

## INFLUENCIA INTERACCIÓN DINÁMICA SUELO- ESTRUCTURA EN EDIFICIO DE 8 NIVELES CON FUNDACIONES DE PILOTES EN SALTA

Nieva, Alejandro<sup>a</sup>; Albarracín Fernando<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Universidad Nacional de Salta, [alejandronieva1504@gmail.com](mailto:alejandronieva1504@gmail.com)

**Palabras clave:** Interacción dinámica suelo estructura, pilotes, respuesta estructural.

### RESUMEN

En este trabajo se implementa un procedimiento simplificado para incorporar los efectos de la interacción dinámica suelo-estructura (ISE) en el análisis sismorresistente de un edificio de ocho niveles ubicado en la ciudad de Salta, empleando el software Ftool de uso libre y educativo. El estudio aborda la problemática de no considerar la ISE en los análisis sísmicos y propone un enfoque que compara tres modelos: un diseño convencional “rígido”, un modelo estático con coeficiente de balasto y un modelo dinámico basado en formulaciones de expertos como País, Kausel y Gazetas-Dobry. Se analizan parámetros clave del comportamiento estructural, tales como el período fundamental, las solicitaciones internas, las reacciones en fundación y los desplazamientos laterales, evaluando su variación al incorporar la interacción. Los resultados evidencian que la ISE modifica significativamente la respuesta dinámica de la estructura y que su omisión puede conducir a estimaciones poco realistas de la demanda sísmica. Se concluye que la consideración de la ISE resulta esencial para un diseño más seguro en zonas de alta peligrosidad sísmica, como la región de Salta, y se recomienda su incorporación en futuras revisiones del reglamento sismorresistente argentino INPRES-CIRSOC 103.

### ABSTRACT

*This study implements a simplified procedure to incorporate the effects of soil-structure interaction (SSI) in the seismic analysis of an eight-story building located in the city of Salta, using the free and educational Ftool software.*

*The study addresses the problem of not considering ISE in seismic analyses and proposes an approach that compares three models: a conventional “rigid” design,*

*a static model with ballast coefficient, and a dynamic model based on formulations by experts such as País, Kausel, and Gazetas. Key parameters of structural behavior are analyzed, such as the fundamental period, internal stresses, foundation reactions, and lateral displacements, evaluating their variation when interaction is incorporated. The results show that ISE significantly modifies the dynamic response of the structure and that its omission can lead to unrealistic estimates of seismic demand. It is concluded that the consideration of ISE is essential for safer design in areas of high seismic hazard, such as the region of Salta, and its incorporation is recommended in future revisions of the Argentine seismic resistance regulation INPRES-CIRSOC 103.*

## METODOLOGIA

Se analizará un edificio de 8 niveles ubicado en Salta capital, en primer lugar, mediante un análisis convencional, en el cual se modelará el edificio en software Ftool, luego se incorporará el suelo mediante elementos tipo resortes los cuales serán determinados y calculados con el coeficiente de balasto y modificados para el tipo de fundación.

Por último, al mismo edificio se modificarán los elementos de contorno mediante la aplicación de las rigideces dinámicas mediante el método que da la guía de FEMA P-2091 (Agencia Federal para el Manejo de Emergencias – EE.UU) y el NIST (Instituto Nacional de Estándares y Tecnología – EE.UU), estas modificadas por coeficientes para tener en cuenta los demás efectos del sismo en el suelo, como lo es el amortiguamiento por radiación y por histéresis del material.

Se pretende implementar un método simplificado que puede ser aplicado en las estructuras y modelos de análisis realizados por el calculista, teniendo como datos un estudio de suelo, ensayo SPT muy usado en la Ciudad de Salta y un estudio de velocidad de onda de corte, veremos que si no se realiza un ensayo de refracción sísmica para determinar la  $V_s$  se podrá hacer una aplicación de correlación con ensayo SPT es decir con el número de golpes determinar cuál es la velocidad  $V_s$ , sin embargo se recomienda realizar un ensayo para determinar correctamente este parámetro del suelo, para que los resultados sean más correctos.

## INTRODUCCION A LA INTERACCION DINAMICA SUELO-ESTRUCTURA

Desde la década de 1970, la interacción suelo-estructura (ISE) ha despertado un creciente interés en el ámbito de la ingeniería sísmica. Investigadores como Paul C. Jennings (1973) y Meek (1974) fueron pioneros en demostrar cómo la ISE modifica significativamente el período fundamental y el amortiguamiento de las estructuras. En estudios más recientes, Anad et al. (2018) confirman que la respuesta del suelo ante solicitaciones sísmicas influye directamente en el comportamiento dinámico de la superestructura.

La Interacción Dinámica Suelo-Estructura (IDSE) es un fenómeno que surge debido a la deformabilidad del suelo durante una excitación sísmica<sup>1</sup>. A diferencia del supuesto tradicional de base indeformable, la flexibilidad del terreno modifica las propiedades dinámicas de la estructura como su periodo fundamental y amortiguamiento que altera el movimiento sísmico en la zona de la cimentación. Estos efectos pueden manifestarse como incrementos o reducciones significativas en la respuesta estructural, dependiendo de la relación entre los periodos naturales de la estructura y del suelo. Particularmente, cuando el periodo efectivo del sistema suelo-estructura coincide con el periodo dominante del terreno, se produce resonancia, amplificando considerablemente la respuesta estructural<sup>1</sup>.

### *Componentes de la interacción suelo-estructura:*

Para su estudio y aplicación en el diseño, la IDSE se divide en dos componentes principales que, si bien están interrelacionados, suelen analizarse de manera independiente por conveniencia metodológica.

### *Interacción Inercial*

Este efecto resulta de la flexibilidad del suelo y la inercia de la superestructura. Cuando la estructura vibra, las fuerzas inerciales se transmiten a la cimentación y al suelo circundante, generando deformaciones adicionales. Como consecuencia, se produce

Organiza:

un alargamiento del periodo fundamental de vibración, un aumento del amortiguamiento efectivo del sistema y una posible redistribución de las demandas de ductilidad en los elementos estructurales, en comparación con el modelo de base fija. Este fenómeno es gobernado principalmente por el contraste de rigideces entre la estructura y el suelo<sup>1</sup>.

Este efecto se manifiesta a través de tres aspectos principales:

- Alargamiento del periodo de la estructura:

Es el aumento del periodo del edificio por la flexibilización de las fundaciones.

- Amortiguamiento por radiación:

Es la disipación de energía en el sistema suelo-estructura por la generación y propagación de ondas sísmicas que se alejan en la cimentación y depende de la geometría<sup>2</sup>.

- Amortiguamiento del material suelo:

Es el amortiguamiento del tipo histerético del material en este caso el suelo, depende del tipo de suelo, este es el amortiguamiento que tienen las partículas internas por su fricción el concepto es similar al amortiguamiento de la estructura<sup>2</sup>.

### *Interacción cinemática*

La interacción cinemática se origina porque la cimentación, al ser rígida, no puede seguir perfectamente las deformaciones del suelo bajo el movimiento sísmico de campo libre (el movimiento que existiría en ausencia de la estructura). Esto genera un fenómeno de difracción de ondas que altera el movimiento en la base de la cimentación<sup>3</sup>. Para cimentaciones enterradas o pilotes, este efecto puede traducirse en:

- Una reducción de las componentes de traslación de alta frecuencia es decir funciona como filtro de frecuencias.
- La generación de componentes de rotación (cabeceo y torsión) en la base, aun cuando el movimiento de campo libre carezca de ellas.

