efectos inerciales como altura, peso y profundidad de desplante, sean valores pequeños; el sistema va tener un alto grado de amplificación ya que el periodo efectivo es incrementado hasta el 20 % del periodo fundamental de vibración inicial, un ejemplo, sería si  $T_e$  es igual 0.4 s y ahora si tomamos el de nuestro ejemplo donde  $T_e = 1.16$  s y de acuerdo a los resultados del cambio de período efectivo el incremento sería aproximadamente el 65%, por lo tanto, el análisis provocó una modificación importante y con ellos podemos decir que un análisis de interacción suelo-estructura nos ayuda a determinar el período efectivo que a la vez este provoca un cambio en la aceleración espectral, del cual el ingeniero en geotecnia y en estructuras deberá establecer para su diseño.

1

## IX REFERENCIAS

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.

Eduardo Miranda, “Conceptos básicos sobre interacción dinámica suelo-estructura”.

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

Luis E. Pérez-Rocha y Javier Avilés (2003), “Evaluación de efectos de interacción en resistencias inelásticas”. Revista de ingeniería sísmica No 69 45-71, México, D.F.

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

Víctor Manuel Rodríguez Flores y Diego Miramontes de León (2001), “Identificación de amortiguamiento histéretico efectivo de algunos modelos cíclicos en variables generalizadas”.

5ta jornada de investigaciones, Universidad autónoma de Zacatecas, Zacatecas, Zac.

---

<sup>1</sup> Imagen tomada del Manual de Diseño de Obras civiles por sismo, CFE 2008, Comentarios Pág.(131)

<sup>2</sup> Imagen tomada del Manual de Diseño de Obras Civiles por sismo, CFE 1993, Comentarios Pág. (27)