**“Influencia del Efecto P-Delta en la respuesta estructural de una edificación alta de 95m de altura ante cargas laterales”**

***Influence of the P-Delta effects on the structural response of a 95m high building under lateral loads***

**MSc. Ing. Aleksandra López Litvinovich, Dra. Ing. Janet Otmara Martínez Cid 2, Msc. Ing. Tamara Fundora Dávalos3, Ing. Mario Alejandro Leyva García4**

1-Universidad Tecnológica de la Habana CUJAE, Cuba. alopezl@civil.cujae.edu.cu

2- Universidad Tecnológica de la Habana CUJAE, Cuba. jcid@civil.cujae.edu.cu

3-Empresa de Proyectos de La Habana (EPROB). Cuba. tfundora@eprob.cu

4- Universidad Tecnológica de la Habana CUJAE, Cuba. mleyvag@gmail.com

**Resumen:**

 A medida que las edificaciones comienzan a elevarse en altura los efectos P-Delta o de segundo orden comienzan a tomar importancia en el análisis y diseño de edificaciones ante los efectos de las cargas laterales. Estos efectos de segundo orden provocan un aumento en los valores de solicitaciones y desplazamientos en las estructuras los cuales deben ser considerados en el diseño estructural. En el presente trabajo se realiza el análisis de la consideración del efecto P-Delta frente a la acción de cargas de viento y sismo en condiciones extremas de Cuba, para el estudio se seleccionó una edificación considerada alta según los códigos y normativas. La edificación es de hormigón armado de 95 metros de altura, compuesta por columnas, tímpanos y entrepisos sin vigas. Se emplea para el análisis el programa de análisis y diseño basado en el método de elementos finitos ETABS. Como resultados se muestra una comparación de la respuesta de la estructura considerando y sin considerar el efecto no lineal geométrico P-Delta en término de desplazamientos, derivas y solicitaciones de las columnas más esforzadas de la edificación analizada.

**Palabras Clave:** P-Delta, edifico alto, respuesta estructural.

***Abstract:***

[*As*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/As) *bu*[*ildings*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/ildings) *b*[*egin*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/egin)[*to*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/to)[*rise*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/rise)[*in*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/in)[*height*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/height)[*due*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/due)[*to*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/to)[*their*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/their)[*high*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/high)[*flexibility*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/flexibility)*,* [*P-Delta*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/P-Delta)[*effects*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/effects) *b*[*egin*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/egin)[*to*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/to)[*take*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/take)[*on*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/on)[*importance*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/importance)[*in*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/in)[*the*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/the)[*analysis*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/analysis)[*and*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/and)[*design*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/design)[*of*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/of)[*high*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/high) *bu*[*ildings*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/ildings)[*due*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/due)[*to*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/to)[*the*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/the)[*effects*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/effects)[*of*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/of)[*lateral*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/lateral) *loads.* [*These*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/These)[*second-order*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/second-order)[*effects*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/effects)[*cause*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/cause)[*an*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/an)[*increase*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/increase)[*in*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/in)[*the*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/the)[*values*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/values)[*of*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/of)[*stresses*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/stresses)[*and*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/and)[*displacements*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/displacements)[*which*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/which)[*must*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/must)[*be*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/be)[*considered*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/considered)[*of*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/of) *a* [*structural*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/structural)[*design*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/design)*.* [*For*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/For)[*the*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/the)[*study*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/study)*,* [*a*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/a) *bu*[*ilding*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/ilding)[*was*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/was)[*selected*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/selected)[*as*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/as)[*high*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/high)[*according*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/according)[*to*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/to)[*the*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/the)[*following*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/following)[*codes*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/codes)[*and*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/and) *standards.* [*The*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/The)[*reinforced*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/reinforced)[*concrete*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/concrete) *bu*[*ilding*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/ilding)[*is*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/is)[*made*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/made)[*of*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/of) *95* [*meters*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/meters)[*high*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/high)[*located*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/located)[*in*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/in)[*Havana*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/Havana)*,* [*composed*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/composed)[*of*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/of)[*columns*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/columns)*,* [*shear walls*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/spandrels)[*and*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/and)[*mezzanines*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/mezzanines)[*without*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/without) *b*[*eams*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/eams)*.* [*The*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/The) *bu*[*ilding*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/ilding)[*is*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/is)[*modeled*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/modeled) *u*[*sing*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/sing)[*the*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/the)[*analysis*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/analysis)[*and*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/and)[*design*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/design)[*program*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/program) *b*[*ased*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/ased)[*on*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/on)[*the*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/the)[*finite*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/finite)[*element*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/element)[*method*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/method)[*ETABS*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/ETABS)*.* [*As*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/As)[*results*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/results)[*we*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/we)[*show*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/show)[*a*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/a)[*comparison*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/comparison)[*of*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/of)[*the*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/the)[*response*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/response)[*of*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/of)[*the*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/the)[*structure*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/structure)[*considering*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/considering)[*and*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/and)[*without*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/without)[*considering*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/considering)[*the*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/the)[*non-linear*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/non-linear)[*geometric*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/geometric)[*effect*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/effect)[*P-Delta*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/P-Delta)[*in*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/in)[*terms*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/terms)[*of*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/of)[*displacements*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/displacements)*,* [*drifts*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/drifts)*,* [*solicitations*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/solicitations)[*and*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/and)[*structural*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/structural)[*design*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/design)[*of*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/of)[*columns*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/columns)[*and*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/and)[*shear walls*](https://es.pons.com/traducci%C3%B3n/ingl%C3%A9s-espa%C3%B1ol/spandrels)*.*