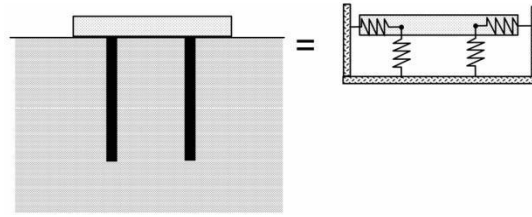
La importancia de este efecto depende de la geometría de la cimentación, la estratigrafía del sitio y las características de la excitación sísmica<sup>4</sup>.

El presente trabajo se centra en evaluar los efectos de la interacción inercial en un sistema de pilotes, utilizando metodologías basadas en funciones de impedancia dinámica propuestas por Novak, Dobry, Gazetas, Pais and Kausel para modelar la rigidez y el amortiguamiento efectivos del suelo. El análisis de la interacción cinemática queda fuera del alcance de este estudio, alineándose con las prácticas simplificadas de diseño que priorizan los efectos inerciales.

## **MODELO FISICO DE INTERACCION DINÁMICA SUELO-ESTRUCTURA**

En este trabajo analizarán modelos de pilotes verticales en los modos de vibración traslacional y vertical utilizando soluciones elásticas-dinámicas.

Los resortes y amortiguadores reemplazan eficazmente a un pilote individual en la modelación numérica de una cimentación apoyada en pilotes<sup>4</sup>.



“Figura 1. Equivalencia del modelo utilizado en este trabajo, Fuente: (4)”

La rigidez dinámica de un pilote puede representarse mediante el producto de la rigidez estática y un modificador dinámico<sup>4</sup>

$$k_i = K_i * \alpha \quad (1)$$

Donde:

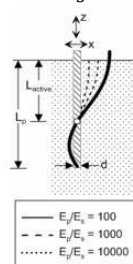
$$K_i = \chi_i * E_s * d \quad (2)$$

$$\chi_i = (w_{pi} + w_{si} + w_{bi}) * f(E_p/E_s, L_p/d) \quad (3)$$

$$\alpha_i = f\left(\frac{E_p}{E_s}, \frac{\rho_p}{\rho_s}, w_{si}, \mu, a_{op}\right) \quad (4)$$

En la ecuación 2  $\chi_i$  es una constante adimensional para el modo de vibración i, d es el diámetro del pilote;  $E_s$  y  $E_p$  es el módulo de elasticidad del suelo y el pilote respectivamente;  $\rho_s$  y  $\rho_p$  son las densidades del suelo y del material del pilote en nuestro caso el hormigón armado;  $\mu$  es el coeficiente de Poisson; los  $w_{pi}$ ,  $w_{si}$ ,  $w_{bi}$  representan factores de peso, que juntos suman la unidad para la contribución a la rigidez del pilote, el suelo y la punta del pilote respectivamente para el modo de vibración j.

$$a_{op} = \frac{\omega * d}{V_s} \quad (4)$$



“Figura 2. Longitud activa del pilote en función de la relación de  $E_p/E_s$ , fuente:(4)”

w: frecuencia de la excitación.

Se debe tener en cuenta que la respuesta a carga lateral del pilote es que si es de gran longitud no se desvía en todo su largo, sino que lo hace hasta cierta profundidad llamada longitud activa del pilote<sup>4</sup>.

La longitud activa del pilote dice la NIST que puede ser entre 10 a 20 veces el diámetro del pilote dependiendo de la diferencia de rigidez que exista entre el suelo y el pilote, también influye la no homogeneidad del estrato, y las condiciones de contorno del pilote<sup>4</sup>. Como se encuentra sujeta en su cabeza, en este proyecto los pilotes individuales se encuentran con un “cabezal” que serían las vigas de fundación de 1,5

Organiza:

m de alto.

Consideraciones:

Si los pilotes tienen la siguiente relación:  $L_P > L_{activa}$  se comportan como viga infinitamente larga y la longitud real no afecta la respuesta a la flexión. La longitud activa tiene la siguiente expresión:

$$L_{activa} = A * \left(\frac{E_p}{E_s}\right)^\mu * d \quad (5)$$

A y  $\mu$  son constantes adimensionales

La Tabla 2-4a presenta las ecuaciones para la rigidez estática de pilotes individuales. Estas ecuaciones permiten calcular:

- Parámetros adimensionales:

$\chi_i$ : representan la participación relativa de cada modo de vibración.  $i = x$  para lateral,  $i = z$  para vertical.

Como para calcular  $\chi_i$  se necesitan parámetros adimensionales que dependen de la relación entre las propiedades del pilote y el suelo los cuales son los siguientes:

Para la vibración lateral:

$\delta_x$ : módulo adimensional de reacción de la subrasante.

Relación con  $E_p/E_s$ : módulo de elasticidad del pilote sobre el del suelo.

Para vibración vertical:

$\Omega$  y  $\lambda L_p$ : también relacionados con  $E_p/E_s$ .  $\delta_z$ :

Módulo vertical equivalente.

A continuación, la tabla 2.4b la misma contiene las expresiones que tienen en cuenta la rigidez dinámica y amortiguamiento.

- Modificadores de rigidez dinámica  $\alpha_{pi}$ : Ajustan la rigidez estática para considerar efectos dinámicos.

- Coeficiente de amortiguamientos:  $\beta_{pi}$ : el mismo incluye tres componentes:

1. Amortiguamiento del material del pilote  $\beta_p$
2. Amortiguamiento del suelo  $\beta_s$
3. Amortiguamiento por radiación  $\beta_{ri}$  energía disipada hacia el suelo.

| Tabla 2-4a Ecuaciones para la rigidez estática de pilotes individuales |                                                                                    |                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Grado de libertad                                                      | Modificadores de rigidez en la superficie                                          | Referencia                                                             |
| Traslación a lo largo del eje x                                        | $\chi_x = \frac{1}{2} \pi^{1/4} \delta_x^{1/4} \left(\frac{E_p}{E_s}\right)^{1/4}$ | Poulos and Davis (1980)<br>Scott (1981, Mylonakis (1995)               |
|                                                                        | $\delta_x = 2 \left(\frac{E_p}{E_s}\right)^{-3/40}$                                | Dobry et al. (1982)<br>Syngros (2004)                                  |
|                                                                        | $w_{ps} = 1/4$                                                                     | Dobry et al. (1982)<br>Mylonakis (1995)<br>Mylonakis and Roubas (2001) |
|                                                                        | $w_{ps} = 3/4$ } Pilote largo ( $L_p / d > L_{activa}$ )<br>$w_{hs} = 0$           |                                                                        |

Organiza:

Traslación a lo largo del eje z

$$\chi_i = \left( \frac{\pi \delta_i}{2} \right)^{1/2} \left( \frac{E_p}{E_s} \right)^{1/2} \frac{\Omega + \tanh(\lambda L_p)}{1 + \Omega \tanh(\lambda L_p)}$$

$$\Omega = \frac{2}{(\sqrt{\pi \delta_i})(1 - \nu^2)} \left( \frac{E_p}{E_s} \right)^{-1/2}$$

$$\lambda L_p = \left( \frac{4 \delta_i}{\pi} \right)^{1/2} \left( \frac{E_p}{E_s} \right)^{-1/2} \left( \frac{L_p}{d} \right)$$

$$\delta_i = 0.6 : (L_p/d > 10, E_p/E_s > 100)$$

$$w_{ps} = 1 - (w_u + w_{us})$$

$$w_{us} = \frac{-2 \left[ (\lambda L_p)(\Omega^2 - 1) + \Omega \right] + 2\Omega \cosh(2\lambda L_p) + (1 + \Omega^2) \sinh(2\lambda L_p)}{4 \cosh^2(\lambda L_p) [\Omega + \tanh(\lambda L_p)] [1 + \Omega \tanh(\lambda L_p)]}$$

$$w_{us} = \frac{2\Omega}{2\Omega \cosh(\lambda L_p) (1 + \Omega^2) \sinh(\lambda L_p)}$$

