

INFLUENCIA DE LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA EN TORRE AUTOSOPORTADA SOMETIDA A CARGA DINÁMICA DE VIENTO

Dania Pereira Fernández¹, Aldo Fernández Limés², Willian D. Cobelo Cristiá³.

¹Ingeniera civil, Empresa Emprestur S.A, Ave. 31 #7634 e/76 y 100, Marianao, La Habana Cuba, daniapereiraf@gmail.com

²Ingeniero civil, Universidad Tecnológica de la Habana "José A. Echeverría", Facultad de Ingeniería Civil, Calle 114 #11901, e/ Rotonda y Ciclovía, Marianao La Habana Cuba, afernandezl@civil.cujae.edu.cu

³Ingeniero civil, Doctor en ciencias técnicas, Universidad Tecnológica de la Habana "José A. Echeverría", Facultad de Ingeniería Civil, Calle 114 #11901, e/ Rotonda y Ciclovía, Marianao La Habana Cuba, wcobelo@civil.cujae.edu.cu

RESUMEN

Los estudios de comportamiento estructural mediante modelación computacional frecuentemente desprecian la interacción suelo estructura (ISE) considerando a los apoyos empotrados, esta simplificación puede inducir imprecisiones en la respuesta estructural y una subestimación de las fuerzas interiores y los desplazamientos de las estructuras bajo estudio, lo que puede provocar errores en el diseño. Este trabajo analiza la influencia de la ISE en la respuesta estructural de una torre autosoportada sometida a la acción de una carga de viento dinámica. El análisis de la acción de la carga de viento sobre la torre, se presenta a través de dos métodos: el factor efecto de ráfaga y el de dominio del tiempo. La consideración de la ISE se analizó a través del método dinámico de Sargsyan y la no consideración a través de apoyos empotrados, con el objetivo de obtener desplazamientos, fuerzas interiores y hacer un análisis sobre la capacidad resistente de los elementos. Se determinó que la ISE tiene influencia en la disminución de las frecuencias de oscilación y en el incremento de los desplazamientos horizontales en la torre para ambos métodos de análisis del viento y produce además cambios en las fuerzas interiores y en la relación demanda-capacidad de algunos elementos que conforman la estructura. Por tanto, su efecto debe ser considerado en el diseño de torres autosoportadas con cimientos aislados sobre suelo blando.

Palabras claves: Cargas dinámicas de viento, interacción suelo-estructura, modelación computacional, suelo compresible, torres autosoportadas.

INFLUENCE OF SOIL STRUCTURE INTERACTION ON SELF-SUPPORTED TOWER UNDER DYNAMIC WIND LOAD

ABSTRACT

Structural behavioral studies using computational modeling frequently disregard soil structure interaction (SSI) and consider fixed supports, this simplification can lead to underestimation of the structural response, forces and displacements of the structure under study, which can cause design errors. This work analyzes the influence of SSI on the structural response of a self-supporting tower subjected to the action of a dynamic wind load. The analysis of the wind load in the tower is presented through two methods: the gust response factor and the time domain method. The consideration of the SSI was analyzed through the dynamic Sargsyan method and the non-consideration through fixed supports, with the objective of obtaining displacements, internal forces and make an analysis on the resistant capacity of the elements. It was determined that SSI has influence in tower's oscillation frequencies decrease and structure's horizontal displacements increase for both wind analysis methods; produces changes in the internal forces and in the capacity demand relationship of some tower's elements. Therefore, its effect must be considered in the design of self-supporting towers with isolated foundations on soft soil.

Keywords: Computational modeling, dynamic wind loads, self-supporting tower, soft soil, soil-structure interaction

Nota Editorial: Recibido: noviembre 2020; Aceptado: marzo 2021

1. INTRODUCCIÓN

La interacción suelo estructura (ISE) es un fenómeno muy complejo y heterogéneo debido a la diversidad de causas que la generan, es por ello que no existe una definición única del problema. En la bibliografía relacionada con el tema, los autores brindan varias definiciones, según Kausel [1] la ISE se refiere al fenómeno estático o dinámico que ocurre entre una estructura rígida y el suelo bajo ella y para Garg, et al. [2] la ISE es sólo un fenómeno interdisciplinario que envuelve a la ingeniería estructural y geotécnica. La ISE es aquella

parte de la ingeniería que estudia las deformaciones del terreno de cimentación cuando estas se ven afectadas por la presencia y rigidez de la propia estructura. Esta puede ser en condiciones, dinámicas [3] o estáticas [4].

Para dar solución a los problemas de ISE es necesario hacer simulaciones matemáticas que modelen el comportamiento más aproximado a la realidad del suelo a partir de seleccionar correctamente los modelos constitutivos. Según González-Cueto, et al. [5] los modelos constitutivos son expresiones matemáticas que expresan la relación esfuerzo deformacional de un material. Todos los aspectos que influyen en la respuesta mecánica del suelo bajo condiciones determinadas de cargas no es posible tenerlas en cuenta, por lo tanto, se necesitan idealizaciones, tanto del material como de las condiciones de carga, para simplificar la expresión matemática. Estas idealizaciones incorporan las principales propiedades del material, excluyéndose los aspectos considerados de menor importancia. Estos modelos deben estar en función del tipo de análisis que se desee hacer (estático o dinámico) [2]. La búsqueda de modelos de comportamiento para describir la ISE se ha desarrollado básicamente en dos vertientes, los modelos discretos que tienen su base en la hipótesis de Winkler en donde el suelo se sustituye por resortes con una rigidez determinada y los continuos donde el suelo es modelado de forma íntegra [6], siendo esta idealización más cercana al comportamiento real, pero requieren de un mayor costo computacional debido a que en su solución es necesario el empleo de métodos numéricos. Los estudios de ISE se han realizado para todo tipo de estructuras incluyendo torres de aerogeneradores, telecomunicaciones o de transmisión eléctrica [7].

