



V Convención Científica Internacional UCLV 2025
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA DE UNA EDIFICACIÓN CON LOSA DE CIMENTACIÓN POR LOS MODELOS DINÁMICOS DE BARKAN-SAVINOV, NORMA RUSA SNIP 2.02.05-87 Y GAZETAS-MYLONAKIS

Dr. Contreras, Juan. Universidad Nacional del Santa

ORCID ID: 0000-0003-2048-130X

PhD. Villareal, Genner Universidad de San Martín de Porres

ORCID ID: 0000-0003-1768-646X





INTRODUCCION

La interacción dinámica entre suelo y estructura es crucial para entender el comportamiento estructural y sísmico en las edificaciones, diversas investigaciones en el tema señalan que las propiedades modales de las estructuras se ven alteradas por la flexibilidad del suelo y la masa del sistema suelo-estructura, dando como resultado frecuencias de vibración más largas lo cual incrementa los periodos debido al comportamiento histerético del suelo, además se ha observado en estudios similares que esta interacción puede alterar los desplazamientos laterales de la edificación, siendo este aspecto dentro del comportamiento estructural uno de los factores que ponen en mayor riesgo a las edificaciones, dado que las deformaciones que se encuentran en el límite inelástico con una breve variación podrían pasar a una condición de deformaciones permanentes e irreversibles, así Tena-Colunga (2019) consideran que es necesario reflexionar sobre la importancia de modelar las estructuras con Interacción Dinámica Suelo-Estructura, especialmente en suelos blandos en vista que ignorar estos efectos puede llevar a daños irreversibles no previstos y colapsos estructurales. Además, se debe considerar que, en el contexto peruano, esta interacción adquiere una relevancia especial debido a la condición de alta sismicidad del país, y la diversidad de tipos de suelo que pueden presentar características complejas, desde suelos blandos hasta rocosos.



METODOLOGIA

El estudio se desarrolló utilizando los modelos dinámicos de ISE Barkan-Savinov, Norma Rusa SNIP 2.02.05-87 y Gazetas-Mylonakis, aplicando los coeficientes obtenidos en una edificación con sistema estructural en muros estructurales y pórticos, para determinar si la variación es significativa en comparación a un análisis tradicional que considera la base fija o empotrada. El estudio se realizó mediante el análisis convencional modal espectral, y se verificó los resultados mediante un análisis no lineal tiempo historia, en los resultados obtenidos se determinó la variación del periodo de vibración de la estructura, las derivas laterales de entrepiso y fuerzas cortantes máximas probables. El espectro se elaboró mediante los parámetros normativos de la norma peruana E.030 y en el caso del análisis tiempo historia no lineal se utilizó el caso del sismo de Lima de 1955 con sus dos componentes Este-Oeste y Norte-Sur.

OBJETIVO PRINCIPAL

- Determinar si la incorporación de los modelos dinámicos de interacción suelo estructura de Barkan & Savinov, Norma Rusa SNIP 2.02.05-87 y Gazetas & Mylonakis establecidos en la norma NIST GCR 12-917-21, pueden modificar o influir significativamente en el comportamiento estructural de la edificación para ser consideradas dentro del análisis estructural y posteriormente en la norma peruana E.030.

OBJETIVO ESPECIFICO

- Determinar si los modelos dinámicos de ISE de Barkan-Savinov, Norma Rusa SNIP 2.02.05-87 y Gazetas-Mylonakis tienen una influencia significativa en el periodo de vibración, las derivas de entrepiso y esfuerzos cortantes de una edificación en muros estructurales y losa de cimentación.



CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE LA ZONA



El estudio se realizó en la región de Cajamarca, en zona sísmica Z2, al norte del Perú, en la provincia de Jaén, utilizando una edificación en muros estructurales y losa de cimentación.

La zona considerada en la investigación presenta una geología que se puede considerar única, debido a que la región se encuentra en una zona de transición entre la Cordillera de los Andes y la llanura amazónica, lo que resulta en zonas con la presencia de fallas geológicas y depósitos sedimentarios. Estas condiciones contribuyen a la complejidad del comportamiento sísmico de las estructuras en este tipo de suelo, suelos blandos, con depósitos fluvioaluviales compactados de baja rigidez.



FUERZAS SISMICAS PARA EL ANALISIS MODAL



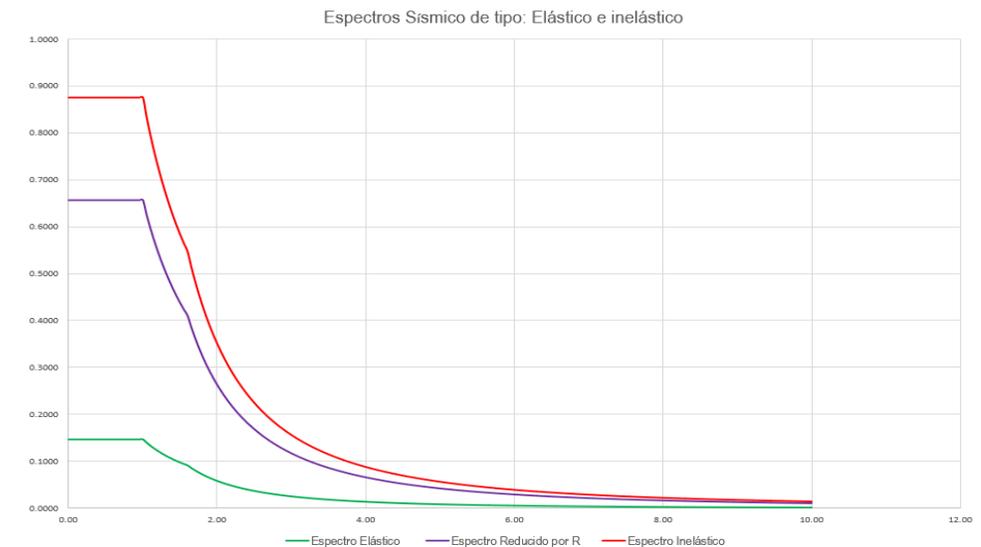
Factor de Zona	Z	Z2
Tipo de Suelo		S3
Parámetros de Sitio	S	1.40
	Tp	1
	Tl	1.6
Factor de Uso	U	1
Coefficiente de reducción	R	6

ESPECTROS DE PSEUDOACELERACIÓN

$$S_a = \frac{ZUCS}{R} = \frac{0.25 * 1 * 2.5 * 1.4}{6} = 0.145833g$$

$$S_a = 0.145833g * (6) = 0.875g$$

$$S_a = 0.145833g * 0.75(6) = 0.6563g$$



Parámetros	Factor
Altura de edificación h_n	18.60
Coefficiente C_t (sistema muros)	60.00
Periodo estático de la edificación T	0.31
T_P (S)	1.00
T_L (S)	1.60
$T < T_P$	Cumple condición