Randolph and Wroth (1978)  
Scott (1981)

Mylonakis and Gazetas (1998),  
Randolph (2003), Salgado (2008)

Blaney et al. (1975)  
Roesset (1980)  
Thomas (1980)

“Tabla 1. Ecuaciones para la rigidez estática de pilotes individuales. tabla 2.4a, fuente: (4)

| Grado de Libertad               | Modificador de Rigidez Estática                                                                                                                           | Referencia                                         |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Traslación a lo largo del eje x | $\alpha_x^r = 1 - \frac{3\pi}{32\delta_x} \left( \frac{\rho_p}{1 + \nu} \right) (a_x^r)^2$                                                                | Mylonakis and Roubas (2001)                        |
| Traslación a lo largo del eje z | $\alpha_z^r = 1 - w_{us} \left[ \left( \frac{\pi}{8\delta_z} \right) \left( \frac{\rho_p}{1 + \nu} \right) (a_z^r)^2 - \frac{1}{2} (a_z^r)^{1/2} \right]$ | Mylonakis (2011)                                   |
| Grado de Libertad               | Razón de Amortiguamiento                                                                                                                                  | Referencia                                         |
| Traslación a lo largo del eje x | $\beta_x^r = \frac{1}{4} \beta_p + \frac{3}{4} \beta_s + \frac{3}{4} \beta_{ps}$                                                                          | Dobry et al. (1982)<br>Mylonakis and Roubas (2001) |
|                                 | $\beta_{ps} = \left[ \frac{3}{2\pi \delta_x (1 + \nu) \delta_x} \right] (a_x^r)^{1/4}$                                                                    | Gazetas and Dobry (1984a,b)                        |
| Traslación a lo largo del eje z | $\beta_z^r = w_{us} \beta_p + (w_{us} + w_{ps}) \beta_s + \beta_{ps}$                                                                                     | Mylonakis (2011)                                   |
|                                 | $\beta_{ps} = \frac{1}{\alpha_z^r} \left[ w_{us} \frac{1.2\pi}{4(1 + \nu) \delta_z} (a_z^r)^{1/4} + w_{ps} 0.2 a_z^r \right]$                             | Gazetas and Dobry (1984b)                          |

“Tabla 2. expresiones que tienen en cuenta la rigidez dinámica y amortiguamiento. Tabla 2.4b, fuente: (4)

## CÁLCULO CONVENCIONAL (BASE RIGIDA)

El edificio presenta una altura de 27,8 m totales y 19.500 m2 a construir, su sistema estructural es de hormigón armado conformado por pórticos y tabiques en la caja de ascensores.

| ELEMENTOS        | DIMENSIONES       |
|------------------|-------------------|
| Vigas de H°A°    | 0,30X0,55 m       |
| Columnas de H°A° | 0,60x1,60 m       |
| Losas de H°A°    | e=20 cm           |
| Tabiques de H°A° | Lw=2,5 m- e=20 cm |

“Tabla 3. Dimensiones de los elementos estructurales”

Del análisis de carga y rigidez, se aplica el método modal espectral obteniendo los periodos, esfuerzos de cortes, modos de vibrar de la estructura y reacciones en la base o cabeza de los pilotes, posteriormente se distribuye el corte del nivel en cada plano sismorresistente.

Los cálculos de las acciones sísmica se detallan a continuación:

Matriz de masas:

$$M := \begin{bmatrix} 3.46 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.46 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3.46 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.46 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3.46 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.01 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.61 \end{bmatrix} \frac{\text{ton} \cdot \text{seg}^2}{\text{cm}}$$

Organiza:

Rigidez de cada nivel:

Matriz de rigideces:

$$K := \begin{bmatrix} 0 \\ 10092.79603 \\ 8234.335 \\ 7595.485 \\ 7256.21 \\ 7046.0403 \\ 6496.85 \\ 6408.005 \\ 6342.186 \end{bmatrix} \quad \frac{kN}{cm}$$

$$K = \begin{bmatrix} 18327.131 & -8234.335 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -8234.335 & 15829.82 & -7595.485 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -7595.485 & 14851.695 & -7256.21 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -7256.21 & 14302.25 & -7046.04 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -7046.04 & 13542.89 & -6496.85 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -6496.85 & 12904.855 & -6408.005 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -6408.005 & 12750.191 & -6342.186 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -6342.186 & 6342.186 & 0 \end{bmatrix}$$

Determinación de frecuencias angulares:

$$DET([K] - \lambda \cdot [M]) = 0$$

Polinomio característico:

$$\det(K - \lambda \cdot M) = 0 \rightarrow 16218.873520300669994 \cdot \lambda^8 - 526986661.36314779739 \cdot \lambda^7 + 69245006 \dots$$

Raíces del Polinomio característico:

$$\lambda_i := \det(K - \lambda \cdot M) = 0 \xrightarrow{\text{solve}} \begin{bmatrix} 81.371415721053892036 \\ 640.36875081836290581 \\ 1709.5423460453640772 \\ 3161.446533381669912 \\ 4690.7097146674886895 \\ 6310.8644999057500384 \\ 7545.6660250259010316 \\ 8352.2170986203792272 \end{bmatrix}$$

Frecuencias naturales en dirección y-y del sistema estructural:

$$w_i := \sqrt{\lambda_i} = \begin{bmatrix} 9.021 \\ 25.306 \\ 41.347 \\ 56.227 \\ 68.489 \\ 79.441 \\ 86.866 \\ 91.39 \end{bmatrix}$$

Determinación de periodos Estructurales:

$$T_i := \frac{2 \cdot \pi}{w_i} = \begin{bmatrix} 0.69654 \\ 0.24829 \\ 0.15196 \\ 0.11175 \\ 0.09174 \\ 0.07909 \\ 0.07233 \\ 0.06875 \end{bmatrix}$$

Determinación de las fuerzas sísmicas:

Organiza:

$$([K] - \lambda \cdot [M]) \cdot [\phi_i] = 0$$

$$[\phi_i] = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \\ \phi_5 \\ \phi_6 \\ \phi_7 \\ \phi_8 \end{bmatrix}$$

Desarrollando la ecuación se obtiene:

$$\lambda := \lambda_i = 81.371$$

Sistemas de ecuaciones que se deben resolver

$$(K - \lambda \cdot M) \cdot \begin{bmatrix} \phi_{11} \\ \phi_{21} \\ \phi_{31} \\ \phi_{41} \\ \phi_{51} \\ \phi_{61} \\ \phi_{71} \\ \phi_{81} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} -8234.335 \cdot \phi_{21} + 18045.58593160515053 \cdot \phi_{11} \\ -7595.485 \cdot \phi_{31} + (15548.27490160515353 \cdot \phi_{21} - 8234.335 \cdot \phi_{11}) \\ -7256.21 \cdot \phi_{41} + (14570.14990160515353 \cdot \phi_{31} - 7595.485 \cdot \phi_{21}) \\ -7046.0403 \cdot \phi_{51} + (14020.70520160515353 \cdot \phi_{41} - 7256.21 \cdot \phi_{31}) \\ -6496.85 \cdot \phi_{61} + (13261.34520160515353 \cdot \phi_{51} - 7046.0403 \cdot \phi_{41}) \\ -6408.005 \cdot \phi_{71} + (12659.927038679627782 \cdot \phi_{61} - 6496.85 \cdot \phi_{51}) \\ -6342.186 \cdot \phi_{81} + (12505.263038679626782 \cdot \phi_{71} - 6408.005 \cdot \phi_{61}) \\ 6048.4351892469954463 \cdot \phi_{81} - 6342.186 \cdot \phi_{71} \end{bmatrix}$$