Las torres autosoportadas son estructuras empleadas en la industria de la radio, la televisión y la telefonía, en la actualidad cobran gran importancia por el auge a nivel internacional de la digitalización de las telecomunicaciones. Esta es la causa por la cual la construcción de las mismas ha tenido un avance vertiginoso y se han ampliado las funciones de las ya existentes. Estas son consideradas estructuras delgadas, con características estructurales de bajo amortiguamiento y flexibles, lo que las hace altamente vulnerables a la acción de las cargas ecológicas, principalmente las cargas de viento provenientes de ciclones y huracanes que inciden en Cuba, considerándose esta una de sus causas de fallo, por lo que supone un daño económico, social y político [8]. El daño de las estructuras también dependerá entre otros factores, del tipo de suelo bajo la cimentación, y los efectos de la interacción entre ellos (ISE), que pudieran producir un incremento en el período fundamental de vibración de la estructura [9].

En estudios de la influencia de la ISE sobre estructuras tipo torre, específicamente torres de aerogeneradores, Shah, et al. [10] y Huo, et al. [11] determinaron que modifica los periodos de oscilación. Por su parte Huo, et al. [11] agrega que se incrementan los desplazamientos no así las fuerzas interiores. En el trabajo de Krathe, et al. [12] se estudió la influencia que pueden tener la rigidez y el amortiguamiento del suelo en el análisis de un aerogenerador ubicado mar adentro. La cimentación fue concebida como un mono-pilote con comportamiento histerético no lineal representado a través de resortes paralelos perfectamente plásticos. La carga de viento fue aplicada como *time history*. En este trabajo se llegó a la conclusión de que el amortiguamiento del suelo influye en la disipación de energía y altera la respuesta cíclica de la estructura. Chen [7] en su trabajo evaluó la influencia que puede tener la ISE en una torre de transmisión de electricidad sometida a cara de viento extremo donde concluye que la consideración de la ISE influye en el incremento de los desplazamientos horizontales en la punta de la torre y las tensiones. La influencia que puede tener la forma de aplicación de las cargas en la ISE fue evaluado por Dixit, et al. [13] y Türkeli [14] en una chimenea donde la carga de viento fue tenida en cuenta de forma distribuida y concentrada en distintos puntos, de los resultados obtenidos, se aprecia como el efecto de la forma de aplicación de la carga no influye significativamente en los desplazamientos de la chimenea.

Kaminski Jr, et al. [15] estudiaron la ruptura de una línea de transmisión en una torre autosoportada de 190 m de altura sobre suelo blando; para ello se analizó el comportamiento de la cimentación diseñada, y se estableció comparaciones a través de un análisis dinámico del suelo con métodos analíticos considerando la ISE y sin considerarla. Del estudio se concluye, que la ISE trae modificaciones en las fuerzas interiores y los desplazamientos, aunque para su caso de estudio, la cimentación resultó que se comportaba como un empotramiento.

Alvarez Konkov, et al. [16] realizaron un estudio de la influencia de la ISE en una torre autosoportada sometida a carga de viento extremo en el que se concluye que en las fuerzas interiores no se aprecian variaciones significativas; en cambio para el análisis de los desplazamientos y los modos de oscilación de la estructura sí varían al considerar un análisis de interacción suelo-estructura.

Este trabajo tiene como objetivo determinar la influencia que tiene la ISE en una torre autosoportada de 60 metros de altura sobre suelo de alta compresibilidad, en el estudio se evalúa el efecto de la componente

dinámica para el análisis de la acción de la carga de viento. Los métodos de carga dinámica de viento que se comparan fueron: estático equivalente y dominio del tiempo. Entre los métodos estáticos equivalentes más reconocidos por las normativas se encuentra el "Factor Efecto de Ráfaga" (FER) para las torres autoportadas [17], que se empleó con las particularidades planteadas por el EC 3: Part 3-1 [18]; y el de dominio en el tiempo, método que logra una mayor aproximación al comportamiento real del viento, al tener en cuenta la influencia de cinco funciones variables en el tiempo generadas en Matlab para describir el comportamiento estocástico de la velocidad del viento. En este trabajo se realizó una comparación de la respuesta de la estructura a través de ambos métodos de análisis del viento teniendo en cuenta la ISE en una primera variante, a través del modelo dinámico de Sargsyan [19] y en una segunda variante simulando un empotramiento perfecto entre cimiento y suelo. Los parámetros a evaluar fueron el comportamiento de la frecuencia de oscilación, los desplazamientos en el extremo superior de la torre, las fuerzas interiores y aunque no es objetivo de este trabajo diseñar, se evaluó también la relación demanda-capacidad para una única dirección de viento y de esta manera analizar la influencia que pudiera tener la ISE en esta variable.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

Estructura y modelación

Para evaluar el efecto de la ISE, se decidió tomar como objeto de estudio una torre autoportada para telecomunicaciones de 60 m de altura, modelo GT60, que alcanza una altura de 66 m cuando se incluye un mástil de sección triangular donde se colocan las antenas.

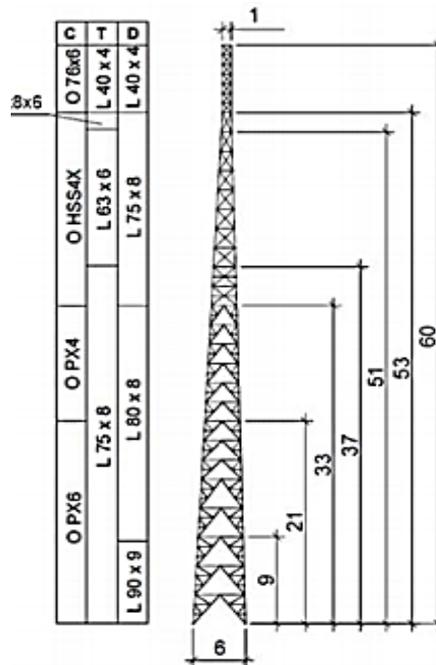


Figura 1: Tramos y secciones de la torre

El material que conforma a la torre es acero tipo A992Fy50 (tensión de fluencia $F_y = 345$ MPa y tensión de rotura $F_u = 450$ MPa) para las columnas y para los tranques y diagonales es A36 (tensión de fluencia $F_y = 250$ MPa y tensión de rotura $F_u = 400$ MPa). Las propiedades del acero se consideraron linealmente elásticas y constantes en el tiempo. En la figura 1 se presenta la distribución y las características de los elementos estructurales de la torre de forma detallada.

