

INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN GRAVITACIONAL EN ESTRUCTURAS DE VARIOS PISOS

Nieves, J.¹, Nieves, W.²

1 Ingeniero civil titulado de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: piernievesquiroz@gmail.com

2 Docente investigador en el área de estructuras de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: nieves.walter@usfx.bo

Recibido: -

Aceptado: -

Publicado: -

RESUMEN

En el transcurso de la historia con el pasar de los años la tendencia en edificaciones cada vez se ve dirigida en su dirección vertical, es decir edificios cada vez más altos.

Esta tendencia más allá de ser un símbolo de poder económico representa una necesidad debido al aumento acelerado de la densidad poblacional. La implementación de edificios de gran altura significa un aprovechamiento en la escala vertical de estos bienes inmuebles.

Actualmente las cargas que afectan a los sistemas estructurales se dividen en tres tipos que son gravitacionales, vivas y accidentales. En la presente investigación se hará énfasis en la acción gravitacional sobre los volúmenes a considerar en un diseño.

Las cargas gravitacionales son cargas que actúan sobre una estructura como efecto de la acción de la gravedad. En la ingeniería estructural cuantificar la solicitación de cualquier tipo de carga constituye una de las tareas más difíciles por lo arduo que es estimar con precisión los elementos que pasaran al servicio, por lo tanto en la mayoría de códigos de diseño se incluyen las llamadas combinaciones de carga que son unos factores de mayoración ante la incertidumbre de la carga final, aunque de manera errónea se trabaja con valores de gravedad de 9.81 m/s^2 o en su defecto de 10 m/s^2 se debería considerar un valor más preciso con el fin de aumentar la eficiencia del uso de los materiales de refuerzo.

Palabras clave: Gravedad, cargas de servicio, solicitaciones en estructuras.

ABSTRACT

In the course of history, with the passing of the years, the trend in buildings is increasingly directed in its vertical direction, that is, increasingly taller buildings.

This trend, beyond being a symbol of economic power, represents a necessity due to the accelerated increase in population density. The implementation of high-rise buildings meant a vertical scale use of these real estate.

Currently, the loads that affect structural systems are divided into three types: gravitational, live and accidental. In this research, emphasis will be placed on the gravitational action on the volumes to be considered in a design.

Gravitational loads are loads that act on a structure as a result of the action of gravity. In structural engineering, quantifying the stress of any type of load is one of the most difficult tasks due to how difficult it is to accurately estimate the elements that will be put into service, therefore the so-called combinations of loads are included in most design codes. load that are increasing factors in the face of the uncertainty of the final load, although we erroneously work with gravity values of 9.81 m/s^2 or, failing that, 10 m/s^2 , a more precise value should be considered in order to increase the efficiency of the use of reinforcing materials.

Key words: Gravity, service loads, loads on structures.

INTRODUCCIÓN

Las edificaciones alrededor del mundo llegaron a introducirse en la cultura actual desde finales del siglo XIX hasta la actualidad en el siglo XXI. Las estructuras de varios pisos vienen como solución o alternativa al acelerado crecimiento poblacional, a la migración y al crecimiento de las economías ante el desarrollo acelerado e inminente de los núcleos urbanos de las ciudades del mundo.

El desmesurado crecimiento geométrico a exponencial dependiendo de la ciudad ha generado un redoble de esfuerzos en la construcción de edificios de gran altura, estos edificios de gran altura se hallan situados alrededor del mundo significando que estos se hallan situados en distintas latitudes, longitudes y alturas sobre el nivel del mar.

Figura 1
Edificio Burj Khalifa, Emiratos Árabes Unidos



Fuente: Pexels.com, uso gratuito.

Considerando que hace ya más de un siglo se popularizo los edificios de gran altura estos ya tienen una tendencia marcada a crecer con

límites nunca antes pensados, siendo así que se discute entre distintos edificios la tutela del edificio más alto del mundo.