***Key Words:*** *P-Delta, Tall Building, structural response.*

1. **Introducción**

En la ingeniería estructural es común utilizar el análisis estático lineal o análisis de primer orden para calcular las fuerzas de diseño, los momentos y los desplazamientos resultantes de las cargas que actúan sobre una estructura. P-Delta es un efecto no lineal o de segundo orden que se produce en toda estructura en la que los elementos estén sometidos a cargas axiales. El estudio de la influencia del efecto P-Delta es de fundamental importancia en edificios altos ([Bungale S. Taranath 2006](#_ENREF_4)). El análisis tradicional de primer orden en edificaciones altas y flexibles subestiman los valores de solicitaciones y desplazamientos, sin embargo, las cargas laterales aplicadas causan acciones adicionales (Efecto P- Delta) en la estructura que según estudios internacionales producen un incremento entre un 10% y 35% ([Pushparaj. J Dhawale 2016](#_ENREF_13)).

El P-Delta es un efecto no lineal que ocurre en las estructuras cuando los elementos están sujetos a cargas axiales, este es un efecto de segundo orden que tiene que ver directamente con la carga axial aplicada (P) y un desplazamiento lateral delta Δ debido al efecto de cargas horizontales ([Bungale S. Taranath 2006](#_ENREF_4), [Pushparaj. J Dhawale 2016](#_ENREF_13)).



Figura 1 Efecto P-DELTA ([Bungale S. Taranath 2006](#_ENREF_4))

En término de diseño estructural este efecto causa incremento en los valores de momento y una disminución en la capacidad de carga axial, relacionado directamente con la relación rigidez-esbeltez de la estructura en su conjunto y la esbeltez de los elementos individuales ([Pushparaj. J Dhawale 2016](#_ENREF_13)).

Existen dos tipos de efectos P-Delta, efectos globales de desplazamiento laterales de la estructura (P-Δ), efectos locales de los elementos asociado a deformaciones locales relativas en fusión de las condiciones de borde de los elementos (P-δ) ([Pushparaj. J Dhawale 2016](#_ENREF_13)).

  

Figura 2 a) P- Δ (Efectos P-Delta Globales) b) P- δ (Efectos P- δ Locales) ([Pushparaj. J Dhawale 2016](#_ENREF_13))

Un análisis riguroso del efecto P-Delta es combinar los efectos de la teoría de los grandes desplazamientos globales, donde el equilibrio es analizado en el estado deformado de la estructura y de sus elementos.

1. **Métodos para la aplicación del efecto P-Delta.**

Existen varios métodos matemáticos para aplicar el efecto P-Delta en estructuras de manera global (P- Δ) y local (P- δ) ([Wilson 2017](#_ENREF_15)).