Tabla I.- Parámetros normativos para determinar el coeficiente C



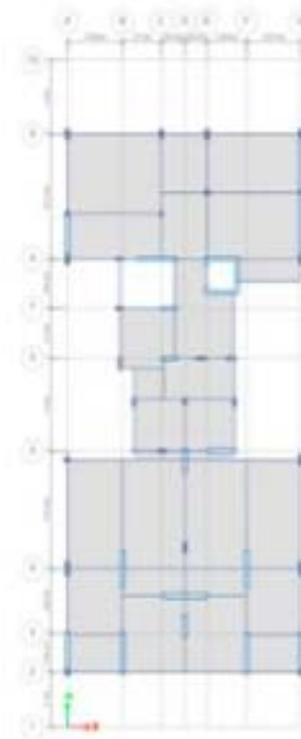
MODELADO DE LA ESTRUCTURA

Propiedades de la estructura para el modelamiento

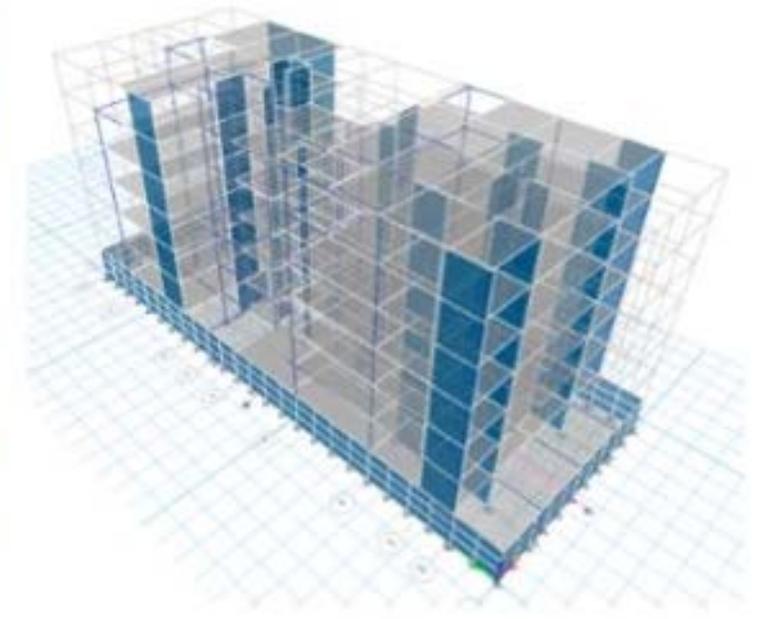
El modelo estructural esta diseñada con **pórticos y muros estructurales**, losas aligeradas en los niveles superiores y una losa de cimentación de $e=0.40$ m. Para determinar las derivas de entrepiso en el centro de masa se utilizaron diafragmas rígidos para los elementos horizontales.

Elementos	Propiedades
Concreto en vigas, columnas, losas	$f^c=210 \text{ kgf/cm}^2$
Losa de cimentación $e=0.40$	$f^c=210 \text{ kgf/cm}^2$
Acero (resistencia)	$f^y=4200 \text{ kgf/cm}^2$
Módulo de elasticidad E_c	$E_c= 2188.20 \text{ kgf/mm}^2$
Coefficiente de Poisson del concreto	$\nu= 0.20$
Metro cúbico de concreto (Peso)	$\gamma_{CA}=2.4 \text{ tonf/m}^3$

Tabla II.- Propiedades de Resistencia del concreto



a) Planta típica



b) Modelo Estructural



MODELADO DE LA ESTRUCTURA

Cargas propias e impuestas en la estructura

CARGAS PERMANENTES DE LA EDIFICACIÓN

En el modelo se consideró cargas impuestas (sin función estructural) definidas como cargas gravitacionales, calculadas mediante la norma E.020 como tabiquerías ($150 \frac{kgf}{m^2}$), acabados de piso ($100 \frac{kgf}{m^2}$) y ladrillos ($60 \frac{kgf}{m^2}$) en las losas aligeradas.

CARGAS VIVAS DE LA EDIFICACIÓN

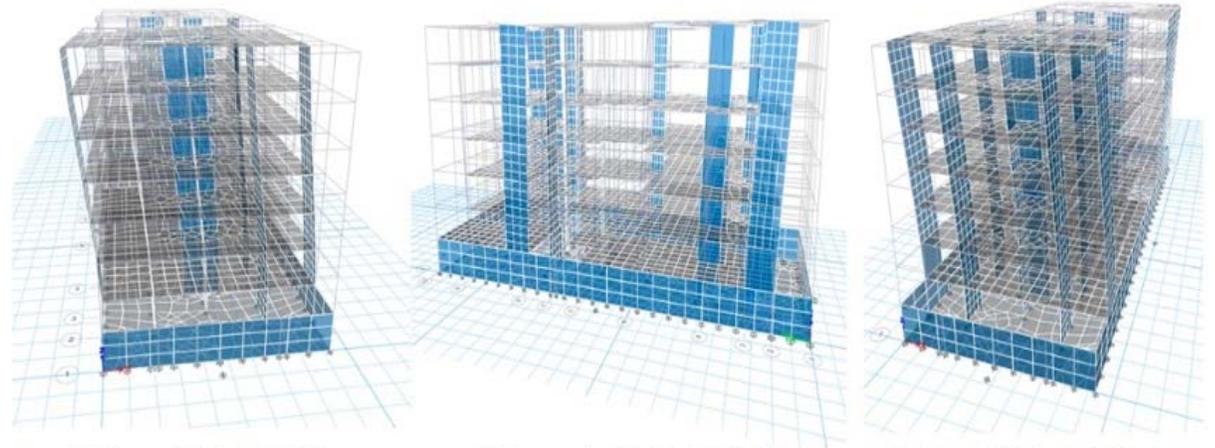
Nivel	Uso (Servicio)	Carga (tonf/m ²)
Azotea	Azotea	0.10
Nivel 01 a Nivel 05	Uso común	0.20
Semisótano	Estacionamiento	0.10

Tabla III.- Cargas vivas asignadas a la edificación

$$P_s = 100\% CM + 25\% CV$$

Periodos de la estructura

- El primer modo de vibración es en la dirección del modelo xx' con $T_1 = 0.554$ s,
- El segundo modo es en la dirección yy' del modelo con $T_2 = 0.441$ s.
- El tercer modo de vibración de la estructura es torsional con un periodo de $T_3 = 0.306$ s



a) Primer Modo t=0.554

b) Segundo Modo t=0.441

b) Tercer Modo t=0.306



PROPIEDADES DE SUELO Y DE LA EDIFICACIÓN

Los coeficientes de rigidez y amortiguamiento en los seis grados de libertad de la cimentación del modelo estructural se calcularon mediante las propiedades obtenidas en el estudio de Mecánica de Suelos (EMS), el peso sísmico de la edificación y las dimensiones de la losa de cimentación.

PROPIEDADES DEL SUELO

- Clasificación del suelo \therefore S3 – Suelo blando
- Tipo de suelo \therefore Arena arcillosa de baja plasticidad
- Velocidad de onda $\therefore V_S = 165 \text{ m/s}$
- Módulo de elasticidad del suelo $\therefore E_S = 1150 \text{ tonf/m}^2$
- Coeficiente de Poisson $\therefore \mu_1 = 0.30$
- Altura de estrato $\therefore h_1 = 1.00 \text{ m}$
- Capacidad portante del suelo $\therefore q_a = 1.35 \text{ kgf/cm}^2$
- Densidad del suelo $\therefore \rho_s = 0.1 \text{ tonf.s}^2/\text{m}^4$
- Coeficiente C_0 $\therefore C_0 = 0.8 \text{ kgf/cm}^2$
- Profundidad de desplante $\therefore \gamma_{CA} = 1.2 \text{ m}$

PESO SISMICO DE LA EDIFICACIÓN

Nivel	UX (kg)	UY (kg)	Peso (Tonf)
Azotea	157059.67	157059.67	157.06
Story5	312775.15	312775.15	312.78
Story4	338874.36	338874.36	338.87
Story3	338874.36	338874.36	338.87
Story2	338874.36	338874.36	338.87
Story1	338874.36	338874.36	338.87
Semi Sótano	463424.5	463424.5	463.42
Base	131621.34	131621.34	131.62
Peso sísmico sin considerar la losa			2420.38

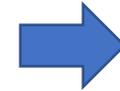
DIMENSIONES DE LA LOSA

Descripción	Detalle
Dirección de la Losa (xx')	$a = 14 \text{ m}$
Dirección de la losa (yy')	$b = 36 \text{ m}$
Área de la losa	$A = 504 \text{ m}^2$
Altura de la losa	$e = 0.40 \text{ m}$
Distancia al centroide de la losa	$d = c/2 = 0.2 \text{ m}$
Peso del concreto por m ³	$\gamma = 2.4 \text{ tonf/m}^3$
Gravedad	$g = 9.806 \text{ m/s}^2$



COEFICIENTES DINAMICOS DE ISE – MODELO DE BARKAN & SAVINOV

Los coeficientes de rigidez del modelo ISE de Barkan & Savinov se obtienen haciendo uso de las masas traslacionales del modelo, respecto a los ejes centroidales x, y, z de la estructura.



$$P_{Losa} = \gamma * a.b.c = 483.84 \text{ tonf}$$

❖ MASAS TRASLACIONALES

$$M_t = M_x = M_y = M_z = \frac{\gamma.a.b.c}{g} = 49.341 \frac{\text{tonf} * s^2}{m}$$