La modelación y análisis se realizó a partir del trabajo realizado por el grupo de aerodinámica de la Universidad Tecnológica de la Habana (CUJAE) donde se definió a la torre como una armadura espacial empleando el software SAP2000. Los elementos de la armadura fueron modelados como barras, las columnas se consideraron continuas desde la base hasta el tope y se encuentran arriostradas por los tranques cuya función es rigidizar la estructura. Las uniones de todos los tranques y diagonales se consideran articuladas.

Condiciones de apoyo

Las condiciones de apoyo fueron modeladas con dos variantes. En la primera se modeló la ISE, colocando resortes en cada apoyo de la torre para representar el suelo de soporte. Los coeficientes de rigidez obtenidos por las formulaciones que presenta el modelo dinámico de Sargsyan considerando un suelo deformable fueron asignados a estos resortes. En la segunda variante se modeló la unión en cada apoyo como empotrada restringiendo los desplazamientos y giros de la torre en todas las direcciones.

El modelo dinámico de Sargsyan [19], considera al medio como un material inercial elástico homogéneo isotrópico y define los coeficientes cuasi estáticos de rigideces al desplazamiento y al giro de la base de la cimentación K_x , K_ϕ , K_z ; que se determinan por las ecuaciones 1, 2 y 3.

$$K_x = K_y = \frac{28.8(1 - \mu^2)\rho C_2^2}{\sqrt{\pi}(7 - 8\mu)}\sqrt{A} \quad (1)$$

$$K_z = \frac{\rho C_2^2 I \sqrt{A}}{\Phi(1 - \mu^2)} \quad (2)$$

$$K_\phi = \frac{8.52\rho C_2^2 I}{\sqrt{\pi}(1 - \mu)\sqrt{A}} \quad (3)$$

Donde: ρ densidad del suelo de cimentación; A es el área de la base de la cimentación; I el momento de inercia de la base de la cimentación respecto al eje horizontal, que pasa por el centro de gravedad perpendicular al plano de vibración; μ es el coeficiente de Poisson; C_2 es la velocidad de propagación de las ondas transversales.

De acuerdo a la concepción de semiespacio elástico, las velocidades de propagación de las ondas longitudinales y transversales se pueden calcular según la ecuación 4, donde: E es módulo de elasticidad del suelo en contacto con la base de cimentación.

$$C_2^2 = \frac{(1 - \mu)E}{(1 - \mu)(1 - 2\mu)\rho} \quad (4)$$

En la tabla 1 se presentan las propiedades físico-mecánicas del suelo y los valores de los coeficientes de rigidez obtenidos por las ecuaciones 1, 2 y 3.

Tabla 1: Propiedades y de rigideces del suelo de alta compresibilidad

Suelo de alta compresibilidad (blando)	Propiedades del suelo objeto de estudio				Rigideces del suelo por método de Sargsyan			
	C(kPa)	(φ)°	γ_f (kN/m ³)	E_0 (kPa)	$K_x = K_y$ (kN/m)	K_z (kN/m)	$K_{\phi y}$ (kN/m)	$K_{\phi x}$ (kN/m)
	15	-	16	2000	9365	8799,18	19124	8978,75

Análisis de cargas

Las cargas analizadas para este trabajo fueron el peso propio de los elementos estructurales y la carga de viento extrema, para una velocidad de referencia de 24m/s. La determinación del valor de la carga de viento se hizo a través de dos métodos: "Factor de Efecto de Ráfaga" (FER) y el método de "Dominio del Tiempo" (MDT). Las torres triangulares se analizan para tres direcciones de viento, en este caso solo se trabajó con una de ellas, la de 90 grados pues el objetivo no es diseñar la estructura sino verificar el efecto de la ISE en las variables a estudiar, figura 2. Para el análisis de los desplazamientos se utilizó la combinación de servicio G+W; y para las fuerzas interiores y el estudio de demanda capacidad la combinación empleada fue

1.2G+1.4W ambas obtenidas de la NC 450 [20].

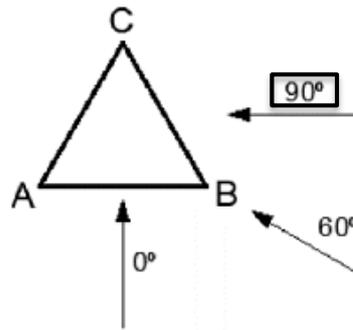


Figura 2: Direcciones del viento

Método factor efecto de ráfaga (FER)

Para la determinación de la carga de viento por el método (FER) se empleó la metodología del Eurocódigo para torres EC 3: Part 3-1 [18] empleada por Fernández, et al. [17]. La fuerza del viento a aplicar sobre la torre de acuerdo al método “Factor de Efecto de Ráfaga” se obtiene de la ecuación 5.

$$F_t = \frac{F_m}{1 + 7I_{(ze)}} [1 + (1 + 0,2(z_m/h)^2) \frac{2I_{(ze)} \sqrt{g_{lb}^2 B_l^2 + k_p^2 R_l^2}}{c_0}] \tag{5}$$