De manera global (P- Δ) los programas de análisis y diseño presentan dos métodos, P-Delta básico y P-Delta de amplios desplazamientos. En el efecto P-delta básico las ecuaciones de equilibrio están basadas en la deformación de la estructura, donde las fuerzas de compresión tienden a aumentar la rotación de los elementos y desestabilizar la estructura. En el efecto P-Delta de amplios desplazamientos también las ecuaciones de equilibrio están basadas en la deformación de la estructura. Este método requiere de gran cantidad de iteraciones haciendo el proceso más efectivo, este método es recomendado para su uso en edificaciones consideradas altas ([Wilson 2017](#_ENREF_15)).

De manera local (P- δ) los métodos más utilizados son: Método iterativo, método directo basado en la masa, método de pilar con área de cortante negativa y método de pilar con rigidez a flexión negativa. Los dos primeros están implementados en el programa de análisis y diseño ETABS V-7.0.1 y son los usados en la presente investigación ([Wilson 2017](#_ENREF_15)).

El método no iterativo basado en la masa, calcula la carga de manera automática a partir de la masa de cada nivel, como una carga piso a piso sobre la estructura. Este método trata la modelación de la edificación como un método simplificado mediante el análisis de masas declaradas en la estructura ([Rizwan Akhter 2017](#_ENREF_14), [Wilson 2017](#_ENREF_15)).

El método iterativo se calcula a partir de una combinación especifica de casos de carga que establecen las normas de combinación de cargas. Este método se basa primeramente en un análisis de primer orden teniendo en cuenta las combinaciones de carga que presentan solamente cargas horizontales y verticales, se calculan los desplazamientos en cada nivel, seguidamente se realiza una segunda iteración obteniendo un incremento de carga equivalente horizontal la cual es adicionada a las cargas horizontales iniciales, este proceso se realiza hasta que la estructura converja en los resultados ([Rizwan Akhter 2017](#_ENREF_14)).



Figura 3 Incrementos equivalentes de fuerzas en cada nivel ([Iglesia 2015](#_ENREF_5)).

1. **Consideraciones del efecto P-Delta bajo cargas de viento y sismo.**

Ante cargas de viento las normas nacionales e internacionales no presentan limitantes para la aplicación del efecto P-Delta en estructuras de edificios altos ([NC-285 2003](#_ENREF_11) , [AIJ 2004](#_ENREF_2), [ISO4354 2009](#_ENREF_6), [ASCE7-10 2010](#_ENREF_3)). Referencias internacionales plantean que este efecto en estructuras ante cargas de viento debe ser considerado cuando las edificaciones son consideradas altas en su totalidad y los elementos verticales individuales considerados esbeltos ([Manasa C K 2017](#_ENREF_7), [Rizwan Akhter 2017](#_ENREF_14)).

En cuanto al efecto ante cargas sísmica, la demanda sísmica se basa en una respuesta no elástica donde los efectos de segundo orden influyen a medida que el sistema sísmico resistente cambia su rigidez a través de la duración del evento sísmico ([Rizwan Akhter 2017](#_ENREF_14)).

Ante cargas sísmicas las normas internacionales y nacionales plantean limitaciones para tener en cuenta este efecto en edificaciones, donde los resultados de fuerzas en los miembros de la edificación, momentos, desplazamientos y derivas no debe ser considerado en estructuras cuando el coeficiente de estabilidad (θ) es menor de 0.1 ([ASCE7-10 2010](#_ENREF_3), [NC46 2017](#_ENREF_8)). La norma cubana NC-46:2017 ([NC46 2017](#_ENREF_8)) plantea la siguiente formulación para determinar el coeficiente de estabilidad el cual no debe exceder de 0.25, la formulación para determinar este parámetro es la siguiente:

$\frac{P\_{x}\*∆\_{CX}}{V\_{X}\*h\_{pX}}=θ$ Ecuación $\left[1\right]$

Dónde:
Px- Carga vertical gravitacional total encima del nivel "x", incluyendo el propio nivel "x"
No habrá factores de mayoración en la sumatoria y pueden utilizarse las reducciones de carga viva que apliquen.

Vx- Cortante entre el piso "x" y el "x - 1" en kN.

ΔCX- Deriva elástica a cedencia del nivel "x".

Hpx- Altura del piso "x" (m).