❖ INERCIAS DE MASA DE LA ESTRUCTURA

$$I_{mx} = \frac{M_t * b^2}{12} = 5328.85 \text{ tonf.m.s}^2$$

$$I_{my} = \frac{M_t * a^2}{12} = 805.907 \text{ tonf.m.s}^2$$

❖ INERCIAS DE MASA ROTACIONALES

$$M_{\varphi x'} = M_t.d^2 + I_{mx} = 5330.825 \text{ tonf.m.s}^2$$

$$M_{\varphi y'} = M_t.d^2 + I_{my} = 807.88 \text{ tonf.m.s}^2$$

$$M_{\psi z'} = M_t.\frac{a^2 + b^2}{12} = 6134.758 \text{ tonf.m.s}^2$$



PRESION ESTATICA EN EL MODELO DE BARKAN & SAVINOV

Determinación de los coeficientes de presión estática

$$\rho = \frac{P_{Estructura} + P_{losa}}{A_{losa}} = 0.523 \frac{kgf}{cm^2}$$

Respecto a los coeficientes C_o y ρ_o para un suelo arcilloso de baja plasticidad (Ver tabla 2.1 del libro de Villarreal, 2017), se determinaron los siguientes coeficientes

$$\rho_o = 0.2 \frac{kgf}{cm^2} \text{ y } C_o = 0.8 \frac{kgf}{cm^3}$$

Coefficientes de desplazamiento y compresión

Mediante los datos, se procedió a calcular el coeficiente D_o , obteniendo:

$$D_o = \frac{1 - \mu}{1 - 0.5\mu} \cdot C_o = \left(\frac{1 - 0.30}{1 - 0.5 * 0.30} \right) * 0.80 = 0.659 \frac{kgf}{cm^3}$$

$$C_x = D_o \left[1 + \frac{2 * (a + b)}{m^{-1} * A_{Losa}} \right] \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\rho_o}} = 1407.06 \frac{tonf}{m^3}$$

$$C_y = 1407.06 \frac{tonf}{m^3}$$

$$C_z = C_o \left[1 + \frac{2 * (a + b)}{m^{-1} * A_{Losa}} \right] \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\rho_o}} = 1708.57 \frac{tonf}{m^3}$$

$$C_{\phi x} = C_o \left[1 + \frac{2(a + 3b)}{m^{-1} * A_{Losa}} \right] \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\rho_o}} = 2115.91 \frac{tonf}{m^3}$$

$$C_{\phi y} = C_o \left[1 + \frac{2(b + 3a)}{m^{-1} * A_{Losa}} \right] \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\rho_o}} = 1866.98 \frac{tonf}{m^3}$$



COEFICIENTES DE RIGIDEZ EN EL MODELO DE BARKAN & SAVINOV

Coeficientes de rigidez de Barkan & Savinov

COEFICIENTES DE RIGIDEZ LATERAL

$$K_x = C_x A = 1407.06 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3} * 504 \text{ m}^2 = 709.157 \frac{\text{tonf}}{\text{mm}}$$

$$K_y = C_y A = 1407.06 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3} * 504 \text{ m}^2 = 709.157 \frac{\text{tonf}}{\text{mm}}$$

$$K_z = C_z A = 1708.57 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3} * 504 \text{ m}^2 = 861.12 \frac{\text{tonf}}{\text{mm}}$$

COEFICIENTES DE RIGIDEZ ROTACIONAL

$$I_x = \frac{a^3 * b}{12} = 8232 \text{ m}^4$$

$$I_y = \frac{a * b^3}{12} = 54432 \text{ m}^4$$

$$K_{\varphi x} = C_{\varphi x} I_x = 115173340174.254 \frac{\text{tonf} \cdot \text{mm}}{\text{rad}}$$

$$K_{\varphi y} = C_{\varphi y} I_y = 15368991472.055 \frac{\text{tonf} \cdot \text{mm}}{\text{rad}}$$

Incorporación de los coeficientes en el modelo

Los coeficientes se procedieron a incorporar mediante el comando Assign/Point Spring en la losa de cimentación que previamente fue discretizada. Las propiedades se ingresaron en losas discretizadas en un modelo 2D que se utiliza frecuentemente en sistemas de interacción suelo-estructura.

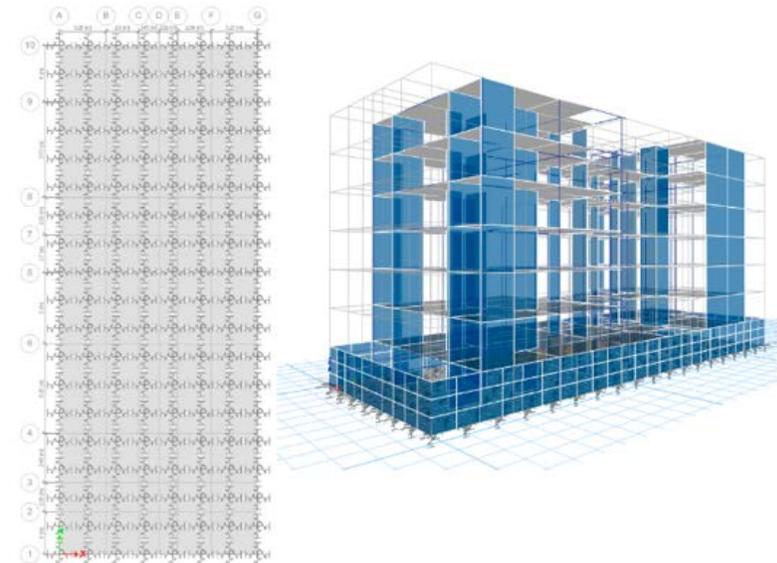


Figura IV.- Modelo con los coeficientes de Barkan – Savinov



COEFICIENTES DINAMICOS DE ISE – MODELO DE LA NORMA RUSA

MODELO DINAMICO DE NORMA RUSA SNIP 2.02.05-87

Villarreal (2023) considera que la característica elástica de la cimentación se puede determinar mediante el "coeficiente de compresión elástica uniforme", que se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$C_z = b_o E \left(1 + \sqrt{\frac{A_{10}}{A_{Losa}}} \right) \rightarrow C_z = 1.2 * 1150 \left(1 + \sqrt{\frac{10m^2}{504m^2}} \right) = 1574.385 \frac{tonf}{m^3}$$

Coefficientes de desplazamiento elástico uniforme

$$C_x = 0.7 * C_z = 1102.07 \frac{tonf}{m^3}$$

$$C_{\varphi x} = C_{\varphi y} = 2 * C_z = 3148.77 \frac{tonf}{m^3}$$

$$C_{\varphi x} = C_{\varphi y} = 2 * C_z = 3148.77 \frac{tonf}{m^3}$$

$$C_{\psi z} = C_z = 1574.38 \frac{tonf}{m^3}$$

Calculo de los coeficientes de rigidez

$$K_x = C_x A = 546.443 \frac{tonf}{mm}$$

$$K_y = C_x A = 555.443 \frac{tonf}{mm}$$

$$K_z = C_z A = 793.49 \frac{tonf}{mm}$$

$$I_x = \frac{a^3 * b}{12} = 8232 m^4$$

$$I_y = \frac{a * b^3}{12} = 54432 m^4$$

$$I_z = \frac{a^3 * b}{12} + \frac{a * b^3}{12} = 62664 m^4$$

$$K_{\varphi x} = C_{\varphi x} I_x = 171,393,900.741 tonf.m/rad$$

$$K_{\varphi y} = C_{\varphi y} I_y = 25,920,682.519 tonf.m/rad$$

$$K_{\psi z} = C_{\psi z} I_z = 98,657,291.63 tonf.m/rad$$



COEFICIENTES DE RIGIDEZ Y AMORTIGUAMIENTO EN LA NORMA RUSA

Amortiguamiento relativo para vibraciones verticales

$$\gamma_{ts} = 0.7 \quad (\text{Para suelos arcillosos}) \quad R = 0.83 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Determinando la presión estática media ρ_m del suelo se obtuvo:

$$\rho_m = \gamma_{ts} * R = 12.6 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$$