De la ecuación 5, el término entre corchetes es el coeficiente de respuesta dinámica del viento. Donde la intensidad de turbulencia es $I_{(ze)} = 0,2$; la altura de la torre es $h = 60\text{ m}$; z_m es la altura donde es aplicada la carga; g_{lb} es el factor pico para la componente no resonante, k_p es el factor pico para la componente resonante que depende del intervalo de promediación de la velocidad media y de la frecuencia de oscilación de la estructura; el factor de respuesta no resonante al viento ($B_l = 0,9$) que depende del ancho promedio ($b=3,5\text{m}$), altura (h) y de la escala de la turbulencia ($L_v=156,48\text{m}$) y R_l es el factor de respuesta resonante al viento que depende de las dimensiones de la estructura, el espectro, la frecuencia y escala de turbulencia. El término F_m es la componente estática y está dada por la ecuación 6; donde C_h es el coeficiente de altura, C_t es el coeficiente de recurrencia, C_r es el coeficiente de ráfaga, C_f es el coeficiente de forma, A_{ref} es el área de referencia y q_{10} es la presión del viento a una altura (z) determinada por la ecuación 7.

$$F_M = q_{10} C_h C_t C_r C_f A_{ref} \tag{6}$$

$$q_{10} = 1/2 \rho_a \bar{U}(z)^2 \tag{7}$$

Donde ρ_a es la densidad del aire en condiciones de atmósfera neutra, que se considera constante igual a $1,25\text{ kg/m}^3$ para una temperatura de 25°C ; $\bar{U}(z)$ es la velocidad del viento variable con la altura obtenida a través del perfil logarítmico, se obtiene a partir de la velocidad de referencia y está en función de la velocidad de fricción ($u_{fric}=1,81\text{m/s}$) y la rugosidad del terreno ($z_0=0,05\text{m}$).

Método de dominio del tiempo

El método de dominio del tiempo (MDT) , simula la acción del viento a través de series temporales de velocidad obtenidas a partir de sus componentes media y turbulenta, lo que brinda un mayor acercamiento a la realidad del comportamiento estocástico del viento a través de funciones de velocidad dependientes del tiempo, por lo que ninguna simulación es igual a otra [17].

Para la determinación de las funciones de velocidad, la intensidad, escala y el espectro de turbulencia se asumieron de la misma forma que en el método estático equivalente para establecer una equivalencia en cuanto al campo de viento creado. En la determinación de la carga de viento a través del método dominio del tiempo se siguió la metodología de planteada por Fernández, et al. [17] donde se especifica, que para los propósitos del cálculo estructural, las fuerzas de viento inducidas sobre las torres pueden ser expresadas como la suma de la fuerza media ($\bar{F}(z)$) y la fuerza fluctuante ($F_u(z, t)$).

$$\bar{F}(z) = 1/2 \rho_a C_a A_{ref} \bar{U}(z)^2 \tag{8}$$

$$F_u(z, t) = \rho_a C_a A_{ref} \bar{U}(z) u(z, t) \tag{9}$$

En las ecuaciones 8 y 9 C_a es el coeficiente de forma; A_{ref} es el área de referencia, que representa el área frontal de los miembros que integran cada tramo en los que fueron divididas las estructuras; $\bar{U}(z)$ es la velocidad media variable con la altura, obtenida de la misma manera que en el análisis estático equivalente y $u(z, t)$ es la velocidad turbulenta para cada una de las alturas en la que fue dividida la torre, generada estocásticamente con apoyo del software Matlab.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis modal

Para determinar el efecto que tiene la ISE en las características dinámicas de la torre se hizo un análisis de los primeros 4 modos de oscilación de la estructura. Según estudios realizados por Scarfone, et al. [21], Shah, et al. [10] y Huo, et al. [11] las frecuencias de los modos de oscilación son de los parámetros más susceptibles al efecto de la ISE. La frecuencia de la estructura para aplicar el método estático equivalente se determinó a través de un análisis modal realizado con el programa SAP-2000 con base en el método de elementos finitos, mediante el método de Eigenvector, teniendo en cuenta el efecto de la ISE y sin considerarlo. En la figura 3 se muestran los valores de las frecuencias de los modos de oscilación, con y sin el efecto de la ISE.

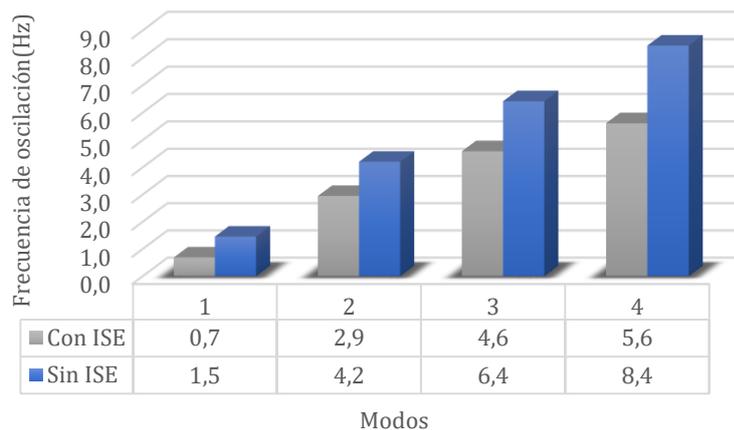


Figura 3: Frecuencias de oscilación con ISE y sin ISE para 4 modos

Para el modo 1 (principal) la disminución de la frecuencia de oscilación cuando hay ISE es de un 53%, alcanzando valores por debajo de 1 Hz (o por encima de 1s en términos de período). Esta modificación produce que la estructura sea susceptible a los efectos dinámicos. Para el resto de los modos, aunque para el análisis de la estructura no tienen influencia, esta diferencia es de alrededor de un 30%.