Por lo que se establece que el coeficiente de estabilidad debe encontrarse entre los valores mostrados en la siguiente expresión, si estos se encuentran por encima de 0.25 deberá replantearse la estructura para reducir el coeficiente de estabilidad.

$θ\leq θ\_{máx}=\frac{0.5}{β\_{X}\*C\_{d}}\leq 0.25$ Ecuación $\left[2\right]$

Dónde:
βx- Relación entre la demanda cortante y la capacidad cortante en el piso inmediatamente debajo del nivel "x". βX puede tomarse conservadoramente como 1,0 suponiendo que los elementos tienen una resistencia adecuada.

Cd- Es el factor de amplificación de desplazamiento Post-elástico (Cd), se utilizará para estimar la máxima deriva elástica que puede incurrir una estructura a partir de la máxima deriva post-elástica admisible por especificación.

1. **Descripción de la Edificación. Descripción del modelo estructural.**

La estructura de la edificación consta de un núcleo central de tímpanos que constituyen fundamentalmente las cajas de los ascensores y de las escaleras, encargados de tomar las cargas horizontales y las cargas verticales que tributan. Presenta columnas como elementos portantes verticales, y losas sin vigas en los entrepisos y las cubiertas. Todo de hormigón armado “in situ”. La edificación tiene 26 niveles con una altura total de 92,16 m. La figura 4 muestra la planta típica y la elevación del modelo de cálculo realizado en el programa de análisis y diseño ETABS 17.1.

 

Figura 4. Planta y Elevación de edificación objeto de estudio ETABS 17.1.

La geometría general del modelo responde a la requerida por arquitectura. Las luces alcanzan los 8.40 m y los puntales oscilan entre 3,20 m y 4,50 m según la función del entrepiso. Las secciónes estructurales de los elemetos columnas y tímpanos se muestran en la tabla 1 y 2 mostrandose la variación de sección transversal en altura. Los espesores de losas en cada nivel son variables en función de las cargas de uso de la estructura, los espesores oscilan entre 20cm y 35cm.

Tabla 1 Secciones de columnas en altura.

|  |  |
| --- | --- |
| Niveles del modelo | Secciones de columnas (mm) |
| 0-4 | 900 x 700 |
| 1200 x 800 |
| 5-10 | 900 x 700 |
| 1100 x 700 |
| 900 x 800 |
| 11-15 | 900 x 700 |
| 1000 x 600 |
| 900 x 800 |
| 16-20 | 900 x 500 |
| 900 x 600 |
| 800 x 700 |
| 21-23 | 800 x 500 |
| 24-26 | 700 x 500 |
| 800 x 500 |

Tabla 2 Secciones de tímpano en altura.

|  |  |
| --- | --- |
| **Niveles del modelo** | **Secciones de columnas (mm)** |
| 0-5 | 350 |
| 6-14 | 300 |
| 15-Cubierta | 250 |

La estructura es de hormigón armado para columnas, tímpanos y losas con una resistencia característica a compresión f´c =35MPa. Según las especificaciones de proyecto y detalles constructivos los tímpanos se consideran empotrados en la base ya que la estructura se emplaza en un terreno rocoso y continuo en toda la altura. Las columnas se consideran articuladas en la base y en toda la altura.

En el análisis de edificaciones bajo carga sísmica se recomienda realizar una disminución de la rigidez de los elementos estructurales debido a las deformaciones que se esperan producir con niveles cercanos a la carga última ([Bungale S. Taranath 2006](#_ENREF_4), [ACI-318 2014](#_ENREF_1)).

En el presente trabajo se estableció una reducción de 0.8 Ig para las columnas, 0.7 Ig para los muros y 0.5 Ig para las losas.

1. **Cargas sobre la estructura.**

Cargas Permanente ([NC-283:2003](#_ENREF_10)).