Tabla 1
Los 5 edificios más altos del mundo

Edificio	País	Altura oficial	Altura del último piso
Burj Khalifa	Emiratos Árabes Unidos	828 m	585 m
Merdeka	Malasia	679 m	503 m
Torre de Shanghái	China	632 m	583 m
Makkah Royal Clock Tower	Arabia Saudita	601 m	494 m
Ping An Finance Center	China	599 m	562 m

Fuente: Elaboración propia

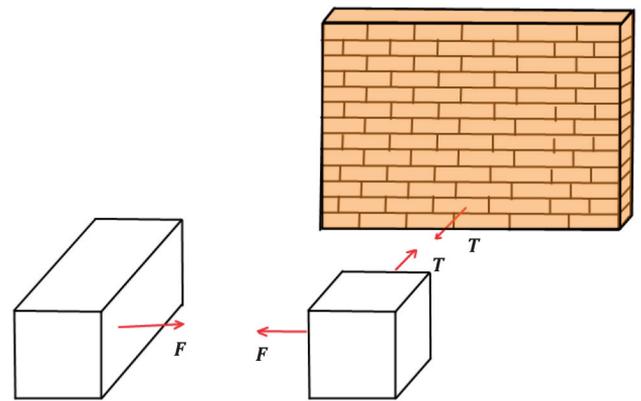
En edificios pequeños de hasta 10 pisos el considerar un efecto de la gravedad diferente al convencional resulta insulso por consideración general, sin embargo, se debe considerar que la gravedad varía según la altura sobre el nivel del mar, siendo más específicos, de acuerdo a la cota o nivel que ostente cualquier edificio desde su nivel de fundación hasta su pico más alto la gravedad ira variando.

La gravedad es una fuerza fundamental de la naturaleza que atrae a los objetos con masa entre sí. Es la fuerza responsable de la interacción mutua entre todos los cuerpos con masa en el universo. La magnitud de la fuerza gravitatoria entre dos objetos depende de sus masas y de la distancia que los separa. Según la teoría de la gravedad de Isaac Newton, esta fuerza se describe mediante la Ley de la Gravitación Universal.

Añadiendo entonces, el enunciado previo indica que todos los cuerpos se atraen indiferentemente de su masa propia por la cual este constituida, siendo así que existe muchas fuerzas de atracción relativas de acuerdo a la posición en la cual uno este, es decir que un cuerpo es atraído por cuerpos de su alrededor, por ejemplo, el

cuerpo de una persona, la mesa, el muro, etc. Pero al estar este rodeado de distintos objetos de masas relativamente pequeñas estas no son determinantes al alterar el equilibrio de un cuerpo, además la masa influyente que atrae a los humanos y solidos del planeta es la masa del planeta tierra.

Figura 2
Esquema de fuerzas de atracción generadas por "n" objetos en un entorno.



Fuente: Elaboración propia

En lo cotidiano un cuerpo al estar sometido a tantas fuerzas de atracción con pesos significantes estas tienden a llegar a un equilibrio estático, siendo así que la fuerza de atracción mas importante es la generada por la enorme masa de tierra del planeta, esta es la que influye a las estructuras.

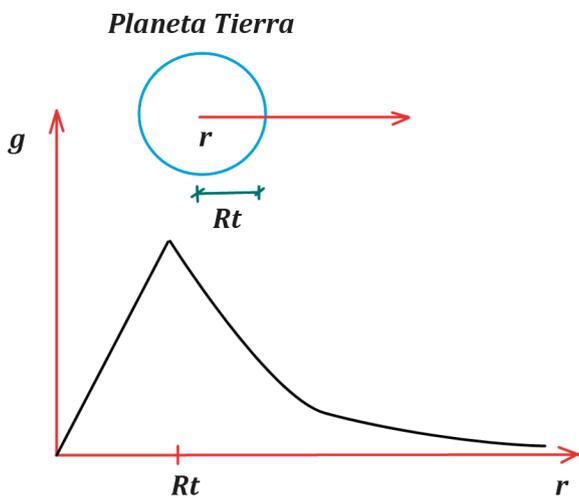
Existen distintas maneras de determinar variación de la gravedad respecto a su coordenada vertical respecto a la altura sobre el nivel del mar.

Los edificios de gran altura al estar situados alrededor del mundo poseen distintas coordenadas y alturas sobre el nivel del mar, siendo estas determinantes para definir el efecto de la gravedad sobre las estructuras, la gravedad conforme uno se va acercando al núcleo de la tierra va variando considerando el "Modelo para una densidad que disminuye gradualmente desde el centro de la tierra hasta su superficie" que alega que en lugar de considerar una o

mas estratos de tierra de densidad uniforme, cabe plantear una disminución gradual de la densidad de la tierra hasta la superficie, este modelo indica que la aceleración de la gravedad aumentaría al desplazarse desde el centro de la tierra hacia afuera, alcanzando un valor máximo de 10.22 m/s² a 5420 metros desde el centro de la tierra y a partir de ese punto decrecería hasta la superficie donde alcanzaría un valor de 9.8 m/s². Esto alega que la aceleración conforme uno se vaya alejando del núcleo va disminuyendo.