Considerando el valor adimensional

$$C_{zp} = C_z * 1 * \frac{\text{tonf}^{-1}}{\text{m}^{-3}} = 1574.385$$

Se obtuvo como amortiguamiento relativo vertical:

$$\beta_z = 2 * \sqrt{\frac{E}{C_z * p_m}} = 2 * \sqrt{\frac{1150}{1574.38 * 6.404}} = 0.675$$

$$\beta_x = 0.6 * \beta_z = 0.405$$

$$\beta_y = 0.6 * \beta_z = 0.405$$

$$\beta_{\varphi x} = 0.5 * \beta_z = 0.338$$

$$\beta_{\varphi y} = 0.5 * \beta_z = 0.338$$

$$\beta_{\psi z} = 0.3 * \beta_z = 0.203$$



$$B_x = 2 * \beta_x * \sqrt{K_x * M_x} = 4243.158 \text{ tonf. s/m}$$

$$B_y = 2 * \beta_y * \sqrt{K_y * M_y} = 4243.158 \text{ tonf. s/m}$$

$$B_z = 2 * \beta_z * \sqrt{K_z * M_z} = 8452.573 \text{ tonf. s/m}$$

$$B_{\varphi x} = 2 * \beta_{\varphi x} * \sqrt{K_{\varphi x} * M_{\varphi x'}} = 645621.656 \text{ tonf. s.m}$$

$$B_{\varphi y} = 2 * \beta_{\varphi y} * \sqrt{K_{\varphi y} * M_{\varphi y'}} = 97741.7 \text{ tonf. s.m}$$

$$B_{\psi z} = 2 * \beta_{\psi z} * \sqrt{K_{\psi z} * M_{\psi z'}} = 315280.967 \text{ tonf. s.m}$$

Incorporación de los coeficientes en el modelo

La incorporación de los coeficientes de rigidez y amortiguamiento se realizó mediante el comando Spring Properties / Área Spring Property.

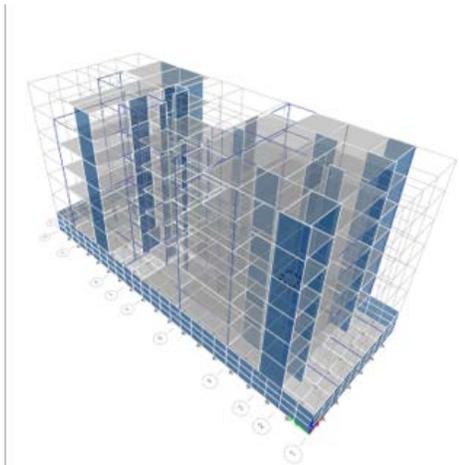
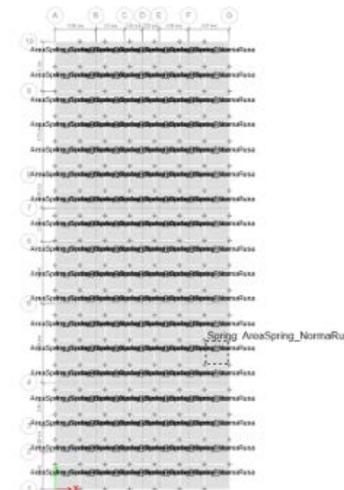


Figura V.- Modelo con los coeficientes de la Norma Rusa



COEFICIENTES DINAMICOS DE ISE – MODELO DE GAZETAS & MYLONAKIS

$$V_s = 165 \frac{m}{s}$$

$\mu = 0.30$ (Módulo de Poisson del suelo)

$$g = 9806 \frac{m}{s^2}$$

$$\gamma = 19 \frac{kN}{m^3}$$

En base a esos datos se calculó el módulo de corte del suelo máximo.

$$G_{max} = \frac{\gamma}{g} * V_s^2 = 52.75 MPa \text{ (Módulo de corte del suelo)}$$

$$B = 7.00 m \left(\frac{a}{2} \text{ medida del lado menor al centroide} \right)$$

$$L = 18.00 m \left(\frac{b}{2} \text{ medida del lado mayor al centroide} \right)$$

Las inercias de la losa de cimentación utilizadas fueron:

$$I_x = \frac{(2 * L)^3 * (2 * B)}{12} = 54432 m^4$$

$$I_y = \frac{(2 * L) * (2 * B)^3}{12} = 8232 m^4$$

$$J = I_z = I_x + I_y = 62664.5 m^4 \text{ (Define el momento polar de inercia)}$$

El módulo de corte del suelo G_m se obtuvo mediante:

$$G_m = G_{max} * 0.3433 = 18.108 MPa$$

Coeficiente de rigidez traslacional y torsional

Traslación en el eje z:

$$K_{z,sur_gm} = \left(\frac{2 * G_m * L}{1 - \mu} \right) * \left(0.73 + 1.54 * \left(\frac{B}{L} \right)^{0.75} \right) = 155,803.791 \frac{tonf}{m}$$

Traslación en el eje y:

$$K_{y,sur_gm} = \left(\frac{2 * G_m * L}{2 - \mu} \right) * \left(2 + 2.5 * \left(\frac{B}{L} \right)^{0.85} \right) = 134,490.879 \frac{tonf}{m}$$

Traslación en el eje x:

$$K_{x,sur} = \left(\frac{G_m * B}{2 - \mu} \right) * \left(6.8 * \left(\frac{L}{B} \right)^{0.65} + 2.4 \right) = 124,539.842 \frac{tonf}{m}$$

Torsión en torno al eje x:

$$K_{zz,sur_gm} = (G_m * J^{0.75}) * \left(4 + 11 * \left(1 - \frac{B}{L} \right)^{10} \right) = 292,609,657.093 \frac{kN.m}{rad}$$

Rotación en torno al eje y:

$$K_{yy,sur_gm} = \left(\frac{G_m}{1 - \mu} \right) * I_x^{0.75} * \left(\frac{L}{B} \right)^{0.25} * \left(2.4 + \left(\frac{B}{L} \right) \right) = 302,869,323.78 \frac{kN.m}{rad}$$

Rotación en torno al eje x:

$$K_{xx,sur_gm} = \left(\frac{G_m}{1 - \mu} \right) * I_y^{0.75} * \left(3 * \left(\frac{L}{B} \right)^{0.15} \right) = 77,277,492.743 \frac{kN.m}{rad}$$



FACTORES DE CORRECCION Y MODIFICATORIOS DE RIGIDEZ

Factores para la corrección de rigidez por empotramiento

Para el cálculo de los factores para la corrección de rigidez por empotramiento, traslación en el eje x,y,z (η_z, η_y, η_x) y corrección para la torsión en los ejes x,y,z ($\eta_{zz}, \eta_{yy}, \eta_{xx}$), se consideró la altura de la cimentación y la altura del empotramiento, con los siguientes valores.

Gazetas (1991); Mylonakis et al. (2006)

$$\eta_z = \left[1 + \frac{D}{21B} \left(1 + 1.3 \frac{B}{L} \right) \right] \left[1 + 0.2 \left(\frac{A_w}{4BL} \right)^{2/3} \right]$$

$$\eta_y = \left(1 + 0.15 \sqrt{\frac{D}{B}} \right) \left[1 + 0.52 \left(\frac{z_w A_w}{BL^2} \right)^{0.4} \right]$$

Same equation as for η_y , but A_w term changes for $B \neq L$

$$\eta_{zz} = 1 + 1.4 \left(1 + \frac{B}{L} \right) \left(\frac{d_w}{B} \right)^{0.9}$$

$$\eta_{yy} = 1 + 0.92 \left(\frac{d_w}{B} \right)^{0.6} \left[1.5 + \left(\frac{d_w}{D} \right)^{1.9} \left(\frac{B}{L} \right)^{-0.6} \right]$$

$$\eta_{xx} = 1 + 1.26 \frac{d_w}{B} \left[1 + \frac{d_w}{B} \left(\frac{d_w}{D} \right)^{-0.2} \sqrt{\frac{B}{L}} \right]$$

Figura VII.- Factores de corrección (Tabla 2-2b)

$D = 1.20 \text{ m}$
 $dw = 0.40 \text{ m}$
 $Zw = 0.6 \text{ m}$
 $Aw = 2 * (2B + 2L) * dw = 40m^2$

η_{z_gm}	η_{y_gm}	η_{x_gm}	η_{zz_gm}	η_{yy_gm}	η_{xx_gm}
1.05	1.152	1.126	1.148	1.284	1.075