Se consideraron las cargas permanentes correspondientes a:

* Cubiertas:
* Impermeabilización: 0.07 kN/m2.
* Relleno para conformación de pendientes: 2.40 kN/m2
* Habitaciones y áreas de servicios:
* Terminación de piso: 0.20 kN/m2.
* Mortero de colocación de piso: 0.6 kN/m2
* Tabiquería ligera: 0.5 kN/m2
* Falsos techos: 0.22 kN/m2
* Instalaciones: 0.20 kN/m2
* Locales técnicos y áreas de almacenes, oficinas y otras zonas de acceso solo para empleados:
* Terminación de piso: 0.23 kN/m2.
* Mortero de colocación de piso: 0.6 kN/m2
* Tabiquería ligera: 0.5 kN/m2
* Falsos techos: 0.22 kN/m2
* Instalaciones: 0.20 kN/m2
* Áreas de cisternas sobre losa estructural:
* Peso de agua: 32.5 kN/m2
* Fachada: 0.8 kN/m2

Cargas de Uso ([NC284 2003](#_ENREF_9)).

Se consideraron las siguientes:

* Habitaciones y pasillos de acceso a las habitaciones: 1.5 kN/cm2
* Balcones con acceso desde una habitación: 2 kN/m2
* Pisos técnicos: 4 kN/m2
* Locales para camareras y en las oficinas: 2 kN/m2
1. **Cargas ecológicas sobre la estructura.**

Para la comparación de la influencia del efecto P-Delta la estructura de edificación objeto de estudio se decidió determinar la influencia de este efecto ante cargas de viento y sismo en las condiciones extremas de Cuba. Se utilizó para el análisis la norma vigente en el país de sismo ([NC46 2017](#_ENREF_8)) y la norma de viento ([NC-285 2003](#_ENREF_11) ).

* 1. **Cargas de Sismo NC-46:2017.**

Se seleccionó para la evaluación de la influencia del efecto P-Delta como condición de estudio zona sísmica 5 según la norma de análisis ([NC46 2017](#_ENREF_8)). Según su categoría ocupacional se selecciona la categoría III que clasifica a la obra como importante. El sitio se clasifica como suelo tipo C atendiendo al informe ingeniero geológico. Las ordenadas espectrales correspondientes son: ordenada espectral de periodo corto. (SS =1.035) y ordenada espectral con periodo de 1 segundo del sismo extremo considerado en el basamento de roca en el sitio de interés (S1 =0.428).

La norma ([NC46 2017](#_ENREF_8)) para tener en cuenta la influencia del efecto P-Delta en el análisis de las estructuras plantea que el coeficiente de estabilidad debe encontrarse entre 0.1<θ<0.25, donde si la estructura presenta un coeficiente de estabilidad mayor de 0.25 se debe realizar una nueva estructuración de la misma. La estructura objeto de estudio según los parámetros y zona sísmica seleccionada presenta un coeficiente de estabilidad de 0.12 encontrándose en el rango establecido por la normativa.

La norma ([NC46 2017](#_ENREF_8)) establece que atendiendo a las irregularidades y la altura de la edificación deberá utilizarse un análisis de respuesta modal espectral o un análisis pasos a paso de respuesta dinámica lineal o no lineal. En la edificación objeto de estudio del presente trabajo se emplea el análisis modal espectral.

La obtención de las fuerzas sísmicas se realiza mediante la construcción del espectro de diseño. Para la construcción del espectro de diseño este debe ser calibrado para el nivel de diseño requerido, no es necesario realizar el ajuste del mismo debido a que para clase de suelo C y ordenada espectral de periodo corto mayor de la unidad, el coeficiente de ajuste de sitio es igual a 1.

Para la edificación del caso de estudio se tomará como nivel de desempeño sísmico: Ocupación Inmediata para un sismo Ordinario con 10 % probabilidad de ser excedido en 50 años, dado que la edificación cataloga como importante.

En la tabla 3 se aprecian los valores de SDS y S1S calibrados al nivel de diseño.

Tabla 3: Coeficientes para el espectro calibrado al nivel de diseño requerido:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Nivel de desempeño | Kd | SDS (g) | SD1 (g) |
| Ocupación inmediata (sismo ordinario) | 0,66 | 0,683 | 0,388 |

Para la confección del espectro mostrado en la figura 5 los periodos de esquina para sismo ordinario ocupación inmediata se muestran en la tabla 4.

Tabla 4: Valores de periodo de esquina del espectro.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Nivel de desempeño | To (s) | Ts (s) |
| Ocupación inmediata (sismo ordinario) | 0,113 | 0,567 |

Figura 5. Espectro de Diseño Horizontal y Vertical.