Considerando un modelo de análisis distinto en el cual se supone que la densidad de la tierra fuera constante donde la masa de la tierra se distribuyera de manera homogénea la variación de la aceleración de la gravedad con la distancia del centro de la tierra sería lineal, aunque después de salir del ultimo estrato terrestre este iría decreciendo. El modelo a mostrar llamado "Modelo para una densidad constante de las dos capas principales de la Tierra (Núcleo y manto).

Figura 3
Esquema de variación de la gravedad de acuerdo a la posición de la coordenada r.



Fuente: Elaboración propia

La ecuación de la gravedad sobre una superficie de un planeta típicamente esférico viene dada por consideración de que la densidad de la Tierra es totalmente esférica de radio R.

Fórmula 1

$$g = -\frac{GM(r)}{R^2} \quad (1)$$

Donde G es la constante gravitacional y M(r) es la masa condensada dentro de un radio r, representando la gravedad de la tierra a nivel de superficie, sin embargo, el termino R puede ser reemplazado por una variable quedando una ecuación que puede determinar el valor de la gravedad a cualquier distancia determinada a partir del centro de la Tierra.

Para determinar la gravedad a partir de una referencia de nivel del mar se realiza una traslación de ejes al nivel del mar. (0 m.s.n.m.)

Fórmula 2

$$g_h = -\frac{GM(r)}{(R+h)^2} \quad (2)$$

Donde R representa el radio de la curvatura de la tierra y h representa la coordenada de altura respecto al nivel del mar.

Reemplazando la fórmula 1 en la fórmula 2

Fórmula 3

$$g_h = g \left(\frac{R}{R+h} \right)^2 \quad (3)$$

Obteniendo la fórmula para determinar la gravedad en una altura cualquiera h en unidades de [m].

Esta simplificación es válida debido a que considerando la forma real del planeta Tierra, propiamente un geoide, debido a que la fuerza de atracción es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, lo cual implica que en el Ecuador la fuerza de gravedad es menor que en otras latitudes y a medida que se desplace al sur o norte esta fuerza se irá incrementando, aunque

los efectos de fuerza centrífuga y achatamiento de los polos hacen que la gravedad en el Ecuador sea un 0.5% menor que en los Polos.

La cuantificación de distintas obras en muchos casos, particularmente con fines comerciales es medida por costo por metro cuadrado de acuerdo a la cantidad de materiales de refuerzo considerados en su diseño y a los metros cúbicos de hormigón utilizados en su construcción, siempre y cuando se considere como una estructura de hormigón armado.

La decisión de cuantificar y disponer de acero de refuerzo en una estructura de hormigón armado depende netamente de los momentos de diseño obtenidos en el cálculo, estos momentos de diseño provienen de la combinación más crítica de las combinaciones de carga de los distintos reglamentos de diseño.

Considerando

Fórmula 4

$$U = 1.4D \quad (4)$$

Fórmula 5

$$U = 1.2D + 1.6L + 0.5(L_r \text{ o } S \text{ o } R) \quad (5)$$

Fórmula 6

$$U = 1.2D + 1.6(L_r \text{ o } S \text{ o } R) + 1(L \text{ o } 0.5W) \quad (6)$$

Fórmula 7

$$U = 1.2D + (1 \text{ o } 1.4)E + L + 0.2S \quad (7)$$

Fórmula 8

$$U = 0.9D + (1 \text{ o } 1.6)W \quad (8)$$

Fórmula 9

$$U = 0.9D + (1 \text{ o } 1.4)E \quad (9)$$

Fuente: Código ACI 318-14

De acuerdo a tales formulas se adopta la carga de servicio a aquella que genera una mayor carga de servicio último, siendo en la mayoría de los casos la más incidente la fórmula 5. El mejor uso del valor de la acción gravitatoria mejorara la cuantificación de las cargas y consecuentemente un mejor aprovechamiento de materiales de refuerzo, considerando estructuras de hormigón armado, aunque en estructuras de distinto índole como ser estructuras metálicas, el peso propio de la estructura metálica no es incidente al momento de diseño, sin embargo, las cargas de servicio sufren el mismo inconveniente, no son cuantificadas de acuerdo a su correcta influencia gravitatoria.