Desarrollando las ecuaciones:

$$\phi_{11} := 1$$

$$\phi_{21} := -8234.335 \cdot \phi_{21} + 18045.58593160515053 \cdot \phi_{11} = 0 \xrightarrow{\text{solve}} 2.1915049523252515874$$

$$\phi_1 := \begin{bmatrix} \phi_{11} \\ \phi_{21} \\ \phi_{31} \\ \phi_{41} \\ \phi_{51} \\ \phi_{61} \\ \phi_{71} \\ \phi_{81} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 2.192 \\ 3.402 \\ 4.537 \\ 5.525 \\ 6.356 \\ 6.957 \\ 7.295 \end{bmatrix}$$

$$\phi := \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \phi_{13} & \phi_{14} & \phi_{15} & \phi_{16} & \phi_{17} & \phi_{18} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \phi_{23} & \phi_{24} & \phi_{25} & \phi_{26} & \phi_{27} & \phi_{28} \\ \phi_{31} & \phi_{32} & \phi_{33} & \phi_{34} & \phi_{35} & \phi_{36} & \phi_{37} & \phi_{38} \\ \phi_{41} & \phi_{42} & \phi_{43} & \phi_{44} & \phi_{45} & \phi_{46} & \phi_{47} & \phi_{48} \\ \phi_{51} & \phi_{52} & \phi_{53} & \phi_{54} & \phi_{55} & \phi_{56} & \phi_{57} & \phi_{58} \\ \phi_{61} & \phi_{62} & \phi_{63} & \phi_{64} & \phi_{65} & \phi_{66} & \phi_{67} & \phi_{68} \\ \phi_{71} & \phi_{72} & \phi_{73} & \phi_{74} & \phi_{75} & \phi_{76} & \phi_{77} & \phi_{78} \\ \phi_{81} & \phi_{82} & \phi_{83} & \phi_{84} & \phi_{85} & \phi_{86} & \phi_{87} & \phi_{88} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2.192 & 1.957 & 1.507 & 0.897 & 0.255 & -0.426 & -0.945 & -1.284 \\ 3.402 & 2.423 & 0.884 & -0.506 & -1.098 & -0.747 & 0.195 & 1.125 \\ 4.537 & 2.171 & -0.49 & -1.212 & -0.058 & 1.165 & 0.687 & -0.834 \\ 5.525 & 1.229 & -1.493 & -0.057 & 1.146 & -0.476 & -1.352 & 0.569 \\ 6.356 & -0.212 & -1.222 & 1.292 & -0.411 & -0.656 & 1.869 & -0.44 \\ 6.957 & -1.609 & 0.034 & 0.741 & -1.084 & 1.106 & -1.49 & 0.263 \\ 7.295 & -2.531 & 1.275 & -0.927 & 0.649 & -0.427 & 0.452 & -0.07 \end{bmatrix}$$

Obteniendo la matriz modal, se procede a calcular las fuerzas sísmicas.

$$[F_{sismica}] = [M] \cdot g \cdot [\phi] \cdot [L_j] \cdot [S_a]$$

$$F_{sismica} := M \cdot \phi \cdot L_j \cdot S_a = \begin{bmatrix} 120.778 & 119.251 & 121.564 & 86.114 & 64.143 & 46.605 & 19.702 & 31.745 \\ 264.686 & 233.329 & 183.241 & 77.269 & 16.337 & -19.857 & -18.617 & -40.755 \\ 410.887 & 288.938 & 107.406 & -43.599 & -70.398 & -34.824 & 3.833 & 35.708 \\ 547.98 & 258.92 & -59.529 & -104.394 & -3.73 & 54.303 & 13.541 & -26.466 \\ 667.267 & 146.587 & -181.47 & -4.936 & 73.518 & -22.196 & -26.636 & 18.053 \\ 666.982 & -21.922 & -129.014 & 96.643 & -22.901 & -26.552 & 31.996 & -12.134 \\ 729.971 & -166.672 & 3.626 & 55.458 & -60.418 & 44.788 & -25.509 & 7.266 \\ 918.506 & -314.722 & 161.641 & -83.238 & 43.415 & -20.734 & 9.29 & -2.323 \end{bmatrix} \text{ kN}$$

Fuerzas sísmicas máximas probables:

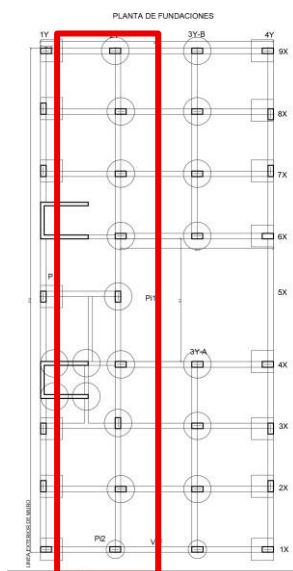
Organiza:

$$Fmáx = \begin{bmatrix} 242.248 \\ 408.311 \\ 522.693 \\ 620.975 \\ 711.774 \\ 688.281 \\ 755.04 \\ 989.023 \end{bmatrix} \text{ kN}$$

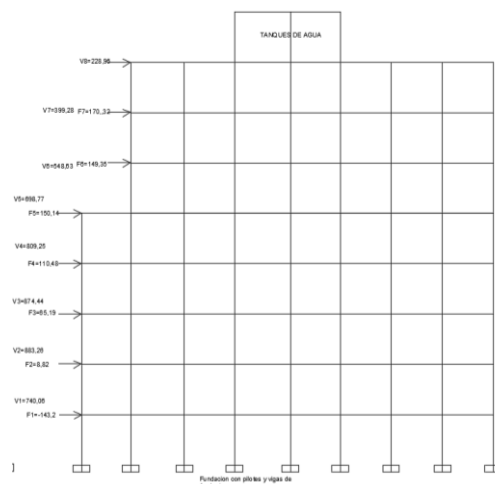
Cortes por nivel:

$$Vmaxy := \begin{bmatrix} Fmáx_0 + Fmáx_5 + Fmáx_7 + Fmáx_6 + Fmáx_4 + Fmáx_3 + Fmáx_2 + Fmáx_1 \\ Fmáx_5 + Fmáx_7 + Fmáx_6 + Fmáx_4 + Fmáx_3 + Fmáx_2 + Fmáx_1 \\ Fmáx_5 + Fmáx_7 + Fmáx_6 + Fmáx_4 + Fmáx_3 + Fmáx_2 \\ Fmáx_5 + Fmáx_7 + Fmáx_6 + Fmáx_4 + Fmáx_3 \\ Fmáx_5 + Fmáx_7 + Fmáx_6 + Fmáx_4 \\ Fmáx_5 + Fmáx_7 + Fmáx_6 \\ Fmáx_7 + Fmáx_6 \\ Fmáx_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4938.345 \\ 4696.0973 \\ 4287.7864 \\ 3765.0933 \\ 3144.1182 \\ 2432.3444 \\ 1744.0633 \\ 989.0228 \end{bmatrix} \text{ kN}$$

Obtenido vector de esfuerzo de corte se distribuye por nivel en cada plano sismorresistente para lograr aplicar al plano 2-y las acciones y poder modelar la estructura en el FTOOL y así obtener las reacciones en la base.