* 1. **Cargas de Viento NC-285:2003.**

La norma ([NC-285 2003](#_ENREF_11) ) no establece limitantes para el análisis del efecto P-Delta en estructuras. Para el análisis ante carga de viento se define como condiciones de estudio Zona 1 tipo de terreno A. La norma ([NC-285 2003](#_ENREF_11) ) establece dos componentes para el cálculo de la carga de viento una estática y otra dinámica. La componente estática se obtiene a partir de la multiplicación de una presión básica por una serie de coeficientes que tienen en cuenta los parámetros meteorológicos y de forma que actúan sobre la estructura según se muestra en la ecuación 3.

$Q=q\_{10}\* Ct\* Cs\* Ch\*Cr\*Cra\* Cf$ Ecuación $\left[3\right]$

Donde, $q\_{10} $ presión básica del viento kN/m2 (1.3kN/m2), $C\_{t}$ coeficiente de recurrencia (1), $C\_{s}$ coeficiente de topografía o sitio (1),$ C\_{h}$ coeficiente de altura (Según tipo de terreno A), $C\_{r}$ coeficiente de ráfaga (1.06), $C\_{ra}$ coeficiente de reducción (0.9), $C\_{f}$ coeficiente de forma (Presión 0.8, Succión 0.5, Laterales 0.6)

La componente dinámica se tiene en cuenta cuando el periodo de oscilación de la estructura es mayor de 1 segundo. El primer modo fundamental de oscilación presenta un periodo longitudinal de 2.739s, periodo trasversal de 2.214s y un periodo torsional de 1.311s. Según los resultados la estructura requiere de análisis dinámico ante carga de viento.

El método para la determinación de la respuesta dinámica de la estructura se obtiene a través de la fuerza de inercia que se aplica en cada tramo y se calcula de la siguiente forma:

$Q^{n}=M\_{j }x C^{D} xC\_{CE} x N\_{ji}$ Ecuación $\left[4\right]$

Donde:

- $M\_{j}$: “j” ésima masa concentrada, (kN) (Variable por nivel).

- CD: coeficiente dinámico del modo “i” ésimo (1.81).

- $N\_{ji}$: Aceleración reducida de la “j” ésima masa, (m/s2). (Variable por Nivel).

- $C\_{CE}$: Coeficiente que tienen en cuenta la correlación espacial de las pulsaciones según la altura y fachada del edificio. (Variable por Nivel).

* 1. **Combinaciones de Cargas.**

Para el análisis ante cargas de viento se utilizaron las siguientes combinaciones establecidas en la norma ([NC-450:2006](#_ENREF_12)).

1.2 G + 1.4 W+0.5Q+0.5 QC

1.2 G+1.6QC+0.8W

Para la carga de sismo la norma ([NC46 2017](#_ENREF_8)) deroga las combinaciones de carga establecidas en la ([NC-450:2006](#_ENREF_12)) y establece las combinaciones siguientes para el análisis ante cargas sísmicas.

1,2 G + Q + Sv ± Sh

0.9 G +Sv ± Sh

Donde:

G: Carga permanente (entrepiso y cubierta).

Q: Carga de uso de entrepiso y balcones.

Qc: Carga de uso de cubierta.

Sv: Componente vertical de la carga de sismo (espectro de diseño).

Sh: Componente horizontal de la carga de sismo (espectro de diseño).

W: Carga de Viento

1. **Resultados.**

Los resultados muestran la comparación de la influencia del efecto P-Delta ante cargas de viento y sismo teniendo en cuenta los dos métodos establecidos en el programa de análisis y diseño ETABS, método no iterativo basado en la masa (MNI) y el método iterativo (MI) para los efectos locales. Para los efectos globales se utilizó la teoría de los amplios desplazamientos que según ([Wilson 2017](#_ENREF_15)) es recomendada para edificios altos.

El análisis entre los métodos para las distintas cargas laterales aplicadas se realiza mediante la comparación de desplazamientos, derivas y fuerzas axiales en columnas.

