



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

"INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA DE UNA EDIFICACIÓN CON LOSA DE CIMENTACIÓN CON LOS MODELOS ESTÁTICOS DE WINKLER Y PASTERNAK"

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

Winkler y Pasternak establecieron que la interacción suelo estructura entre la base de una estructura y el suelo de cimentación, se puede idealizar como un conjunto de resortes de rigidez que se desplazan como resultado de la carga aplicada sobre su superficie (Ubani, 2022). Los modelos estáticos permiten incorporar las propiedades dinámicas del suelo mediante modelos de comportamiento elástico lineal del suelo, facilitando los procedimientos de cálculo en función a las propiedades mecánicas obtenidas del estrato del suelo de fundación. Mediante la incorporación de los coeficientes estáticos obtenidos con las propiedades elásticas del suelo, en un modelo estructural es posible verificar si puede existir alguna variación en el comportamiento estructural del modelo (Villarreal, 2017). Considerando este preámbulo, en la investigación se plantea como objetivo: determinar si esas variaciones pueden ser significativas afectando el comportamiento estructural de la edificación que tiene como fundación una losa de cimentación. Se considera para ello las propiedades del suelo obtenidas de un estudio de mecánica de suelos (EMS), mediante el cual se determinó que el suelo se categoriza como S3, con un módulo de elasticidad $E_s=1150 \text{ tonf/m}^2$, coeficiente Poisson $\nu=0.30$ en el estrato de la zona de estudio. La zona sísmica se determinó como una zona de aceleración con $0.25g$. Los resultados se obtuvieron de la comparación del modelo con diseño sismorresistente que considera como parte de sus parámetros que el suelo de la cimentación es indeformable o de base fija, y los modelos con los coeficientes de ISE de Winkler y Pasternak. Mediante los resultados se llegó a concluir que existe un incremento significativo en la deformación lateral (deriva, *drift*), mientras que la variación en el periodo fundamental y la variación en el esfuerzo cortante en la edificación no fue significativa, considerando en parte que la estructura es altamente rígida por su sistema estructural de muros a corte.



METODOLOGIA

El estudio implica determinar si la influencia de los modelos estáticos de ISE, pueden modificar el periodo de la estructura, las derivas (deformaciones laterales) y los esfuerzos internos, principalmente en el nivel adyacente que, según el estudio realizado por Fernández, Fernández & Cobelo (2022) provoca que las fuerzas interiores se redistribuyan en los elementos estructurales y la cimentación. El estudio se enmarcó dentro de un análisis convencional por espectros, un análisis modal espectral que tiene como función principal determinar los periodos por modos de vibración, las fuerzas cortantes máximas probables y deformación lateral de entrepiso, otorgando la respuesta total por combinación cuadrática completa (CQC) que están basados en análisis estadísticos que determinan un valor máximo factible. El caso de estudio es una edificación diseñada con un sistema estructural en pórticos y muros a corte.

OBJETIVO PRINCIPAL

- Determinar si la influencia de los modelos estáticos de Winkler y Pasternak en el comportamiento estructural de una edificación con muros estructurales y losa de cimentación es significativa