Con los valores de frecuencia de oscilación del primer modo se determinaron los valores de carga de viento por el método FER considerando la ISE y sin considerarla. En la tabla 2 se resumen los resultados de los principales parámetros del método FER con análisis dinámico calculados para la torre.

Tabla 2: Valores obtenidos de la aplicación del método Factor Efecto de Ráfaga

Parámetros	Sin ISE	Con ISE
kp	3,39	3,37
R	0,18	0,38

Al disminuir la frecuencia de oscilación cuando se considera la ISE, ocurren modificaciones en los valores de

los parámetros dinámicos del método FER, generando un incremento en el valor del factor resonante (R), en consecuencia, el valor de la carga de viento con la ISE aumenta en un 5,5%.

Desplazamientos horizontales

El desplazamiento horizontal en las torres de telecomunicaciones es uno de los parámetros más importantes a considerar en el diseño porque influye directamente en la funcionalidad de las antenas. Los resultados obtenidos aparecen en la figura 4.

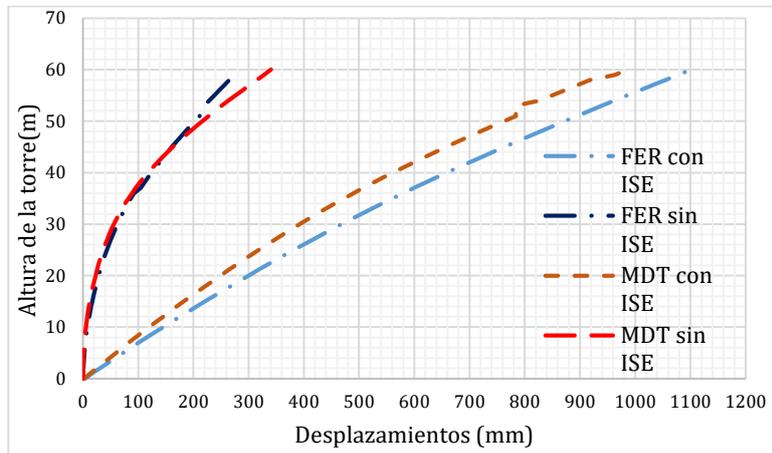
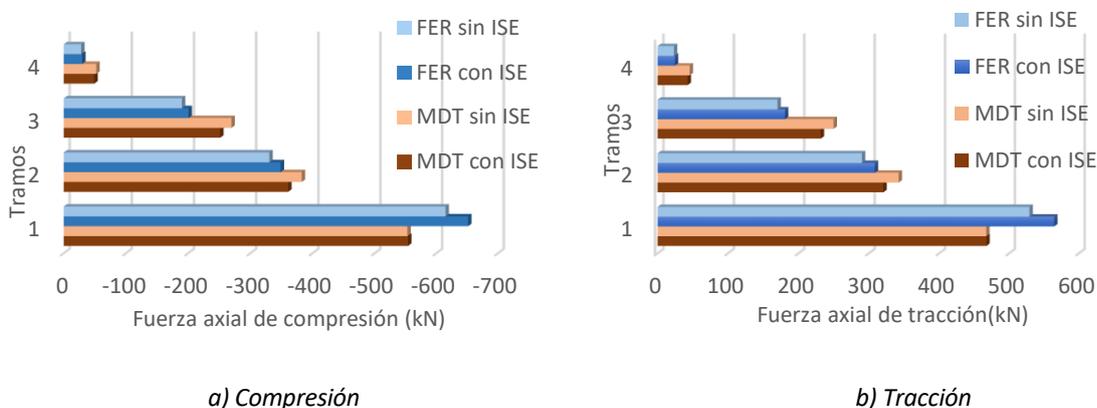


Figura 4: Desplazamientos horizontales en la torre

De la figura 4 se corrobora que los desplazamientos obtenidos cuando se considera la ISE son mayores con relación a los casos donde no se considera ISE. En la altura máxima de la torre existe un incremento en los desplazamientos de un 75% con el FER y de un 65% con el MDT. Cuando se tuvo en cuenta la ISE el desplazamiento a la altura máxima de la torre obtenido a través del FER es un 10% mayor que el obtenido con el MDT. Para el análisis sin ISE, el MDT genera un desplazamiento 24% mayor que el obtenido por las FER.

Fuerzas interiores

Los resultados se presentan para los distintos tipos de elementos estructurales (columnas, tranques y diagonales), estos se dividieron por tramos en función de las distintas secciones transversales que presentan, de cada tramo se tomó el valor máximo para el análisis. En las figuras 5a) y 5b) se muestran los resultados de las fuerzas interiores para las columnas. Se aprecia cómo el efecto de la ISE no es significativo en los valores de las fuerzas interiores en las columnas mostrando diferencias del 5 al 7% en los valores de fuerza axial.



a) Compresión

b) Tracción

Figura 5: Fuerzas interiores en columnas

En un análisis comparativo entre el efecto de los métodos de análisis del viento (MDT y FER), se aprecia que existen diferencias significativas en los valores de fuerzas interiores, siendo la fuerza obtenida por el FER mayor en el primer tramo de la torre y la obtenida por el MDT mayor en los otros tres tramos con valores que oscilan entre el 11 y el 50% de diferencia.

En las figuras 6a) y 6b) se representan los valores de las fuerzas interiores en las diagonales de la torre.