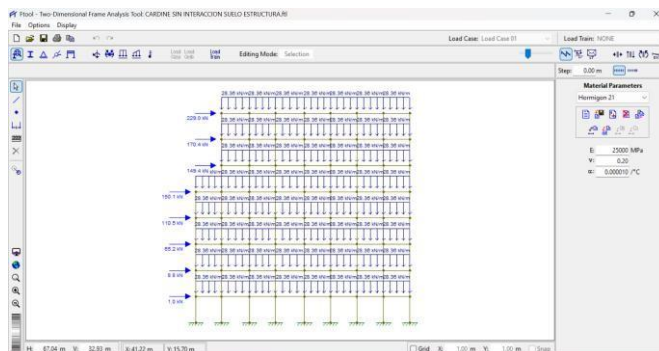
“Figura 3. Planta de fundaciones plano de estudio en rojo”



Organiza:

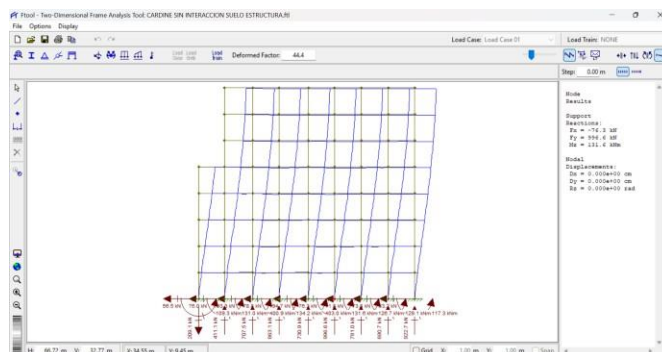
“Figura 4. Plano sismorresistente 2-Y”

Modelamos la estructura y calculamos los desplazamientos, reacciones en la cabeza de los pilotes, considerando la base empotrada en programa Ftool<sup>6</sup>

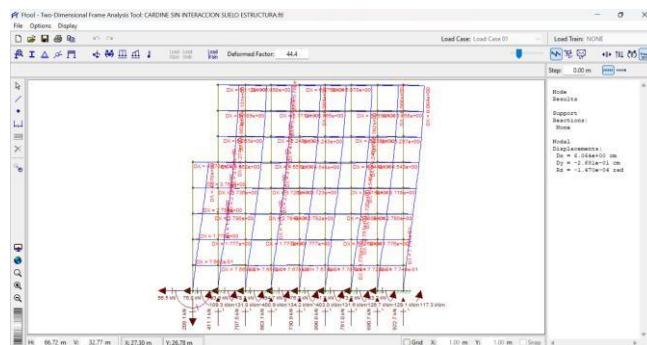


“Figura 5. Modelo del plano sismorresistente en Ftool”

Desplazamientos laterales del modelado:

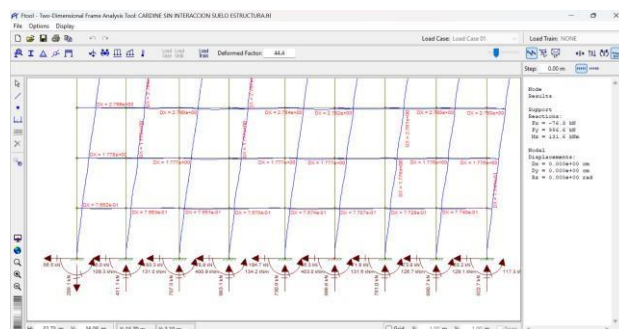


“Figura 6. Desplazamientos laterales del plano configuración”

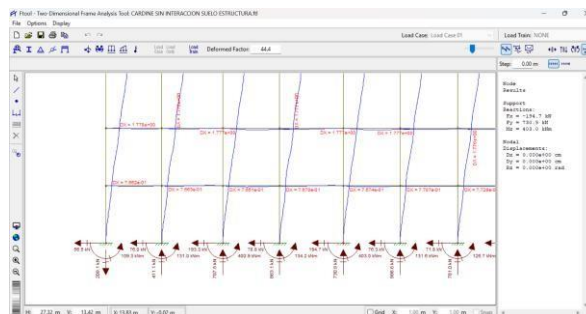


“Figura 7. Desplazamiento máximo de 6cm sin degradación de rigidez”

Determinación de las reacciones en la base:



“Figura 8. Reacciones en la cabeza de los pilotes”



“Figura 9. Reacciones Horizontales en cabeza de pilotes”

Tabla resumen de resultados con base rígida (Sin ISE):

| Pilotes | Reaccion es Pilote sin ISE rígido |        |          |
|---------|-----------------------------------|--------|----------|
|         | Fx[kN]                            | Fy[kN] | Mx[kN*m] |
| 1       | 56,5                              | 209,1  | 109,3    |
| 2       | 76,0                              | 411,1  | 131,0    |
| 3       | 193,3                             | 707,5  | 400,9    |
| 4       | 78,8                              | 863,1  | 134,2    |
| 5       | 194,7                             | 996,6  | 403,0    |
| 6       | 76,3                              | 996,6  | 131,6    |
| 7       | 71,8                              | 781,0  | 126,7    |
| 8       | 73,8                              | 690,7  | 129,1    |
| 9       | 63,2                              | 922,7  | 117,3    |

“Tabla 4. Reacciones en los pilotes sin ISE”

| Niveles | $\delta x [cm]$ |
|---------|-----------------|
| 1       | 0,774           |
| 2       | 1,776           |
| 3       | 2,780           |
| 4       | 3,718           |
| 5       | 4,543           |
| 6       | 5,237           |
| 7       | 5,758           |
| 8       | 6,06400         |

“Tabla 5. Desplazamiento por nivel sin ISE”

## CÁLCULO CON INTERACCIÓN ESTÁTICA SUELO-ESTRUCTURA

Caracterización del suelo:

Generalmente los estudios de suelos realizados en la ciudad de Salta nos brindan datos como los pesos específicos del suelo, límites líquidos, plásticos, clasificación con SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) y parámetros resistentes como son el ángulo de fricción interna y la cohesión del suelo, junto con esto una recomendación de fundaciones en función de una tensión admisible, muchas veces calculada a través del ensayo SPT, sin tener en cuenta la superestructura que se tiene y la interacción entre las fundaciones y ese suelo, por lo que se debe tener bien en claro que para el cálculo de fundaciones tanto superficiales como profundas.

En las fundaciones profundas también se debe tener en cuenta que la capacidad de carga calculada con estos mecanismos necesita demasiado desplazamiento para que se desarrollen las resistencias por punta y por fricción lo que generalmente es inadmisibles para la superestructura.

Para la caracterización del suelo se utilizaron correlaciones con el ensayo SPT debido a que es el más utilizado en la ciudad de Salta.

Las gráficas están calculadas para suelos que varían entre 16 a 21 kN/m<sup>3</sup> de pesos específicos y coeficientes de Poisson entre 0,2 a 0,5 por lo que son de gran utilidad

Organiza:

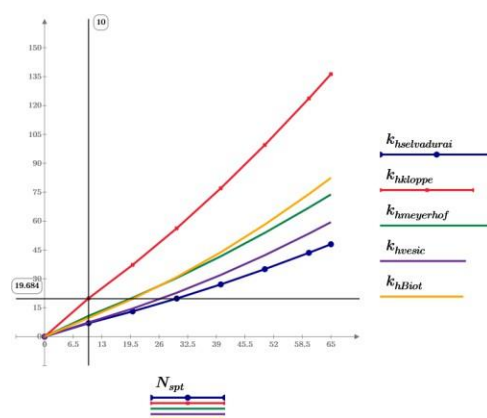
para los ingenieros calculistas para realizar una primera aproximación de interacción de sus estructuras.

Para utilizar dichas graficas el proyectista debe entrar con el ensayo SPT corregido para el 60% de energía.

*Cálculos de los coeficientes de balasto horizontales para suelos cohesivos:*

$$k_{v1} = 1.20 \cdot \frac{E_s}{B}$$

Utilizando las correlaciones anteriores se puede determinar los coeficientes de balasto verticales y horizontales, estas correlaciones son de las más importantes debido a que es casi imposible realizar a cada metro de la profundidad del pilote un ensayo de plato de carga, por lo que estas graficas son útiles para los proyectistas.