OBJETIVO ESPECIFICO

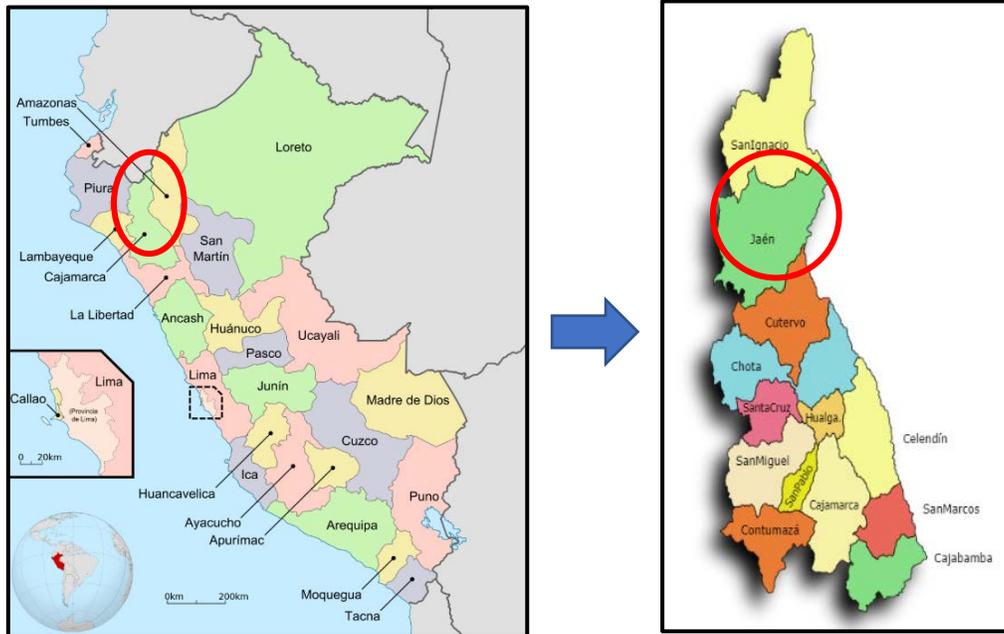
- Determinar si la ISE estática en los modelos de Winkler y Pasternak, pueden afectar al periodo fundamental de vibración de la estructura, a las derivas y los esfuerzos cortantes, aspectos fundamentales del comportamiento estructural de una edificación.



CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE LA ZONA

El estudio se realizó en la región de Cajamarca, 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.





PARAMETROS SISMICOS PARA EL ANALISIS MODAL ESPECTRAL

ANALISIS MODAL ESTRUCTURAL



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

Parámetros	Factor
Altura de edificación h_n	18.60 m
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
C	2.50

Tabla 1.- Parámetros normativos

PSEUDOACELERACIÓN

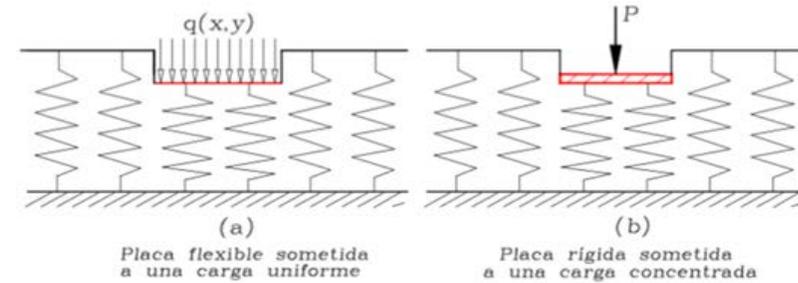
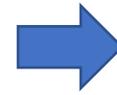
$$S_a = 0.145833g * 0.75(6) = 0.65625 g$$

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



Modelo de Winkler (1867)

El modelo de Winkler propone la representación bidimensional del suelo mediante resortes de rigidez, que se definen o conocen como el módulo de subrasante (C_1) que se pueden determinar de forma experimental o analítica



La teoría de Winkler propuso que existe una relación directamente proporcional entre cualquier punto de apoyo del suelo y la presión resultante de las cargas q y el desplazamiento generado ω (asentamiento del suelo bajo las cargas),

$$q(x, y) = K \omega (x, y)$$

Donde, los resortes tienen una rigidez K y se consideran como el módulo de balasto único que representa al terreno y que también se puede considerar como constante.

Módulo de balasto

Un estrato

$$C_1 = \frac{E_1}{h_1(1-2\nu_1^2)}$$

Dos estratos

$$C_1 = \frac{1}{\frac{h_1}{E_1}(1-2\nu_1^2) + \frac{h_2}{E_2}(1-2\nu_2^2)}$$

Donde:

E_1, E_2 : Módulos de elasticidad del suelo de los estratos 1 y 2

ν_1, ν_2 : Módulos de la relación de Poisson del suelo de los estratos 1 y 2

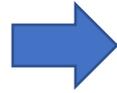
h_1, h_2 : Espesor de los estratos 1 y 2



Modelo de Pasternak (1954)

Módulo de balasto

El modelo de Pasternak propone la representación bidimensional del suelo mediante dos coeficientes de rigidez, el primero el módulo de subrasante propuesto por Winkler en la dirección vertical o a compresión, y el segundo que describe la rigidez de los empujes laterales del suelo en la cimentación



El cálculo del módulo de balasto puede definirse en función al número de estratos para uno y dos estratos, tal como se indica a continuación.