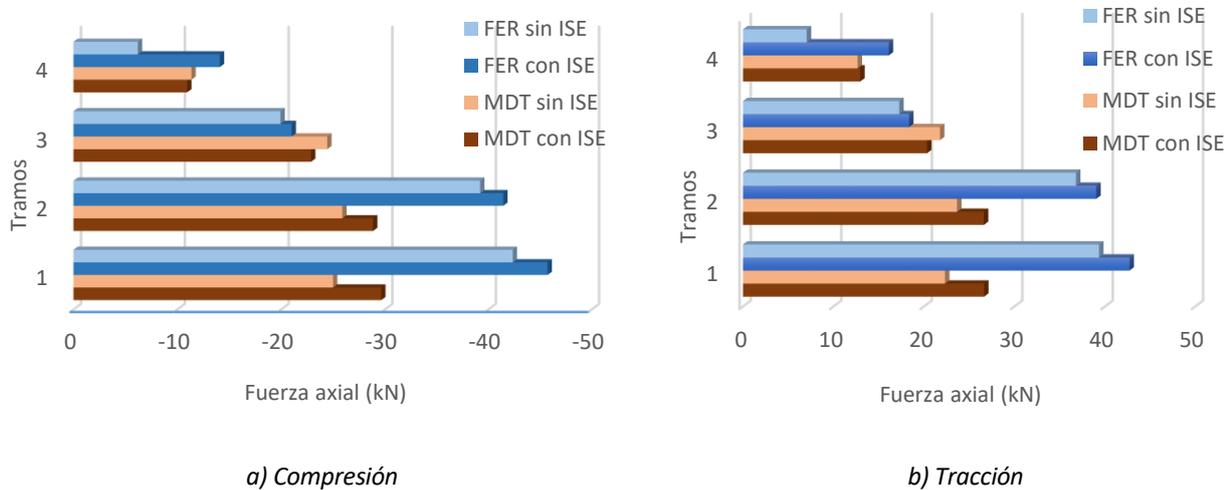


Figura 6: Fuerzas interiores en diagonales

En la figura 6 se muestra que en las diagonales el efecto de la ISE en las fuerzas interiores de tracción y compresión es más acentuado en el análisis a través del FER, se obtuvieron diferencias de un 56% en el último tramo de la torre, mientras que en el análisis a través de MDT las diferencias fueron del 10 a 16% en los primeros dos tramos de la torre.

En la comparación entre los dos métodos de análisis del viento también hubo diferencias marcadas que oscilan desde un 9 a un 76 en los valores de fuerzas interiores, obteniéndose las mayores diferencias en el primer y segundo tramo de la torre.

En las figuras 7a) y 7b) se representan los valores de las fuerzas interiores en los tranques de la torre.

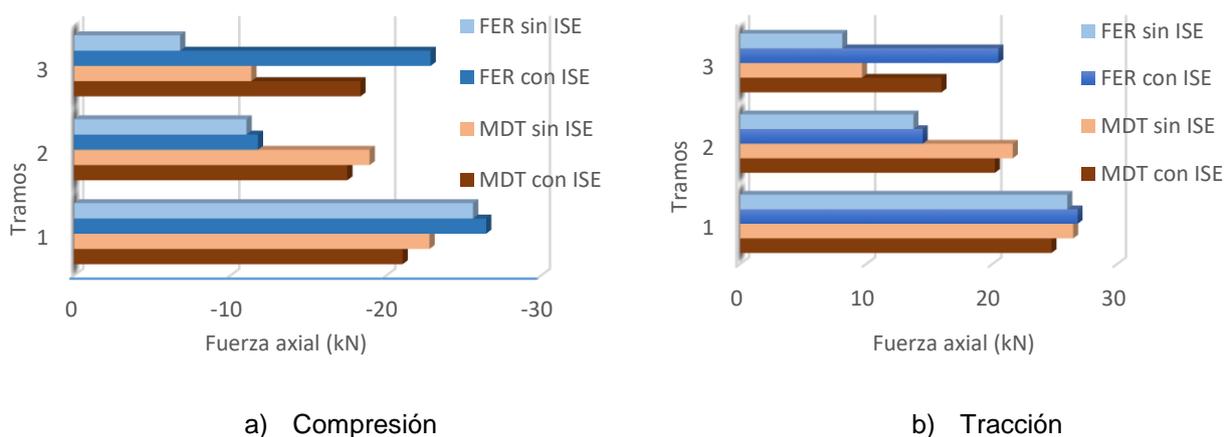


Figura 7: Fuerzas interiores en tranques

En las figuras 7a) y 7b) se observa como el efecto de la ISE en las fuerzas interiores de los tranques es significativo. Las diferencias para el FER son menores al 5% para los primeros dos tramos, sin embargo, en el último tramo estas diferencias aumentan a un 70%. En MDT, las diferencias en el último tramo son de un 38%. En cuanto los valores obtenidos entre ambos métodos (FER y MDT) las diferencias en las fuerzas oscilan entre un 12 y un 40%.

Demanda-capacidad

Para el análisis del comportamiento demanda-capacidad la torre fue dividida en los mismos tramos en los que fueron analizadas las fuerzas interiores (de acuerdo al tipo de elemento estructural: columna, diagonal o tranque, los que a su vez fueron divididos de acuerdo a su sección transversal). Por cada tramo se escogió un elemento coincidente para ambos métodos de estudio de carga de viento. Como el objetivo de este trabajo es verificar el efecto que tiene la ISE en el comportamiento de la torre, se decidió evaluar la demanda-capacidad de los elementos de la misma para una única dirección de viento (90°).

En la figura 8 se muestran los valores de la relación demanda capacidad para las columnas.

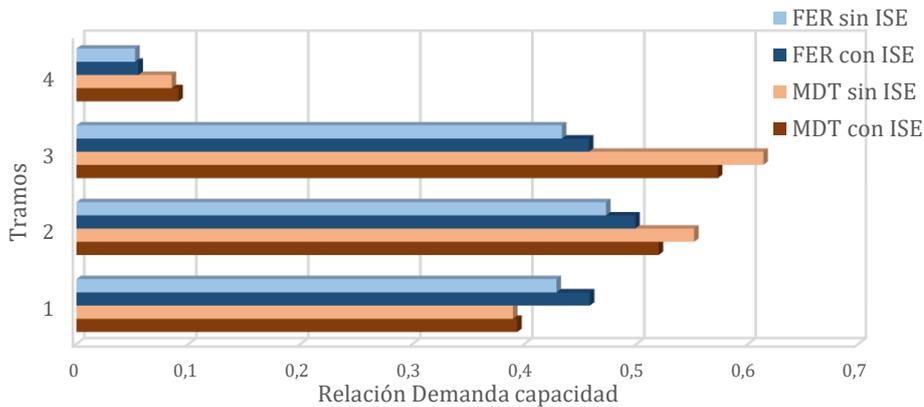


Figura 8: Relación demanda capacidad en columnas.