*” Figura 10. para determinar el valor de (kh1) para suelos cohesivos, Fuente: Elaboración propia”*

Como se observan son entornos de variaciones por lo que utilizarlas no genera un valor único del suelo, sino que una probabilidad de que el valor esté en este entorno.

*Modulo de balasto vertical para suelos gruesos:*

Se sabe que el coeficiente de balasto vertical para suelos granulares es:

$$k_{v1} = 0.55 \cdot \frac{E_s}{B}$$

Se obtiene de las experiencias de Mayne:

$$E_s := 30.7 \cdot \frac{MPa}{m} \cdot N_{60}^{0.66} \cdot \left( 1 - \left( \frac{1}{FS} \right)^{0.15 + 0.004 \cdot N_{60}} \right) = 58.416 \frac{MN}{m^3}$$

Reemplazando en la ecuación de kv1 se obtiene:

$$k_{v1} := 56.3 \frac{MN}{m^3} \cdot N_{60}^{0.66} \cdot \left( 1 - \left( \frac{1}{FS} \right)^{0.15 + 0.004 \cdot N_{60}} \right) = 107.127 \frac{MN}{m^3}$$

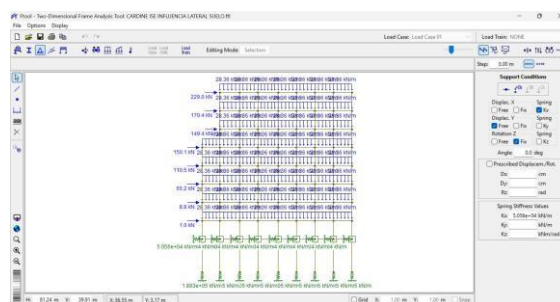
$$d_{pilote} := 1.5 \text{ m} \quad k_v := k_{v1} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_{pilote}^2 = 189308.773 \frac{kN}{m}$$

Es el valor de la constante del resorte usado en este proyecto.

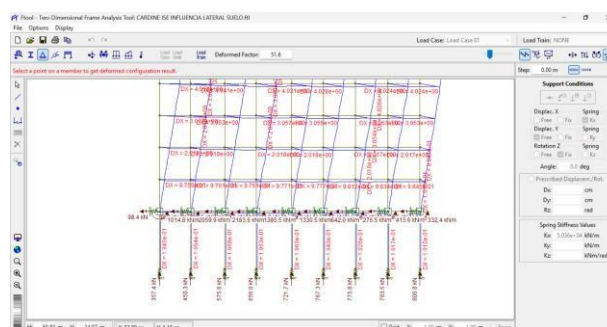
Organiza:

Estos coeficientes son valores que no dependen de la frecuencia de excitación por lo que se calcula una interacción suelo-estructura estática, lo que generalmente hace un calculista cuando desea realizar en sus cálculos la interacciones, lo que ocurre en este caso es que cuando considera dichas rigideces como constantes se puede caer en una subestimación de la rigidez del suelo y una sobrestimación de los desplazamientos de la estructura, por lo que se realizó el calculo para marcar dicha diferencia.

Cálculos con interacción suelo-estructura estática:

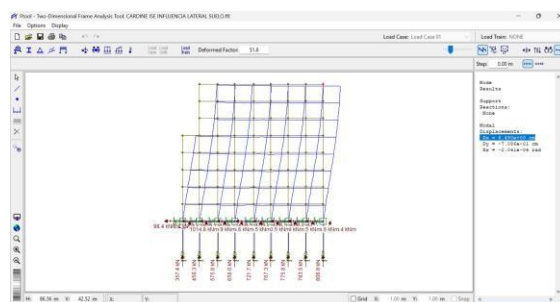


“Figura 11. Modelado de la estructura con influencia del suelo lateral”



“Figura 12. Desplazamiento lateral de la cabeza del pilote con suelo lateral”

El desplazamiento máximo en la cabeza del pilote es de: 1,968 cm.



“Figura 13. Desplazamiento lateral de los niveles del edificio”

En el último nivel se observa modificación del desplazamiento el cual es de: 6,490 cm por lo que se incrementó el mismo por considerar el suelo lateral.

Tablas resumen de resultados:

| Pilotes | Reacciones Pilote con ISE lateral |        |          |
|---------|-----------------------------------|--------|----------|
|         | Fx[kN]                            | Fy[kN] | Mz[kN*m] |
| 1       | 98,4                              | 357,4  | 1014,8   |
| 2       | 98,8                              | 450,3  | 2059,9   |
| 3       | 99,5                              | 575,8  | 2183,6   |
| 4       | 99,3                              | 656,0  | 1385,5   |
| 5       | 99,2                              | 721,7  | 1330,5   |

Organiza:

|   |      |       |       |
|---|------|-------|-------|
| 6 | 98,2 | 767,3 | 642,1 |
| 7 | 97,5 | 775,8 | 276,5 |
| 8 | 96,9 | 783,5 | 413,6 |
| 9 | 96,6 | 806,8 | 332,4 |

“Tabla 6. Reacciones en los pilotes con ISE lateral”

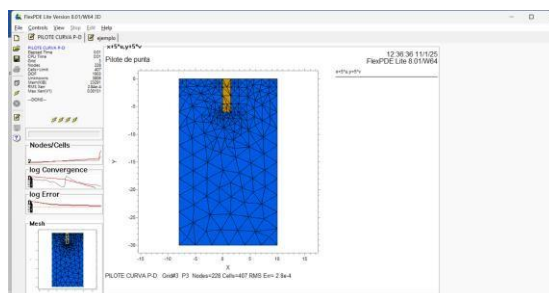
| Pilotes | $\delta y [cm]$ | $\delta x [cm]$ |
|---------|-----------------|-----------------|
| 1       | 0,1880          | 0,1946          |
| 2       | 0,2379          | 0,1954          |
| 3       | 0,3042          | 0,1968          |
| 4       | 0,3466          | 0,1963          |
| 5       | 0,3812          | 0,1963          |
| 6       | 0,4053          | 0,1943          |
| 7       | 0,4098          | 0,1928          |
| 8       | 0,4139          | 0,1917          |
| 9       | 0,4262          | 0,1910          |

“Tabla 7. Desplazamientos lateral y vertical en los pilotes con ISE lateral”

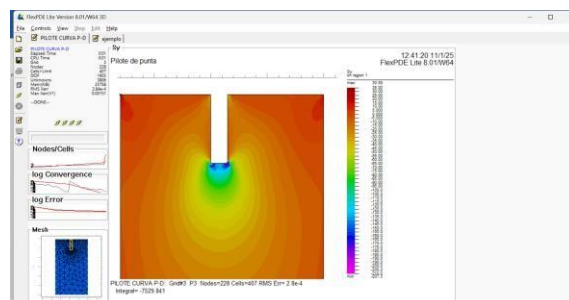
| Niveles | $\delta x [cm]$ |
|---------|-----------------|
| 1       | 0,985           |
| 2       | 2,017           |
| 3       | 3,053           |
| 4       | 4,024           |
| 5       | 4,880           |
| 6       | 5,604           |
| 7       | 6,155           |
| 8       | 6,490           |

“Tabla 8. Desplazamientos lateral de los niveles con ISE lateral”

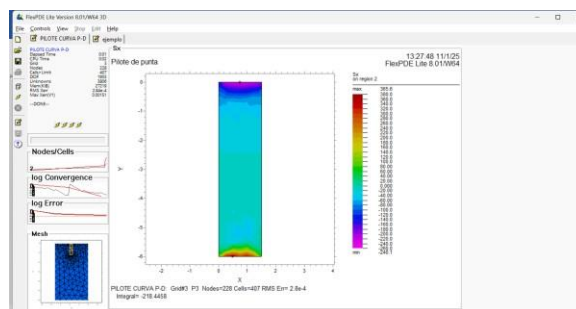
Utilizando un programa de elementos finitos FLEXPDE<sup>7</sup> se simuló un ensayo de carga del pilote para poder verificar que el suelo ante las cargas del proyecto esta en rango lineal, también fue utilizado para verificar la rigidez vertical del suelo granular.