Un estrato

$$C_1 = \frac{E_1}{h_1(1-2\nu_1^2)}$$

$$C_2 = \frac{E_1 * h_1}{6(1-\nu_1)}$$

Dos estratos

$$C_1 = \frac{1}{\frac{h_1}{E_1}(1-2\nu_1^2) + \frac{h_2}{E_2}(1-2\nu_2^2)} \quad (5)$$

$$C_2 = \frac{1}{6(1-\varepsilon_2)} \left[\frac{E_1 * h_1}{6(1-\nu_1)} (3 + 3\varepsilon_2 + \varepsilon_2^2) + \frac{E_2 * h_2}{(1-\nu_2)} \right] \quad (6)$$

Donde:

E_1, E_2 : Módulos de elasticidad del suelo de los estratos 1 y 2

ν_1, ν_2 : Módulos de la relación de Poisson del suelo de los estratos 1 y 2

h_1, h_2 : Espesor de los estratos 1 y 2

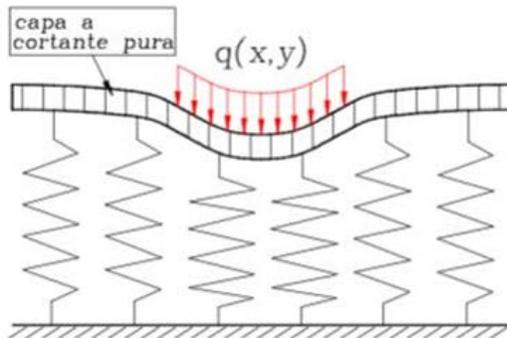


Figura II.- Modelo de Pasternak [8]



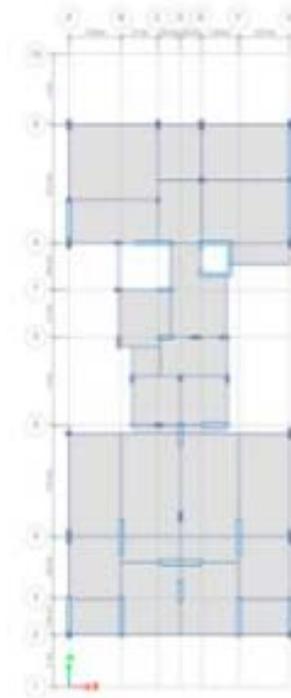
MATERIALES PARA EL MODELADO DE LA ESTRUCTURA

Propiedades de la estructura para el modelamiento

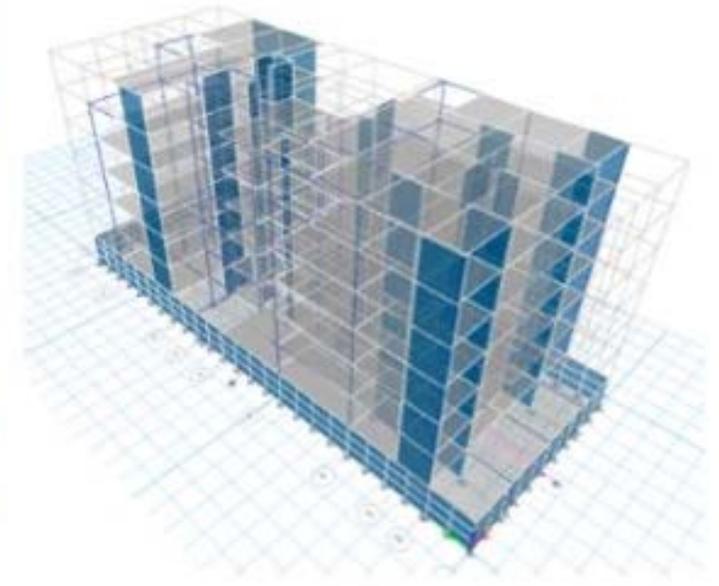
El modelo estructural es una estructura con **pórticos y muros estructurales**, losas aligeradas en los niveles superiores y una losa de cimentación de $e=0.40$ m. Para determinar las derivas de entrepiso en el centro de masa se utilizaron diafragmas rígidos para los elementos horizontales.