Tabla VI.- Factores de corrección

Factores modificatorios de la rigidez dinámica y amortiguamiento

Surface Stiffness Modifiers

$$\alpha_z = 1.0 - \frac{\left(0.4 + \frac{0.2}{L/B} \right) a_0^2}{\left(\frac{10}{1 + 3(L/B - 1)} \right) + a_0^2}$$

$$\alpha_y = 1.0$$

$$\alpha_x = 1.0$$

$$\alpha_{zz} = 1.0 - \frac{\left(0.33 - 0.03\sqrt{L/B - 1} \right) a_0^2}{\left(\frac{0.8}{1 + 0.33(L/B - 1)} \right) + a_0^2}$$

$$\alpha_{yy} = 1.0 - \frac{0.55 a_0^2}{\left(0.6 + \frac{1.4}{(L/B)^3} \right) + a_0^2}$$

$$\alpha_{xx} = 1.0 - \frac{\left(0.55 + 0.01\sqrt{L/B - 1} \right) a_0^2}{\left(2.4 - \frac{0.4}{(L/B)^3} \right) + a_0^2}$$

$w = 1.61 * \frac{2\pi}{s} = 10.116 \frac{\text{rad}}{s}$
 $\alpha_0 = w * \frac{B}{v_s} = 0.429$
 $\psi = \sqrt{\frac{2 * (1 - \mu)}{1 - 2\mu}} = 1.871, \text{ donde maximo valor } \psi = 2.5$

α_z	α_y	α_x	α_{zz}	α_{yy}	α_{xx}
0.906	1.00	1.00	0.869	0.883	0.961

Tabla VII.- Factores modificatorios de rigidez



COEFICIENTES DE AMORTIGUAMIENTO y RIGIDEZ DINAMICA

Coeficientes de amortiguamiento por radiación

Radiation Damping

$$\beta_z = \left[\frac{4\psi(L/B)}{(K_{z,sur}/GB)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_z} \right]$$

$$\beta_y = \left[\frac{4(L/B)}{(K_{y,sur}/GB)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_y} \right]$$

$$\beta_x = \left[\frac{4(L/B)}{(K_{x,sur}/GB)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_x} \right]$$

$$\beta_{zz} = \left[\frac{(4/3)[(L/B)^3 + (L/B)]a_0^2}{(K_{zz,sur}/GB^3) \left[\left(\frac{1.4}{1+3(L/B-1)^{0.7}} \right) + a_0^2 \right]} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{zz}} \right]$$

$$\beta_{yy} = \left[\frac{(4\psi/3)(L/B)^3 a_0^2}{\left(\frac{K_{yy,sur}}{GB^3} \right) \left[\left(\frac{1.8}{1+1.75(L/B-1)} \right) + a_0^2 \right]} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{yy}} \right]$$

$$\beta_{xx} = \left[\frac{(4\psi/3)(L/B)a_0^2}{(K_{xx,sur}/GB^3) \left[\left(2.2 - \frac{0.4}{(L/B)^3} \right) + a_0^2 \right]} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{xx}} \right]$$

β_z	β_y	β_x	β_{zz}	β_{yy}	β_{xx}
0.417	0.234	0.253	0.055	0.059	0.059

Tabla VIII.- Coeficientes de amortiguamiento por radiación

Coeficientes de rigidez dinámica corregido

Los coeficientes de rigidez corregidos por el empotramiento de la cimentación en el suelo para Gazetas y Mylonakis se determinaron mediante las siguientes ecuaciones:

$$K_{z_e_gm} = K_{zsur_gm} * \eta_{z_gm} * \alpha_z = 148.156 \frac{\text{tonf}}{\text{mm}}$$

$$K_{x_e_gm} = K_{xsur_gm} * \eta_{x_gm} * \alpha_x = 140.269 \frac{\text{tonf}}{\text{mm}}$$

$$K_{y_e_gm} = K_{ysur_gm} * \eta_{y_gm} * \alpha_y = 154.885 \frac{\text{tonf}}{\text{mm}}$$

$$K_{zz_e_gm} = K_{zz,sur_gm} * \eta_{zzgm} * \alpha_{zz} = 32,800,214.597 \frac{\text{tonf} \cdot \text{mm}}{\text{rad}}$$

$$K_{xx_e_gm} = K_{xx,sur_gm} * \eta_{xxgm} * \alpha_{xx} = 8,978,468.754 \frac{\text{tonf} \cdot \text{mm}}{\text{rad}}$$

$$K_{yy_e_gm} = K_{yy,sur_gm} * \eta_{yygm} * \alpha_{yy} = 38,598,531.764 \frac{\text{tonf} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$



AMORTIGUAMIENTO CRITICO (GAZETAS & MYLONAKIS)

Amortiguamiento critico corregido

Degree of Freedom	Radiation Damping
Translation along z-axis	$\beta_z = \left[\frac{4[\psi(L/B) + (D/B)(1+L/B)]}{(K_{z,emb}/GB)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_z} \right]$
Translation along y-axis	$\beta_y = \left[\frac{4[L/B + (D/B)(1+\psi L/B)]}{(K_{y,emb}/GB)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_y} \right]$
Translation along x-axis	$\beta_x = \left[\frac{4[L/B + (D/B)(\psi + L/B)]}{(K_{x,emb}/GB)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_x} \right]$
Torsion about z-axis	$\beta_{zz} = \left[\frac{(4/3) \left[3(L/B)(D/B) + \psi(L/B)^3(D/B) + 3(L/B)^2(D/B) + \psi(D/B) + (L/B)^3 + (L/B) \right] a_0^2}{\left(\frac{K_{zz,emb}}{GB^3} \right) \left[\left(\frac{1.4}{1+3(L/B-1)} \right) + a_0^2 \right]} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{zz}} \right]$
Rocking about y-axis	$\beta_{yy} = \left[\frac{(4/3) \left[\left(\frac{L}{B} \right)^3 \left(\frac{D}{B} \right) + \psi \left(\frac{D}{B} \right)^3 \left(\frac{L}{B} \right) + \left(\frac{D}{B} \right)^3 + 3 \left(\frac{D}{B} \right) \left(\frac{L}{B} \right)^2 + \psi \left(\frac{L}{B} \right)^3 \right] a_0^2 + \left(\frac{4}{3} \right) \left(\frac{L}{B} + \psi \right) \left(\frac{D}{B} \right)^3}{\left(\frac{K_{yy,emb}}{GB^3} \right) \left[\left(\frac{1.8}{1+1.75(L/B-1)} \right) + a_0^2 \right] + \left(\frac{K_{yy,emb}}{GB^3} \right)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{yy}} \right]$
Rocking about x-axis	$\beta_{xx} = \left[\frac{(4/3) \left[\left(\frac{D}{B} \right) + \left(\frac{D}{B} \right)^3 + \psi \left(\frac{L}{B} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^3 + 3 \left(\frac{D}{B} \right) \left(\frac{L}{B} \right) + \psi \left(\frac{L}{B} \right)^3 \right] a_0^2 + \left(\frac{4}{3} \right) \left(\psi \frac{L}{B} + 1 \right) \left(\frac{D}{B} \right)^3}{\left(\frac{K_{xx,emb}}{GB^3} \right) \left[\left(\frac{1.8}{1+1.75(L/B-1)} \right) + a_0^2 \right] + \left(\frac{K_{xx,emb}}{GB^3} \right)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{xx}} \right]$

β_{z_e}	β_{y_e}	β_{x_e}	β_{zz_e}	β_{yy_e}	β_{xx_e}
0.494	0.282	0.291	0.085	0.066	0.039

Tabla IX.- Amortiguamiento critico corregido

Coefficientes de Amortiguamiento por radiación

$$C_{z_gm} = \frac{2 * K_{z,sur_gm} * (0.05 + \beta_z)}{w} = 14.38 \text{ s.} \frac{\text{tonf}}{\text{mm}}$$

$$C_{y_gm} = \frac{2 * K_{y,sur_gm} * (0.05 + \beta_y)}{w} = 7.547 \text{ s.} \frac{\text{tonf}}{\text{mm}}$$

$$C_{x_gm} = \frac{2 * K_{x,sur_gm} * (0.05 + \beta_x)}{w} = 7.448 \text{ s.} \frac{\text{tonf}}{\text{mm}}$$

$$C_{zz_gm} = \frac{2 * K_{zz,sur_gm} * (0.05 + \beta_{zz})}{w} = 683,121.718 \text{ m.s.} \frac{\text{tonf}}{\text{rad}}$$

$$C_{yy_gm} = \frac{2 * K_{yy,sur_gm} * (0.05 + \beta_{yy})}{w} = 731,002.477 \text{ m.s.} \frac{\text{tonf}}{\text{rad}}$$

$$C_{xx_gm} = \frac{2 * K_{xx,sur_gm} * (0.05 + \beta_{xx})}{w} = 187,819.041 \text{ m.s.} \frac{\text{tonf}}{\text{rad}}$$