* 1. **Resultados cargas Sísmicas.**

La figura 6 muestra la comparación en términos de desplazamientos máximos en la altura de la edificación para los casos sin la influencia del efecto P-Delta y con la influencia del efecto para los métodos no iterativo basado en la masa (NI) y para el efecto iterativo basado en los estados de cargas (MI). Como se observa el método P-Delta no iterativo presenta los mayores valores de desplazamientos (198.67mm), este resulta el método más conservador lo que confirma lo dicho por ([Wilson 2017](#_ENREF_15)). Las máximas diferencias entre este método y los valores de desplazamientos sin tener en cuenta el efecto P-Delta oscila entre 5% y 13% representando un valor máximo de 25mm.

198.67

192.15

173.7

Y

Figura 6. Comparación Desplazamientos vs Altura para los distintos casos de análisis ante cargas de sismo.

La figura 7 se muestra las derivas de la edificación para los casos analizados. Como se puede observar las derivas máximas se muestran para el análisis teniendo en cuenta el efecto P-Delta para el método no iterativo basado en la masa. Las diferencias máximas en el caso de las derivas sin tener en cuenta el efecto P-Delta y el método no iterativo oscilan entre 11% y 34% (0.001). En el gráfico se observa dos puntos de incrementos de derivas el primero ubicado en los primeros 10 metros de la estructura y el segundo entre las alturas de 80m a 85m. El cambio de derivas del primer punto del gráfico está dado por un cambio brusco de la planta de la estructura. El segundo punto en el nivel 83.18m corresponde al nivel inferior a una cisterna elevada de la edificación.

Figura 7. Comparación Derivas vs Altura para los distintos casos de análisis ante cargas de sismo.

Los resultados de fuerzas axiales en columnas y la comparación de los métodos P-Delta (NI) y P-Delta (MI) con respecto a las fuerzas sin tener en cuenta este efecto se muestran en la tabla 5. Los resultados que se muestran en la tabla estás asociados a la combinación 1,2 G + Q + Sv ± Sh que resultó la combinación pésima. Como se observa las mayores compresiones se obtienen para las columnas sin tener en cuenta el efecto P-Delta lo que confirmando lo dicho por ([Pushparaj. J Dhawale 2016](#_ENREF_13)) sobre la disminución de estas solicitaciones a causa de este efecto.

Tabla 5: Comparación de fuerzas axiales en columnas.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Solicitación Máxima** | **Resultados fuerzas axiales en Columnas** | **Diferencia P-DELTA (MI) vs Sin P-Delta** | **Diferencia P-DELTA (NI) vs Sin P-Delta** |
| **Sin P DELTA kN** | **P-DELTA (MI) kN** | **P-DELTA (NI) kN** |
| **Axial****(Tracción)** | 4376 | 4498 | 4641 | 3% | 3% |
|
| **Axial****(Compresión)** | 28888 | 28714 | 27225 | 1% | 5% |
|

* 1. **Resultados cargas de viento.**

La figura 8 muestra la comparación en términos de desplazamientos máximos en la altura de la edificación para los casos sin la influencia del efecto P-Delta y con la influencia del efecto para los métodos no iterativo basado en la masa (NI) y para el efecto iterativo basado en los estados de cargas (MI). Como se observa el método P-Delta no iterativo presenta los mayores valores de desplazamientos (183.2mm), este resulta el método más conservador lo que confirma lo dicho por ([Wilson 2017](#_ENREF_15)). Las máximas diferencias entre este método y los valores de desplazamientos sin tener en cuenta el efecto P-Delta oscila entre 42% y 68%. En el tope de la edificación la diferencia máxima es del 42% representando 68.6mm.

183.12

174.5

Figura 8. Comparación Desplazamientos vs Altura para los distintos casos de análisis ante cargas de viento.

La figura 9 se muestra las derivas de la edificación para los casos analizados. Como se puede observar las derivas máximas se muestran para el análisis teniendo en cuenta el efecto P-Delta para el método iterativo. Las diferencias máximas oscilan entre 30% y 55%. En el gráfico se observa dos puntos de incrementos de derivas al igual que en el análisis sísmico, el primero ubicado en los primeros 10 metros de la estructura y el segundo entre las alturas de 80m a 85m. El cambio de derivas del primer punto del gráfico está dado por un cambio brusco de la planta de la estructura. El segundo punto en el nivel 83.18m corresponde al nivel inferior a una cisterna elevada de la edificación.