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



CARGAS PROPIAS y CARGAS VIVAS EN LA ESTRUCTURA

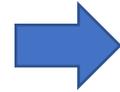
Cargas propias e impuestas en la estructura

CARGAS PERMANENTES DE LA EDIFICACIÓN

Nivel	Concepto	Carga (tonf/m2)
Semisótano al 5to piso	Tabique	0.140
	Acabado	0.100
	Ladrillo techo	0.090
	Cielo raso	0.050
	Total	0.380
Azotea	Ladrillo techo	0.090
	Cielo raso	0.050
	Total	0.140

CARGAS VIVAS DE LA EDIFICACIÓN

Nivel	Uso (Servicio)	Carga (tonf/m2)
Semisótano	Estacionamiento	0.25
Nivel 1	Vivienda	0.200
Nivel 2	Vivienda	0.200
Nivel 3	Vivienda	0.200
Nivel 4	Vivienda	0.200
Nivel 5	Vivienda	0.200
Azotea	Azotea	0.100



El peso sísmico de la edificación se determinó mediante la combinación de cargas definidas en la norma E.030:

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

Cargas a asignar el ETABS

Tipo	Niveles	Total (Tonf/m2)
Carga Permanente	Semisótano	0.380
	1° - 5°	0.380
	Azotea	0.140
Carga Viva	Semisótano	0.250
	1° - 5°	0.200
	Azotea	0.100

Tabla V.- Metrados de cargas en el modelo



INGRESO DE LAS PROPIEDADES DEL MODELO DE WINKLER

Propiedades del modelo estático de Winkler

- Clasificación del suelo : S3 – Suelo blando (EMS)
- Velocidad de onda : $V_S = 165$ m/s (Norma E.030)
- Módulo de elasticidad del suelo : $E_S = 1150$ ton/m²
- Coeficiente de Poisson del suelo : $\nu_1 = 0.30$
- Altura de estrato : $h_1 = 1.00$ m

Módulo de balasto

$$C_1 = \frac{E_1}{h_1(1-2\nu_1^2)}$$

$$C_1 = \frac{1150 \text{ ton/m}^2}{1.00 \text{ m} * (1 - 2(0.30)^2)} = 1402 \text{ tonf/m}^3$$

El coeficiente estático de Winkler fue incorporado en el modelo mediante el comando Area spring, para ello se procedió a discretizar la losa de cimentación. Después de generar el coeficiente C1, se seleccionó áreas discretizadas, y se procedió a asignar el coeficiente estático a la losa de cimentación del como se aprecia

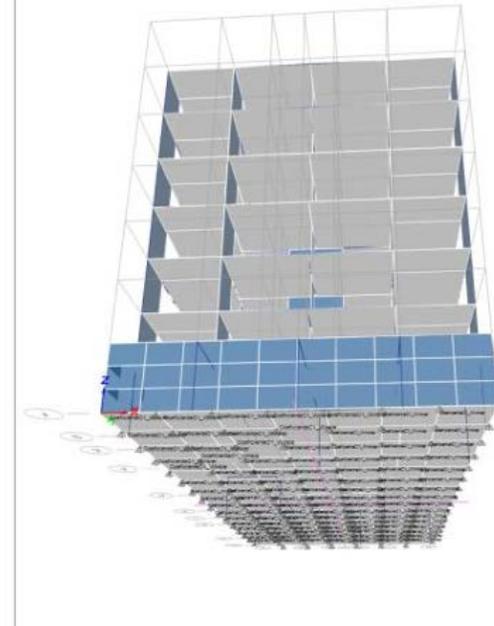
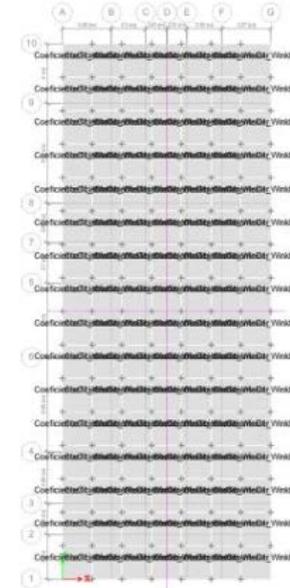