Estos valores efectivos del amortiguamiento, se procedieron a corregir por el empotramiento con las rigideces de Gazetas & Mylonakis,

$$C_{z_e_gm} = \frac{2 * K_{z_e_gm} * (0.05 + \beta_{z_e})}{w} = 15.938 \text{ s.} \frac{\text{tonf}}{\text{mm}}$$

$$C_{y_e_gm} = \frac{2 * K_{y_e_gm} * (0.05 + \beta_{y_e})}{w} = 10.157 \text{ s.} \frac{\text{tonf}}{\text{mm}}$$

$$C_{x_e_gm} = \frac{2 * K_{x_e_gm} * (0.05 + \beta_{x_e})}{w} = 9.445 \text{ s.} \frac{\text{tonf}}{\text{mm}}$$

$$C_{zz_e_gm} = \frac{2 * K_{zz_e_gm} * (0.05 + \beta_{zz_e})}{w} = 874198.393 \text{ m.s.} \frac{\text{tonf}}{\text{rad}}$$

$$C_{yy_e_gm} = \frac{2 * K_{yy_e_gm} * (0.05 + \beta_{yy_e})}{w} = 884764.407 \text{ m.s.} \frac{\text{tonf}}{\text{rad}}$$

$$C_{xx_e_gm} = \frac{2 * K_{xx_e_gm} * (0.05 + \beta_{xx_e})}{w} = 157133.341 \text{ m.s.} \frac{\text{tonf}}{\text{rad}}$$



INCORPORACION DE LOS COEFICIENTES DE GAZETAS & MYLONAKIS

Las propiedades de rigidez y amortiguamiento que se obtuvieron con las ecuaciones de Gazetas y Mylonakis se asignaron mediante la propiedad de *AreaSpring*

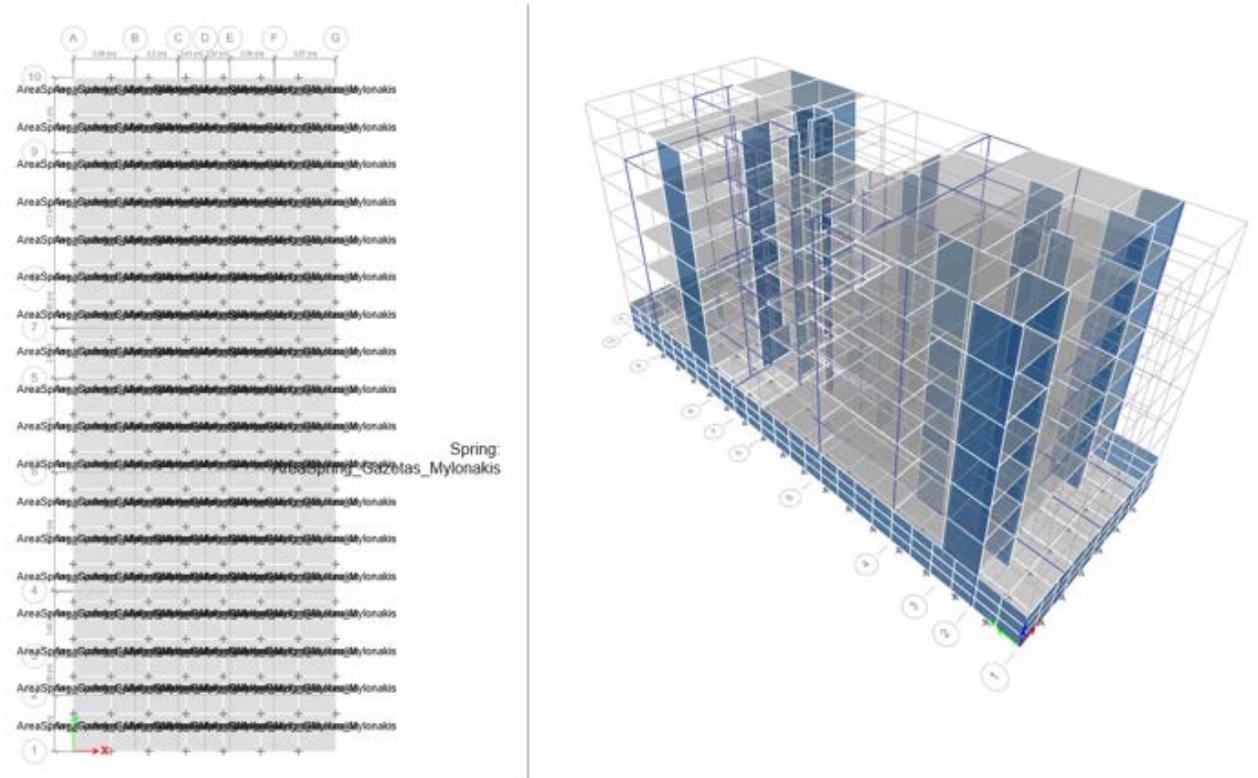


Figura XI.- Modelo con los coeficientes de Gazetas & Mylonakis



RESULTADOS DEL ANALISIS CON MODELOS DINAMICOS ISE

Las variaciones en el periodo de la edificación no fueron significativas, el sistema estructural de la edificación es en base a muros de corte que incorporan una rigidez superior a los demás sistemas.

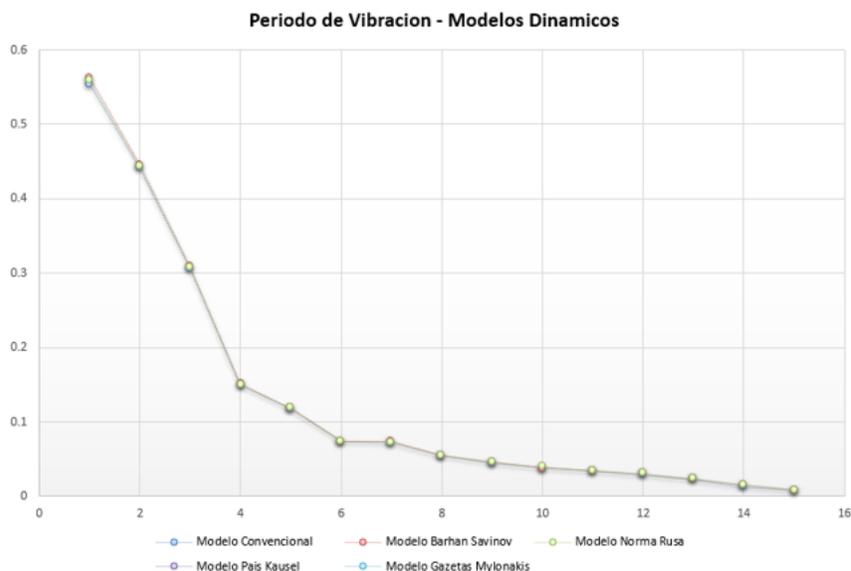


Figura XII.- Periodos obtenidos con el análisis convencional y modelos dinámicos de ISE.