En la comparación entre ambos métodos de análisis de la carga de viento se observa que las máximas diferencias se muestran en el tercer y cuarto tramo, siendo mayores para el caso del MDT las diferencias en el cuarto tramo alcanzan valores de un 62% para el modelo empotrado y un 64% para el modelo con ISE, mientras que los demás tramos tienen un comportamiento variable; en el caso que presenta ISE varían desde un 4-25% y en el modelo empotrado desde un 9-42%.

En cuanto a la influencia de la ISE en ambos métodos las diferencias son casi despreciables. Los resultados obtenidos oscilan entre un 1-7%.

En la figura 9 aparecen representados los valores de la relación demanda-capacidad de las diagonales; en este caso existen determinados elementos que superan su capacidad resistente, estos se localizan en los tramos uno y dos para el método FER y en el tramo dos en el MDT sólo en el modelo empotrado

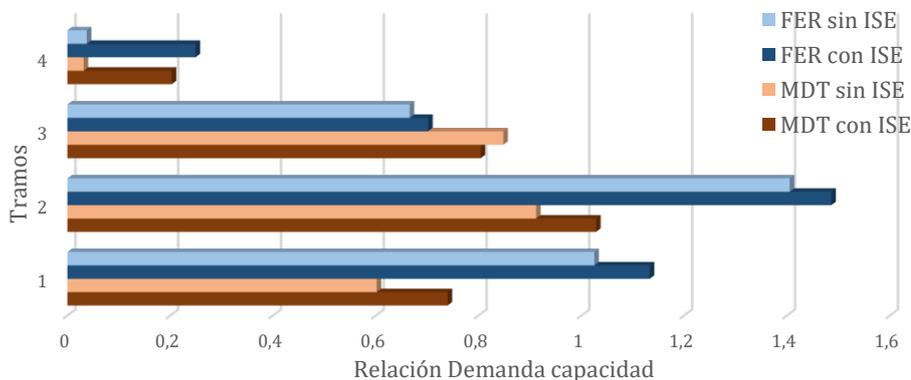


Figura 9: Relación demanda capacidad en diagonales

La influencia de la ISE modifica hasta un 85% los valores de demanda-capacidad en el último tramo, para los tres primeros tramos la influencia es menor aunque significativa también, los resultados se encuentran entre un 5% y un 19%.

En relación a la comparación entre los métodos de carga de viento, se pueden observar que las máximas diferencias se aprecian en el primer tramo para el método de FER, encontrándose valores de hasta un 35% para el modelo con ISE, y en el caso del modelo empotrado valores hasta de un 41%. Para los tramos dos, tres y cuatro los resultados son más variables, se encuentran entre un 15% y un 35%.

En la figura 10 se muestra el comportamiento de los tres tramos en los que fueron analizados los tranques.

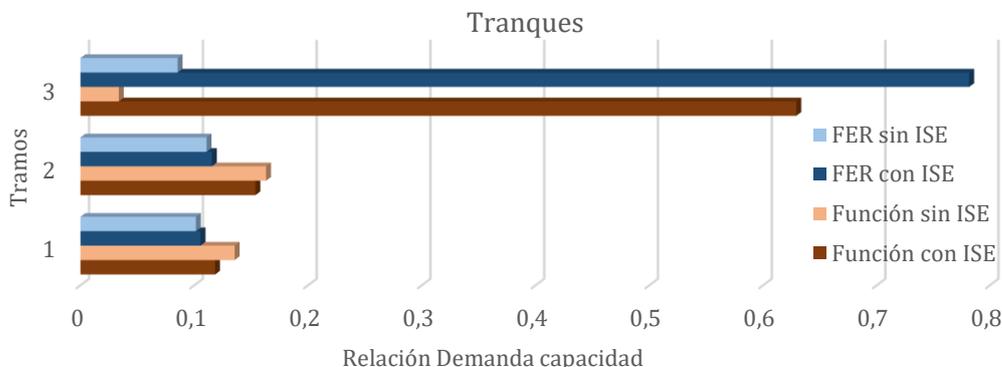


Figura 10: Relación demanda capacidad en tranques

Entre los dos métodos de análisis de viento hubo diferencias hasta del 33% en los modelos con ISE y hasta el 61% en el caso de los modelos empotrados, encontrándose esos valores en los tramos dos y tres respectivamente. El tramo uno presenta un comportamiento irregular, con diferencias desde un 12-47%.

En el análisis de la influencia que tiene la ISE en los valores de demanda-capacidad de los tranques se observa que en el tercer tramo hubo un aumento de más de un 89% para ambos métodos de carga de viento. En cambio, para los tramos uno y dos la influencia es mucho menor, para el FER las diferencias son de un 4% y para MDT la relación demanda-capacidad aumenta de un 6 a un 15% para el modelo sin ISE.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó la influencia que tienen la ISE y el tipo de análisis dinámico del viento en la respuesta estructural de la torre autosoportada GT60, para el estudio se realizó un análisis modal, se compararon las fuerzas interiores, los desplazamientos y la relación demanda capacidad.

Para ambos métodos de análisis dinámico de viento, los desplazamientos en la altura máxima de la torre aumentaron en más del 60% cuando se tuvo en cuenta el efecto de la ISE. El método de análisis dinámico del viento que se emplee, influye en los valores de fuerzas interiores y relación demanda-capacidad obtenidas en todos los elementos de la estructura.