Figura V.- Modelo con los coeficientes estáticos de Winkler



INGRESO DE LAS PROPIEDADES DEL MODELO DE PASTERNAK

Coeficientes de interacción suelo estructura
estática de Pasternak.

Coeficiente vertical

$$C_1 = \frac{1150 \text{ ton}/\text{m}^2}{1.00 \text{ m} * (1 - 2(0.30)^2)} = 1402 \text{ tonf}/\text{m}^3$$

Coeficiente lateral

$$C_2 = \frac{E_1 * h_1}{6(1 - \nu_1)}$$


$$C_2 = \frac{1150 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2} * 1.00\text{m}}{6(1 - 0.30)} = 273.81 \text{ tonf}/\text{m}$$

El coeficiente vertical se incorporó de igual manera que el anterior y el coeficiente lateral C_2 de Pasternak se ingresó mediante el comando Spring Properties/Point Springs/ incorporando las propiedades en las direcciones horizontales de la losa de cimentación (traslacional en X e Y).

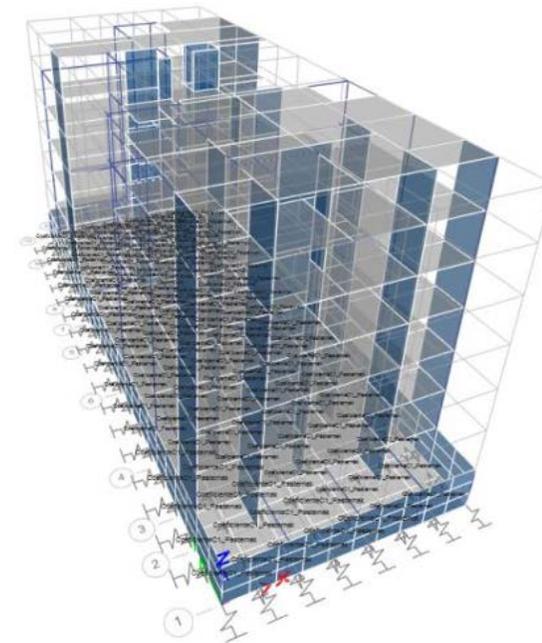


Figura VI.- Modelo con los coeficientes estáticos de Pasternak



RESULTADOS EN EL PERIODO CONVENCIONAL Y CON MODELOS ISE

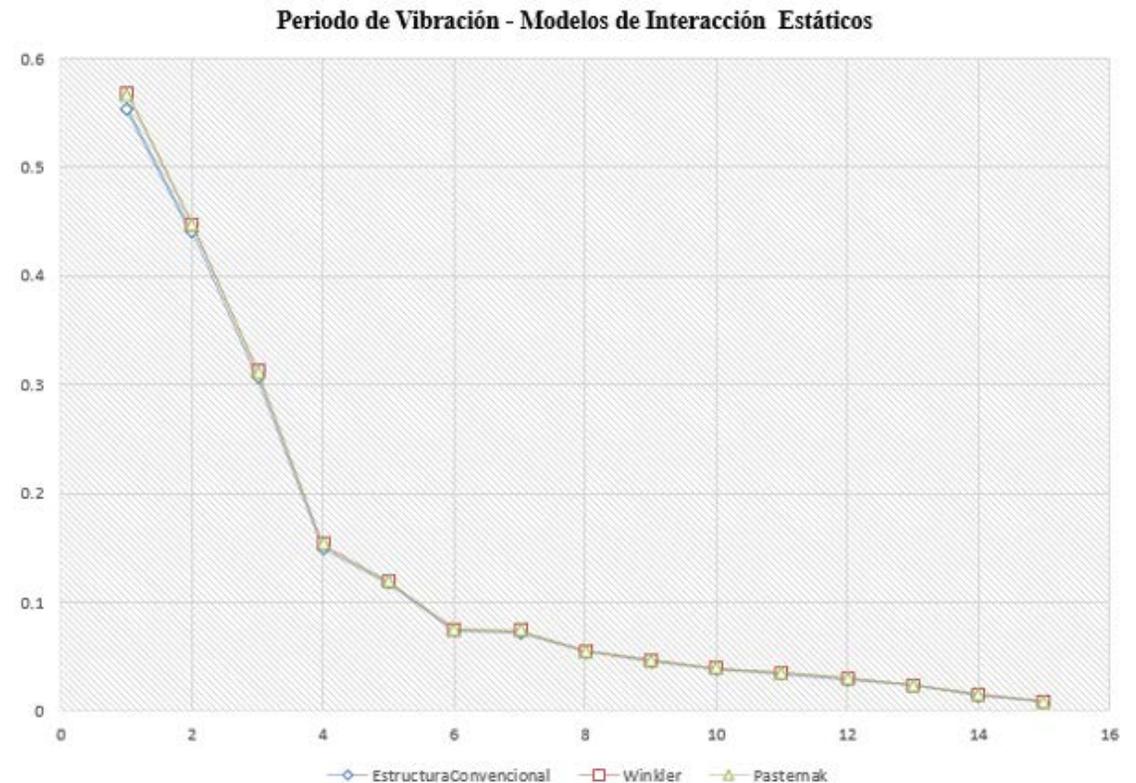
Periodo fundamental con el modelo de Winkler y Pasternak

Al incorporar los coeficientes estáticos de Winkler y Pasternak al modelo estructural se llegó a determinar que existe una variación en el periodo fundamental de la edificación poco significativa.

Modo	Modelo Convencional	Winkler	Pasternak	% de Variación Winkler % Δ	% de Variación Pasternak % Δ