Variación del periodo con los modelos dinámicos de ISE

Modo	Modelo Empotrado	Modelo Dinámico de Barkan-Savinov	Modelo Dinámico de la Norma Rusa	Modelo Dinámico de Gazetas-Mylonakis
1	0.554	0.563	0.558	0.562
2	0.441	0.446	0.443	0.445
3	0.306	0.309	0.308	0.309

Tabla X.- Periodos de la estructura con los coeficientes ISE

Modo	% de variación con el Modelo Dinámico de Barkan-Savinov	% de variación con el Modelo Dinámico de la Norma Rusa	% de variación con el Modelo Dinámico de Gazetas-Mylonakis
1	1.60%	0.72%	1.42%
2	1.12%	0.45%	0.90%
3	0.97%	0.65%	0.97%

Tabla XI.- Porcentajes de variación de los periodos



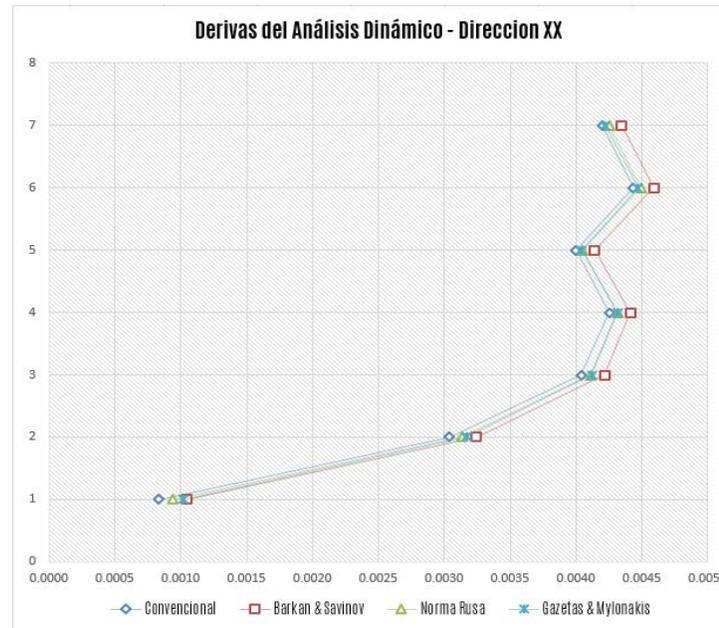
DERIVAS DE ENTREPISO CON LOS MODELOS DINAMICOS

Porcentajes de variación de las derivas en los modelos

Para el modelo de Barkan y Savinov, se observa un incremento en la deriva de 20.04% en el semi sótano de la estructura (nivel en contacto con la losa de cimentación), para el caso de la Norma Rusa el porcentaje de incremento en la deriva fue de 11.52%, mientras que para Gazetas y Mylonakis la variación fue del 18.12%. El promedio de variación de los tres modelos en el modelo con empotramiento convencional fue de 16.56%. Cabe señalar que la dirección xx' de la estructura es la dirección con menor rigidez del modelo estructural. En la dirección yy' el promedio de incremento es del 10.50%

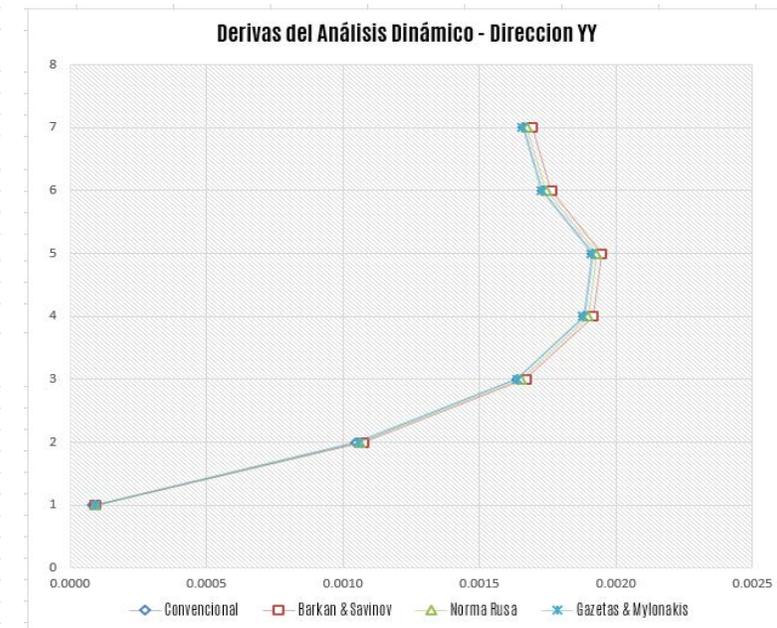
Nivel	Barkan Savinov	Norma Rusa	Gazetas & Mylonakis	Promedio
Azotea	3.34%	1.24%	0.55%	1.71%
Story5	3.44%	1.30%	0.79%	1.85%
Story4	3.44%	1.27%	1.09%	1.93%
Story3	3.62%	1.40%	1.37%	2.13%
Story2	4.25%	1.77%	2.02%	2.68%
Story1	6.29%	2.93%	4.07%	4.43%
Semi Sótano	20.04%	11.52%	18.12%	16.56%

Tabla XIV.- Porcentaje de variación en las derivas en la dirección xx'



Nivel	Barkan Savinov	Norma Rusa	Gazetas & Mylonakis	Promedio
Azotea	1.81%	0.74%	-0.25%	0.77%
Story5	1.67%	0.69%	-0.31%	0.69%
Story4	1.61%	0.67%	-0.32%	0.65%
Story3	1.63%	0.70%	-0.24%	0.70%
Story2	1.88%	0.89%	0.02%	0.93%
Story1	2.77%	1.49%	0.96%	1.74%
Semi Sótano	10.53%	8.68%	12.30%	10.50%

Tabla XV.- Porcentaje de variación en las derivas en la dirección yy'





ESFUERZOS CORTANTES CON LOS MODELOS DINAMICOS

Para los modelos de Barkan y Savinov, se observa un incremento en el esfuerzo cortante de 2.02% en el semi sótano de la estructura (nivel en contacto con la losa de cimentación), en los demás casos el incremento no es significativo en la dirección xx' de la estructura, que es la dirección con menor rigidez del modelo estructural. En la dirección yy' el mayor incremento de los esfuerzos cortantes fue para el modelo de Gazetas y Mylonakis, con 2.15% en los demás casos el incremento no es significativo.

Porcentajes de variación de los esfuerzos cortantes en los modelos

Nivel	Modelo Convencional (tonf)	Barkan Savinov (tonf)	Norma Rusa (tonf)	Gazetas & Mylonakis (tonf)
Azotea	46.17	46.65	46.05	43.98
Story5	109.65	111.01	109.98	108.17
Story4	163.87	165.98	164.50	162.43
Story3	205.44	208.32	206.41	204.33
Story2	234.93	238.57	236.24	234.12
Story1	252.28	256.72	253.97	251.83
Semi Sótano	260.95	266.23	263.03	261.09

Tabla XVI.- Fuerzas cortantes en la dirección xx'

Nivel	Modelo Convencional (tonf)	Barkan Savinov (tonf)	Norma Rusa (tonf)	Gazetas & Mylonakis (tonf)
Azotea	47.48	47.34	47.15	45.63
Story5	115.94	115.66	115.53	113.01
Story4	170.15	169.72	169.53	166.33
Story3	210.04	209.42	209.24	205.56
Story2	237.80	237.00	236.73	232.40
Story1	252.99	252.00	251.56	246.66
Semi Sótano	261.41	260.58	258.92	255.91

Tabla XVII.- Fuerzas cortantes en la dirección yy'

Nivel	Barkan Savinov	Norma Rusa	Gazetas & Mylonakis
Azotea	1.04%	0.26%	4.98%
Story5	1.24%	0.30%	1.37%
Story4	1.29%	0.38%	0.89%
Story3	1.40%	0.47%	0.55%
Story2	1.55%	0.56%	0.35%
Story1	1.76%	0.67%	0.18%
Semi Sótano	2.02%	0.80%	0.05%

Tabla XVIII.- Porcentaje de variación en las cortantes en la dirección xx'

Nivel	Barkan Savinov	Norma Rusa	Gazetas & Mylonakis
Azotea	0.30%	0.69%	4.04%
Story5	0.24%	0.36%	2.59%
Story4	0.26%	0.37%	2.30%
Story3	0.29%	0.38%	2.18%
Story2	0.34%	0.45%	2.32%
Story1	0.39%	0.57%	2.57%
Semi Sótano	0.32%	0.95%	2.15%