La consideración de la ISE a través del modelo de Sargsyan [19] disminuye considerablemente el valor de la frecuencia de oscilación modal de la torre GT60, haciéndola sensible a los efectos de la carga dinámica, por lo que la influencia de esta interacción debe ser considerada en el diseño cuando se construye sobre suelos altamente compresibles. La influencia de la ISE en las fuerzas interiores de los elementos estructurales, no se comportó de forma homogénea en todos los elementos de la torre. En las columnas no hubo cambios significativos cuando se consideró la ISE; pero en los tranques y diagonales las diferencias en los valores de fuerzas interiores fueron significativas, en unos casos aumentando con la ISE y en otros disminuyendo.

Según los resultados obtenidos en el análisis demanda-capacidad de la estructura se evidencia que la ISE sí ejerce influencia; sobre todo en los elementos: diagonales y tranques con unas diferencias significativas para ambos métodos de carga dinámica de viento; sin embargo, para las columnas la influencia de la ISE es casi despreciable.

La ISE influye directamente en la respuesta estructural de la torre autosoportada GT60, por lo que es determinante que sus efectos sean evaluados en el análisis y diseño de estas estructuras cuando se construyan sobre suelos compresibles.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. Kausel, "Early history of soil–structure interaction," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 30, no. 9, pp. 822-832, 2010.
- [2] V. Garg and M. Hora, "A review on interaction behaviour of structure-foundation-soil system," *system*, vol. 2, no. 6, 2012.
- [3] F. Cavalieri, A. A. Correia, H. Crowley, and R. Pinho, "Dynamic soil-structure interaction models for fragility characterisation of buildings with shallow foundations," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 132, p. 106004, 2020/05/01/ 2020.
- [4] G. Zani, P. Martinelli, A. Galli, and M. di Prisco, "Three-dimensional modelling of a multi-span masonry arch bridge: Influence of soil compressibility on the structural response under vertical static loads," *Engineering Structures*, vol. 221, p. 110998, 2020/10/15/ 2020.
- [5] O. González-Cueto, M. Herrera Suárez, C. E. Iglesias Coronel, and E. López Bravo, "Análisis de los modelos constitutivos empleados para simular la compactación del suelo mediante el método de elementos finitos," *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 22, no. 3, pp. 75-80, 2013.
- [6] B. Shirkehanghah and H. Eimani Kalehsar, "The effect of soil–structure interaction on the along-wind response of high-rise buildings," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, pp. 1-15, 2020.
- [7] J. Chen, "Soil-Structure Interaction Effects on Wind-induced Vibration of Transmission Tower Line System," *EJDE*, vol. 21, p. 12, 2016.
- [8] P. Martín Rodríguez and V. Elena Parnás, "Análisis sísmico de modelos cubanos de torres autosoportadas de telecomunicaciones," *Revista Cubana de Ingeniería*, vol. Vol. III, No. 2, 2012.
- [9] R. Rodríguez, L. Fernández-Sola, and J. García, "Efecto de la interacción suelo-estructura en la detección de daño, usando el método de rigideces base," *Sociedad mexicana de ingeniería sísmica*, 2011.
- [10] H. J. Shah and A. K. Desai, "Dynamic Analysis of Innovative Hybrid Wind Mill Tower with Soil Structure Interaction," *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 10, no. 5, 2018.
- [11] T. Huo, L. Tong, and Y. Zhang, "Dynamic response analysis of wind turbine tubular towers under long-period ground motions with the consideration of soil-structure interaction," *Advanced Steel Construction*, vol. 14, no. 2, pp. 227-250, 25 June 2017, 2018.
- [12] V. Krathe and A. M. Kaynia, "Implementation of a non-linear foundation model for soil-structure interaction analysis of offshore wind turbines in FAST," *Wind Energy*, vol. 20, no. 4, pp. 695-712, 2017.
- [13] S. Dixit, S. P. Vedula, and S. Kakaraparathi, "Soil-Structure Interaction Analysis of a Raft Foundation Supporting RC Chimney," *Geohazards*, pp. 259-282, 2020.
- [14] E. Türkel, "Dynamic Seismic and Wind Response of Masonry Minarets," *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 64, no. 2, pp. 353-369, 2020.
- [15] J. Kaminski Jr, L. F. F. Miguel, J. D. Riera, R. C. R. de Menezes, and L. F. F. Miguel, "Dynamic analysis due to cable rupture of a transmission line tower for large river crossing in Brazil considering the soil-structure interaction," in *IX International Conference on Structural Dynamics (IX EUROLYN)*. Porto, Portugal, 2014.
- [16] R. Alvarez Konkov, P. Martín Rodríguez, and W. D. Cobelo Cristiá, "Modelación suelo-cimentación-estructura de una torre autosoportada," *Arquitectura e ingeniería*, vol. 14, no. 3, p. 12, 2020.
- [17] I. Fernández Lorenzo, B. Clavelo Elena, P. Martín Rodríguez, and V. B. Elena Parnás, "Dynamic analysis of self-supported tower under hurricane wind conditions," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 197, p. 104078, 2020.
- [18] *Eurocode 3: "Design of steel structures - Part 3-1: Towers, masts and chimneys-Towers and masts"*, 2007.
- [19] A. Sargsyan, "Оценка интенсивности сейсмического воздействия на сооружение с учетом податливости его основания.," *Строительная механика и расчет сооружений.*, no. 4, pp. 55-59, 1986.

- [20] *NC 450. Edificaciones. Factores de carga o ponderación. Combinaciones*, 2006.
- [21] R. Scarfone, M. Morigi, and R. Conti, "Assessment of dynamic soil-structure interaction effects for tall buildings: A 3D numerical approach," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 128, p. 105864, 2020/01/01/ 2020.