Modal	1	0.568	0.567	2.46%	2.29%
Modal	2	0.448	0.448	1.56%	1.56%
Modal	3	0.313	0.311	2.24%	1.61%

Tabla VI. - Porcentajes de variación de los periodos

Periodos obtenidos con los coeficientes estáticos de Winkler y Pasternak





RESULTADOS EN DERIVAS DE ENTREPISO

Deriva de entrepiso del modelo estructural

Nivel	Dirección - XX			Dirección - YY		
	Modelo Empotrado	Winkler	Pasternak	Modelo Empotrado	Winkler	Pasternak
Azotea	0.0042	0.0044	0.0044	0.0017	0.0017	0.0017
Story5	0.0044	0.0047	0.0047	0.0017	0.0018	0.0018
Story4	0.0040	0.0042	0.0042	0.0019	0.0020	0.0020
Story3	0.0043	0.0045	0.0045	0.0019	0.0019	0.0019
Story2	0.0040	0.0043	0.0043	0.0016	0.0017	0.0017
Story1	0.0030	0.0033	0.0034	0.0010	0.0011	0.0011
Semisótano	0.0008	0.0012	0.0012	0.0001	0.0001	0.0001

Tabla VII.- Derivas en la dirección XX y YY

% de Variación con los modelos ISE Estáticos

Nivel	Dirección - XX			Dirección - YY		
	Modelo Empotrado	Winkler % Δ	Pasternak % Δ	Modelo Empotrado	Winkler % Δ	Pasternak % Δ
Azotea	0.0042	5.26%	5.12%	0.0017	3.43%	2.61%
Story5	0.0044	5.36%	5.25%	0.0017	3.27%	2.46%
Story4	0.0040	5.21%	5.21%	0.0019	3.01%	2.32%
Story3	0.0043	5.53%	5.54%	0.0019	3.06%	2.38%
Story2	0.0040	6.61%	6.63%	0.0016	3.53%	2.72%
Story1	0.0030	10.18%	10.24%	0.0010	5.16%	4.00%
Semisótano	0.0008	40.03%	40.69%	0.0001	26.70%	21.72%