“Figura 14. Mallado con Elementos finitos del suelo y pilote FlexPDE”



“Figura 15. Bulbo de presiones en el suelo debido al pilote”



“Figura 16. Distribución de tensiones horizontales en el pilote”

Nota: el suelo y el pilote están trabajando en el rango lineal y elástico por lo que la modelación es válida para pequeñas deformaciones o estados tensionales bajos del suelo.

Es necesario observar que la punta del pilote al tener gran diámetro el pilote intentará abrirse por la presión de la superestructura y la reacción del suelo, por lo que debería tener una densificación de estribos mayor para tomar estas tensiones de punta de lo contrario podría agrietarse el hormigón y generar menor vida útil para las armaduras, debería controlarse también las fisuras según la reglamentación, como no es objeto de este trabajo realizar cálculos de armaduras, detalle de armado se expone la potencia del software para encontrar puntos críticos, que en otros programas como ser Ftool no se tendrían en cuenta.

## CÁLCULO CON INTERACCIÓN DINÁMICA SUELO-ESTRUCTURA

Cálculo de la frecuencia adimensional: en esta ecuación puede observarse que mientras más bajo es Vs (suelo más blando) más grande será la frecuencia adimensional provocando efectos dinámicos más pronunciados como se verán en las curvas realizadas.

$$K_i = \chi_i \cdot E_{\text{suelo}} \cdot d_{\text{pilote}}$$

$$\chi_h := \frac{1}{2} \cdot \pi^{\frac{1}{4}} \cdot \delta_h^{\frac{3}{4}} \cdot \left( \frac{E_p}{E_s} \right)^{\frac{1}{4}} = 2.773438$$

$$K_h := \chi_h \cdot E_s \cdot d_p = 905.083684$$

$$a_{op} := \frac{w \cdot d_p}{V_s} = 0.329333$$

Modificador de rigidez dinámica: Con esta ecuación se modifica la rigidez estática la cual depende de parámetros del suelo, el pilote y la excitación dinámica.

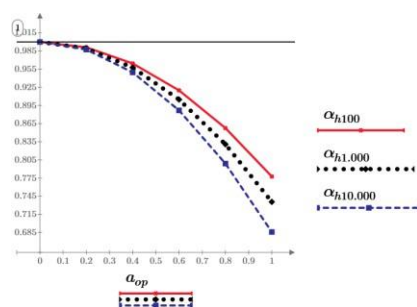
$$\alpha_h := 1 - \frac{3 \cdot \pi}{32 \delta_h} \cdot \left( \frac{\rho_p}{\rho_s} \right) \cdot a_{op}^2 = 0.975731$$

Se realizó graficas para mostrar la como varia el coeficiente modificador de rigidez dinámica en función de la frecuencia adimensional, esta toma valores que va desde 0 a 1 en un paso de 0,2 por lo que se hacen las gráficas en función de estos valores.

Se tiene en cuenta que se hacen las gráficas para distintos niveles de relación de rigidez entre pilote y suelo, variando de 100, 1.000 a 10.000 esto genera una mejor

Organiza:

visualización de la variación del coeficiente dinámica en función de la rigidez del pilote y el suelo.



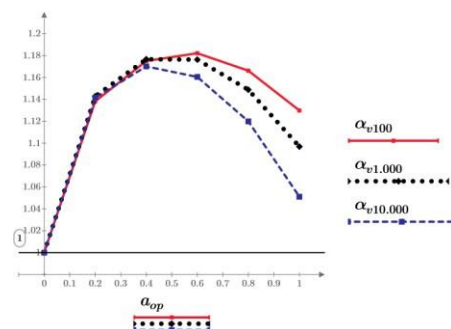
“Figura 17. para obtener el coeficiente modificador de rigidez dinámico, Fuente: Elaboración propia”

De esta grafica se pueden obtener conclusiones interesantes:

1-A medida que aumenta la frecuencia adimensional de vibración se observa como el coeficiente de rigidez dinámico disminuye.

2-A distintas relaciones de módulos de elasticidad se obtienen 3 curvas distintas, lo que se observa es que mientras mayor es la rigidez del pilote con respecto al suelo el coeficiente dinámico es más grande, marcando la flexibilidad o rigidez del sistema frente a la excitación sísmica.

3-En este modo lateral el pilote induce deformaciones al suelo de los alrededores, por ello a bajas frecuencias el suelo se deforma solidariamente con el pilote, por esto la rigidez lateral es máxima y similar a la rigidez estática en cambio a frecuencias altas aparece un efecto de desacople entre pilote y suelo el llamado efecto de radiación ya que no se ajusta a la deformación del suelo, por lo que la rigidez dinámica baja con el aumento de la frecuencia.



“Figura 18. para determinar coeficiente dinámico en función de frecuencia adimensional, Fuente: Elaboración propia”

Se pueden sacar conclusiones de la misma:

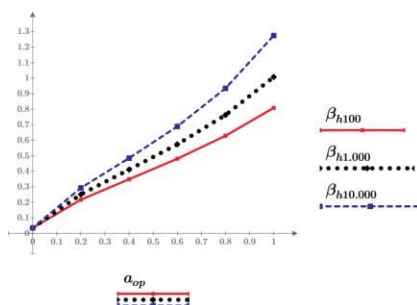
1-La rigidez dinámica se ve aumentada a medida que el suelo es más blando esto es lo que genera mayores coeficientes de rigidez.

2-A medida que aumenta la frecuencia las ondas se propagan más rápido, pero el suelo no puede seguir esa vibración y se desarrolla una zona más confinada y rígida el suelo parece “más duro”.

3-El suelo parece más rígido porque no puede relajarse a tiempo es la conclusión que

Organiza:

se obtiene de estas graficas por eso aumenta la rigidez dinámica.

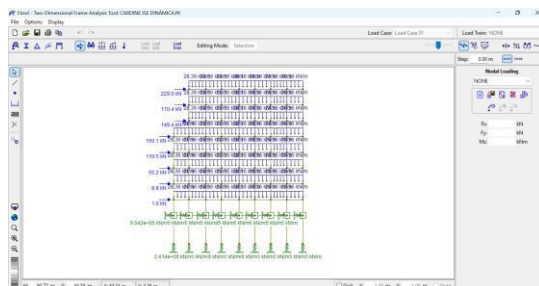


“Figura 19 de amortiguamiento del sistema en función de la frecuencia adimensional, Fuente: Elaboración Propia”

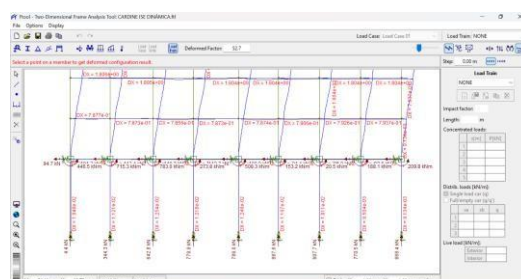
Lo que se observa en esta grafica es que mientras más aumente la frecuencia adimensional o más rápido vibre el sistema más energía se disipa en forma de ondas sísmicas que irradian de la cimentación debido a que no se ajusta a la deformación el pilote.

Para encontrar el valor de amortiguamiento del modelo en cuestión lo que se realiza es el cálculo de aop (frecuencia adimensional) con este se entra a la gráfica y se determina el amortiguamiento del sistema en el modo horizontal.

También se observa que a mayor rigidez mayor amortiguamiento debido a que el pilote no se ajusta a la deformación que lleva el suelo y por esto disipa mayor energía que un pilote que se deforma con el suelo.