Figura 9. Comparación Derivas vs Altura para los distintos casos de análisis ante cargas de viento.

Los resultados de fuerzas axiales en columnas y la comparación de los métodos P-Delta (NI) y P-Delta (MI) con respecto a las fuerzas sin tener en cuenta este efecto se muestran en la tabla 6. Los resultados que se muestran en la tabla estás asociados a la combinación 1.2 G + 1.4 W+0.5Q+0.5 QC que resultó la combinación pésima. Como se observa las mayores compresiones se obtienen para las columnas sin tener en cuenta el efecto P-Delta lo que confirma lo dicho por ([Pushparaj. J Dhawale 2016](#_ENREF_13)) sobre la disminución de estas solicitaciones a causa de este efecto.

Tabla 6: Comparación de fuerzas axiales en columnas.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Solicitación Máxima** | **Resultados fuerzas axiales en Columnas** | **Diferencia P-DELTA (MI) vs Sin P-Delta** | **Diferencia P-DELTA (NI) vs Sin P-Delta** |
| **Sin P DELTA kN** | **P-DELTA (MI) kN** | **P-DELTA (NI) kN** |
| **Axial****(Tracción)** | 4080 | 4121 | 4353 | 1% | 6% |
|
| **Axial****(Compresión)** | 17230 | 17157 | 17225 | 0,4% | 0,03% |
|

1. **Conclusiones.**

Los resultados de la investigación permiten arrojar las siguientes conclusiones:

1. La consideración del análisis P-Delta tiene influencia significativa en los desplazamientos y derivas de la edificación objeto de estudio ante los efectos de cargas de viento y sismo.
2. Las diferencias máximas en los valores de desplazamiento son de 13% (25mm) ante cargas de sismo y 42% (68.6mm) ante cargas de viento. Siempre el método P-Delta no iterativo basado en la masa reporta los mayores valores.
3. Las diferencias máximas en los valores de derivas son de 34% (0.001) y 55% (0.0007) ante cargas de sismo y viento respectivamente. Siempre el método P-Delta no iterativo basado en la masa reporta los mayores valores.
4. El efecto P-Delta produce una reducción de las fuerzas axiales a compresión en columnas. La diferencia máxima ante cargas sísmicas es de 5% (1660 kN) donde los máximos valores se reportan para la edificación sin la aplicación del efecto P-Delta con respecto al método iterativo y ante carga de viento la diferencia es de 0.4% (74kN) donde los máximos valores se reportan para la edificación sin la aplicación del efecto P-Delta con respecto al método no iterativo basado en la masa.
5. **Referencias Bibliográficas.**
6. ACI-318 (2014). building code requirements for structural concrete (aci 318-05) and commentary (aci 318s-14). aci committee 318.
7. AIJ (2004). recommendations for loads on buildings. wind loads**:** 137.
8. ASCE 7-10 (2010). american society of civil engineers, minimum design loads for buildings and other structures.
9. bungale s. taranath, p. d., p.e., s.e. (2006). reinforced concrete design of tall buildings
10. iglesia, s. m. (2015). o efeito p-delta nas estruturas de edifícios. técnología aplicada a la ingeniería, altoqi.
11. ISO-4354 (2009). "wind action on structures."
12. manasa c k, m. p. (2017). "effect of wind load on tall r c buildings by p-delta analy." grenze scientific society.
13. NC-46 (2017). construcciones sismorresistentes. requisitos básicos para el diseño y construcción.
14. NC-284 (2003). carga de uso en edificaciones.
15. NC-283:2003 densidad de materiales naturales, artificiales y de elementos de construccion como carga de diseño
16. NC-285 (2003 ). carga de viento. método de cálculo. cuba.
17. NC-450:2006 edificaciones-factores de carga o ponderación-combinaciones.
18. pushparaj. j dhawale, g. n. n. (2016). "analysis of p-delta effect on high rise building." international journal of engineering research and general science **4**(4).
19. rizwan akhter, s. p., mirza aamir (2017). "p-delta effects on high rise buildings subjected to earth quake and wind loads." international journal of engineering science and computing **7**(8).
20. wilson, d. e. l. (2017). csi analysis reference manual