Tabla VIII.- Porcentajes de variación de las derivas en los modelos



RESULTADOS EN EL ESFUERZO CORTANTE

Esfuerzo cortantes en el modelo estructural

	Modelo Empotrado		Winkler		Pasternak	
	Vx (Tonf)	Vy (Tonf)	Vx (Tonf)	Vy (Tonf)	Vx (Tonf)	Vy (Tonf)
Azotea	46.17	47.37	46.77	47.48	46.80	47.39
Story5	109.65	115.74	111.55	115.94	111.65	115.72
Story4	163.87	169.81	166.84	170.15	167.02	169.77
Story3	205.44	209.49	209.53	210.04	209.78	209.51
Story2	234.93	236.94	240.18	237.80	240.48	237.18
Story1	252.28	251.70	258.78	252.99	259.10	252.31
Semisótano	260.95	260.36	268.76	261.41	269.12	260.76

Tabla IX.- Fuerzas cortantes de entrepiso

% de Variación con los modelos ISE Estáticos

	Modelo Empotrado		Winkler		Pasternak	
	Vx (Tonf)	Vy (Tonf)	Vx % Δ	Vy % Δ	Vx % Δ	Vy % Δ
Azotea	46.17	47.37	1.30%	0.23%	1.36%	0.05%
Story5	109.65	115.74	1.73%	0.17%	1.82%	0.02%
Story4	163.87	169.81	1.81%	0.20%	1.92%	0.03%
Story3	205.44	209.49	1.99%	0.26%	2.11%	0.01%
Story2	234.93	236.94	2.23%	0.36%	2.36%	0.10%
Story1	252.28	251.70	2.58%	0.51%	2.70%	0.24%
Semisótano	260.95	260.36	3.00%	0.40%	3.13%	0.15%

Tabla X.- Porcentajes de variación de fuerzas cortantes de entrepiso



CONCLUSIONES

- Mediante el análisis de la estructura con la base empotrada y con los modelos de Interacción Suelo Estructura estáticos de Winkler y Pasternak, se llegó a determinar que los **coeficientes de rigidez pueden influir significativamente en el comportamiento estructural de la edificación**, pues se apreció un incremento significativo de las derivas de entrepiso específicamente con mayor incidencia en los primeros niveles de la edificación, por ende, se puede concluir que los modelos estáticos de ISE pueden influir y condicionar directamente el diseño estructural de una edificación.
- **La variación del periodo fundamental de la estructura no fue significativa**, considerando que la variación entre el modelo convencional y los modelos con los coeficientes ISE de Winkler y Pasternak se encuentran por **debajo del 5% de variación**. Se debe considerar que el resultado está condicionado al sistema estructural de la edificación que fue propuesta con muros a corte, no siendo el resultado aplicable a la tipología de estructuras de menor rigidez como las edificaciones en pórticos.
- **La variación en las derivas de entrepiso es significativa**, específicamente en el nivel que se encuentra en contacto con la losa de cimentación y que transmite las cargas al suelo. Se determinó que esta variación es del **40% en la dirección XX** de la estructura, dirección que presenta menor rigidez. Mientras que en **la dirección YY el máximo incremento de las derivas fue del 26%**. Mediante estos resultados se puede aseverar que los modelos estáticos de Winkler y Pasternak tienen influencias significativas en las deformaciones laterales de una edificación de concreto con losa de cimentación.
- **La variación en los esfuerzos cortantes no fue significativa**, en vista que los porcentajes de variación se encuentran por **debajo del 5%** al comparar la estructura con la cimentación empotrada y las estructuras con los modelos ISE de Winkler y Pasternak.



CONCLUSIONES

Tras haber realizado el estudio comparativo de una estructura empotrada con los modelos estáticos de ISE de Winkler y Pasternak es recomendable **incorporar el uso de los coeficientes de rigidez de ambos modelos en la norma peruana E030, en vista que se comprobó que existe una influencia significativa** en las deformaciones laterales que afectan a la estructura independientemente de la variación del periodo de vibración de la estructura y la distribución de esfuerzos cortantes de entrepiso.



GRACIAS