“Figura 20. Modelado del plano 2-y con Interacción dinámica, Fuente: Elaboración Propia”

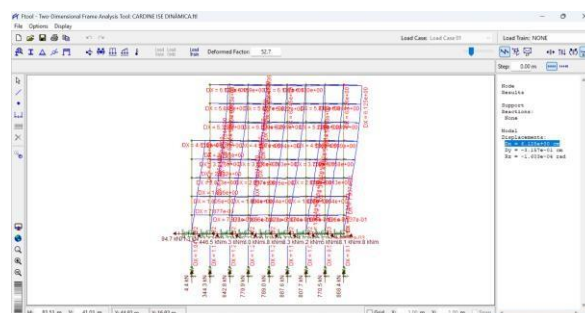


“Figura 21. Reacciones en los pilotes con ISE dinámica, Fuente: Elaboración Propia”

Como se observa el pilote 1 está siendo levantado por lo que su reacción es demasiado baja por lo que la capacidad de carga a tracción debería estudiarse a profundidad para evitar efectos de grandes desplazamientos o vuelcos en la estructura, si bien durante el evento sísmico la estructura sufre una redistribución de

Organiza:

esfuerzo en el centro debido a las rigideces que se han puesto en sus condiciones de borde esto podría ser perjudicial para estos pilotes.



“Figura 22. Desplazamiento lateral del edificio con ISE dinámica, Fuente: Elaboración Propia”

Se observa que el desplazamiento máximo es de 6,125 cm en el último nivel.

| Pilotes | Reacciones Pilote con ISE lateral |        |          |
|---------|-----------------------------------|--------|----------|
|         | Fx[kN]                            | Fy[kN] | Mz[kN*m] |
| 1       | 94,7                              | 4,4    | 446,5    |
| 2       | 101,3                             | 344,3  | 715,3    |
| 3       | 113,4                             | 642,8  | 783,1    |
| 4       | 110,2                             | 779,9  | 273,8    |
| 5       | 112,7                             | 789,1  | 508,3    |
| 6       | 100,1                             | 887,6  | 153,2    |
| 7       | 91,4                              | 807,7  | 20,5     |
| 8       | 85,9                              | 770,5  | 188,1    |
| 9       | 82,6                              | 868,4  | 209,8    |

“Tabla 9. Reacciones en los pilotes del edificio con ISE dinámica, Fuente: Propia”

Nota: Se observa que el pilote n°1 presenta una reacción vertical muy reducida ( $F_y \approx 4,4$  kN), lo cual indica que bajo la acción sísmica este pilote tiende a experimentar esfuerzos de tracción. Este fenómeno es esperable en grupos de pilotes cuando la excitación lateral produce rotación o levantamiento parcial de la cabeza de la cimentación.

En el modelo actual, los resortes verticales se han considerado lineales-elásticos y actúan tanto en compresión como en tracción, lo que constituye una simplificación. En la realidad, el suelo no puede resistir tracción libremente, sólo ofrece una pequeña resistencia debida a la fricción o adherencia lateral del fuste.

Por ello, el resultado del pilote n°1 debe interpretarse como una tendencia al levantamiento más que como una reacción efectiva. Para un análisis más realista se recomienda incorporar elementos de contacto que anulen la reacción bajo tracción que limiten la fuerza de tracción al valor máximo movilizable por adherencia lateral.

Este tipo de comportamiento es característico de la interacción dinámica suelo–pilote–estructura, y refleja la transferencia desigual de cargas dentro del grupo de pilotes durante sollicitaciones sísmicas.

Lo importante es verificar que ningún pilote trabaje con tracción superior a la capacidad por adherencia lateral o peso propio, para evitar “arranque”.

| Pilotes | $\delta y[cm]$ | $\delta x[cm]$ |
|---------|----------------|----------------|
| 1       | 0,000181       | 0,01048        |
| 2       | 0,01426        | 0,01121        |
| 3       | 0,02663        | 0,01254        |

Organiza:

|   |         |          |
|---|---------|----------|
| 4 | 0,03231 | 0,01228  |
| 5 | 0,03269 | 0,01246  |
| 6 | 0,03677 | 0,01107  |
| 7 | 0,03346 | 0,01011  |
| 8 | 0,03192 | 0,00954  |
| 9 | 0,03598 | 0,009134 |

*“Tabla 10. Desplazamientos en la cabeza de los pilotes del edificio con ISE dinámica, Fuente: Propia”*

| Niveles | $\delta x [cm]$ |
|---------|-----------------|
| 1       | 0,794           |
| 2       | 1,804           |
| 3       | 2,813           |
| 4       | 3,758           |
| 5       | 4,590           |
| 6       | 5,289           |
| 7       | 5,814           |
| 8       | 6,125           |

*“Tabla 11. Desplazamientos del edificio con ISE dinámica, Fuente: Propia”*

## CONCLUSIONES

A partir de la comparación entre el análisis convencional con base rígida, el modelo de interacción suelo–estructura estática y el modelo de interacción dinámico, se observa que la consideración progresiva de la deformabilidad del suelo influye de manera significativa en la respuesta estructural. En particular, las reacciones en la base de los pilotes y los desplazamientos globales de la estructura presentan variaciones apreciables al incorporar la interacción suelo–pilote–estructura.

La inclusión de la interacción genera una redistribución de esfuerzos tanto en el suelo como en los elementos estructurales, producto de las rigideces relativas entre el suelo, los pilotes y la superestructura. En este sentido, el supuesto de base rígida puede conducir a una subestimación o sobreestimación de solicitaciones internas, ya que no contempla la flexibilidad del sistema de fundación ni la transferencia real de cargas entre los distintos componentes.

Asimismo, se verifica que la rigidez dinámica del suelo resulta superior a la rigidez estática representada mediante el coeficiente de balasto, lo cual tiene una influencia directa en la respuesta dinámica del sistema. Esta diferencia adquiere especial relevancia en fundaciones profundas, donde variaciones en el diámetro y la longitud de los pilotes generan cambios en las rigideces individuales, afectando la distribución de esfuerzos y la demanda dinámica sobre la estructura.

En consecuencia, la presencia de pilotes con diferentes características geométricas puede modificar el comportamiento dinámico global, dando lugar a elementos estructurales más solicitados respecto de lo previsto mediante métodos simplificados. Por lo tanto, la consideración de modelos de interacción suelo–estructura dinámicos resulta fundamental para una evaluación más realista y segura del comportamiento estructural, especialmente en zonas sísmicas y en estructuras apoyadas sobre suelos deformables.

## BIBLIOGRAFIA

1. Áviles, J., & Perez Rocha, L. E. (2004). Bases para las nuevas disposiciones reglamentarias sobre interacción dinámica suelo-estructura. México: Revista de ingeniería sísmica n°71.
2. FEMA P-291 (FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT). (2020). A Practical Guide to Soil-Structure Interaction. California: NHERP.
3. Gazetas, G. (1991). Foundation Vibrations. Athenas: H.-Y. Fang, 1991, Springer
4. NIST GCR 12-917-21. ( 2012). Soil-Structure Interaction for Building Structures. California, USA: National Institute of Standards and Technology Engineering Laboratory Gaithersburg.
5. INPRES-CIRSOC 103. (1982/2005). Normas argentinas para construccion sismorresistentes. Instituto nacional de prevencion sismica.
6. Martha, L. F. (2018). *FTOOL: Two-dimensional frame analysis tool* (Versión 4.00) [Software de computación]. Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
7. PDE Solutions Inc. (2020). *FlexPDE 7: User guide and reference manual* [Manual de usuario].
8. Jennings, P. C., & Bielak, J. (1973). Dynamics of building-soil interaction. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 63(1), 9–48