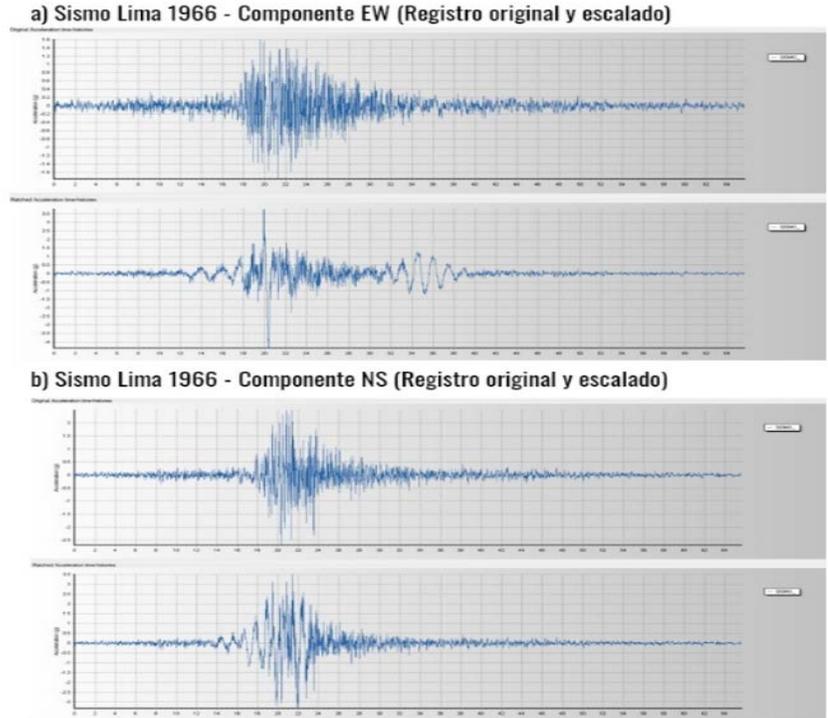
Tabla XIX.- Porcentaje de variación en las cortantes en la dirección yy'



VERIFICACION DE LOS MODELOS ISE DINAMICOS POR ATH

Se utilizo un análisis tiempo historia no lineal en la estructura, para evaluar la respuesta dinámica de las estructuras bajo cargas variables en el tiempo que se presentan en un sismo real.

El sismo seleccionado fue el sismo de Lima de 1966, el cual se procedió a escalar a un espectro de escalamiento con un factor de reducción $R=1$, considerando las recomendaciones de la norma técnica peruana E.030. En la Figura se aprecia los componentes del sismo de Lima EW y NS, en la imagen superior se observa el registro original y en la imagen inferior el sismo después del escalamiento.



Ficha Técnica de Sismo de Lima de 1966	
Estación donde se registró el sismo	Parque de la Reserva
Fecha del evento sísmico	17 de octubre de 1966
Profundidad del sismo	25 km
Magnitud en Escala de Richter	8.1 Mb
Numero de registros (Analogico)	3283
Pico de aceleración componente EW	-180.56 cm/s ²
Pico de aceleración componente NS	-268.24 cm/s ²
Frecuencia e Intervalo de registro	0.02s

Tabla XX.- Datos técnicos del evento sísmico de Lima 1966

Sismo de Lima 1966	Aceleración original		Aceleración escalada	
	EW	NS	EW	NS
Aceleración máxima (m/s ²)	1.8056	2.6824	4.3146	3.432
Aceleración en unidades de g	0.18g	0.27g	0.44g	0.35g

Tabla XXI.- Resultados del escalamiento del evento sísmico de Lima 1966



RESULTADOS DE DERIVAS POR ANALISIS TIEMPO HISTORIA

Porcentajes de variación de las derivas con los modelos de ISE - ATH

Para los tres modelos dinámicos, se aprecia un incremento de derivas por el ATH en promedio de 16,82% en la dirección XX' de la estructura, el mayor incremento es a nivel del semi sótano (nivel en contacto con la losa de cimentación) para el componente EW (Este Oeste) del sismo de Lima. Un resultado similar se observa para el componente NS (Norte Sur) del sismo de Lima.

En la dirección YY' el incremento de la deriva es de 6.89% para el componente EW, y de 14.73% para el componente NS del sismo de Lima de 1966.

Nivel	Barkan Savinov	Norma Rusa	Gazetas & Mylonakis	Promedio
Azotea	5.85%	3.13%	3.54%	4.17%
Story5	5.80%	3.04%	3.50%	4.12%
Story4	5.05%	1.91%	2.77%	3.25%
Story3	5.38%	2.36%	3.17%	3.63%
Story2	5.53%	1.97%	3.19%	3.56%
Story1	6.32%	3.01%	4.60%	4.65%
Semi Sótano	19.90%	11.66%	18.89%	16.82%

Tabla XXIV.- Porcentaje de variación en las derivas.
Sismo de Lima 1966 – EW, en la dirección xx'

Nivel	Barkan Savinov	Norma Rusa	Gazetas & Mylonakis	Promedio
Azotea	4.26%	2.50%	1.83%	2.86%
Story5	0.17%	-1.23%	-2.56%	-1.21%
Story4	-0.28%	-0.84%	-1.82%	-0.98%
Story3	0.00%	-0.61%	-1.39%	-0.67%
Story2	0.46%	-0.30%	-0.80%	-0.21%
Story1	1.38%	0.37%	0.27%	0.68%
Semi Sótano	7.22%	5.59%	7.85%	6.89%

Tabla XXV.- Porcentaje de variación en las derivas.
Sismo de Lima 1966 – EW, en la dirección yy'

Nivel	Barkan Savinov	Norma Rusa	Gazetas & Mylonakis	Promedio
Azotea	10.00%	2.50%	5.46%	5.99%
Story5	5.78%	1.28%	2.90%	3.32%
Story4	-0.31%	1.19%	-4.65%	-1.26%
Story3	1.31%	-0.79%	-1.20%	-0.22%
Story2	5.20%	2.34%	2.38%	3.31%
Story1	7.17%	3.42%	4.04%	4.88%
Semi Sótano	20.65%	11.92%	17.86%	16.81%

Tabla XXVIII.- Porcentaje de variación en las derivas.
Sismo de Lima 1966 – NS, en la dirección xx'

Nivel	Barkan Savinov	Norma Rusa	Gazetas & Mylonakis	Promedio
Azotea	4.97%	2.35%	2.58%	3.30%
Story5	4.77%	2.29%	2.43%	3.16%
Story4	4.93%	2.32%	2.63%	3.29%
Story3	4.99%	2.40%	2.74%	3.38%
Story2	5.18%	2.49%	3.04%	3.57%
Story1	5.16%	2.51%	3.32%	3.66%
Semi Sótano	16.53%	12.17%	15.48%	14.73%

Tabla XXIX.- Porcentaje de variación en las derivas.
Sismo de Lima 1966 – NS, en la dirección yy'



CONCLUSIONES

- Se llegó a determinar que los modelos dinámicos de ISE tienen efectos importantes sobre el comportamiento estructural de la edificación, llegando a incrementar las derivas de entrepiso, específicamente en el nivel de semi-sótano, que se encuentra en contacto directo con la cimentación, resultados obtenidos mediante el análisis modal espectral y el análisis no lineal tiempo historia establecido en la norma peruana E.030.
- Mediante la incorporación de los coeficientes dinámicos de Interacción Suelo Estructura dinámicos en el análisis estructural, se demostró que la modificación en las frecuencias de vibración del modelo estructural no es significativa, la variación del periodo se encuentra en un rango menor al 5% en comparación al modelo estructural con un análisis convencional que considera la base con restricción a desplazamientos en sus ejes traslacionales y rotacionales.
- En lo concerniente a los esfuerzos cortantes se apreció un incremento no significativo con los modelos de interacción suelo estructura, en promedio del 2.0%. La máxima variación obtenida fue del 4.04% para el modelo de Gazetas & Mylonakis en el último nivel de la estructura. La incorporación de los coeficientes de interacción suelo estructura dinámicos confirmaron el incremento de esfuerzos, sin embargo, para la zona de aceleración sísmica Zona 2 no se consideran significativas.
- El incremento en las derivas de entrepiso de la estructura, se consideran significativas habiendo obtenido en promedio un incremento del 16% en la dirección menos rígida de la edificación, mediante el análisis modal espectral y análisis no lineal tiempo-historia. En la dirección más rígida de la edificación el incremento también fue significativo, un 10% en el análisis modal espectral y 14% mediante el análisis tiempo historia.
- Los resultados obtenidos mediante el uso de los coeficientes dinámicos de interacción suelo estructura, muestran resultados con un mayor grado de realidad en el modelamiento, por lo cual es recomendable considerar la incorporación de la interacción suelo estructura dinámica en la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente E030.



GRACIAS