La presente investigación propone que se tome a consideración la influencia gravitatoria al momento de realizar cuantificaciones de cargas de servicio y cargas de peso propio, ya que la tendencia de construir edificios de mayor altura cada vez se consolida más, el problema radica en que ahora la edificación más grande que se halla en construcción ya logra alcanzar los 1007 metros, este se llama Jeddah Tower ubicado en Arabia Saudí. Aunque su altitud media de Arabia Saudí alcance los 551 m.s.n.m. este tipo de edificios se ira replicando en un futuro en distintas ciudades del mundo, por ejemplo, entre las ciudades con altitud mayor del mundo, Potosí Bolivia que ciertas zonas alcanzan hasta los 4060 m.s.n.m. construir un edificio de características similares como lo es el Jeddah Tower tendrá un efecto relevante al momento de cuantificar cargas de diseño en los pisos más altos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El método usado en la presente investigación es el método cuantitativo.

De acuerdo a la ecuación 3 obtenida esta puede ser evaluada para distintos medios. Considerando paneles de losa usuales en estructuras de vivienda comerciales que son generalmente en Bolivia de 6x6 [m]. Considerando un área útil de 1000 m² que es un parámetro referencial

en estructuras de varios pisos, se puede llegar a considerar hasta 28 paneles de losa.

Considerando un hormigón de peso normal de acuerdo al ACI 318-14 de 2400 Kg/m³ consideramos un volumen representativo a cuantificar que carece de importancia su valor, se adoptara representativamente un volumen de losa de 3 m³.

Al momento de realizar los cálculos, es menester considerar que los kilogramos es una unidad de masa y no así un vector de peso, por lo tanto, obtenemos un volumen de hormigón de 7200 Kg.

Para definir el peso de la estructura se debe multiplicar por la gravedad, y con dicho peso se procederá al diseño de las estructuras, esto siempre y cuando sea considerado la misma masa de hormigón en el cálculo.

Consideraremos el análisis en dos puntos de dos masas de hormigón iguales, en diferentes posiciones respecto a la altura sobre el nivel del mar, el edificio ficticio de análisis será considerado uno con su cota o elevación de la primera planta a nivel del mar, y el otro a 4000 metros sobre el nivel del mar con una altura de edificio ficticio de 500 metros, el radio medio de la tierra de 6371000 metros y la aceleración de la gravedad a nivel del mar de 9.80665 m/s².

$$g_{(500)} = 9.8051 \frac{m}{s^2}$$

$$g_{(4500)} = 9.7928 \frac{m}{s^2}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Considerando la aceleración de la gravedad en diferentes elevaciones, se procede al cálculo del vector peso de una masa de hormigón.

$$w_{(500)} = 70596.80 \text{ N} = 70.5968 \text{ KN}$$

$$w_{(4500)} = 70508.2413 \text{ N} = 70.5082 \text{ KN}$$

$$w_{(g=9.80)} = 70560 \text{ N} = 70.5600 \text{ KN}$$

Se presenta una clara diferencia numérica comprendida en los resultados expuestos, aunque a pesar de que esta carga no sea en su totalidad una carga incidente, esta cuando se procesan grandes cantidades de cubos de hormigón puede llegar a resultar significativa.

Notar que se cumple analíticamente que el efecto de aceleración de gravedad va disminuyendo conforme cualquier elemento se vaya alejando de la atmosfera.

Conclusiones

Se determina que la influencia de la gravedad en edificios de gran altura no resulta incidente al momento de determinar los momentos de diseño y las secciones de refuerzo, aunque en caso de contar con un estudio con exigencias muy altas en lo que concierne al diseño, este análisis es válido ya que permite cuantificar de manera más precisa el vector peso actuante sobre elementos estructurales, como ser los paneles de losa, vigas de hormigón armado y columnas de hormigón armado. A pesar de que aún no se contemplen edificios de gran escala vertical, es decir un edificio tan alto que la gravedad llegue a ser diferente en distintos pisos por la lejanía que tendría este con el núcleo de la tierra, es menester recalcar que en un futuro se contarán con edificios de mayor altura, siendo así que si será pertinente el cálculo de la influencia de la gravedad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Takabeya, F. (1969). Estructuras de varios pisos. C.E.C.S.A
- Tipler, Paul A. (2000). Física para la ciencia y la tecnología (2 volúmenes). Barcelona: Ed. Reverté.
- Ortega, Manuel R. (1989-2006). Lecciones de Física (4 volúmenes). Monytext.
- Comité ACI 318 (2015). Requisitos de reglamento para concreto estructural (ACI 318S-14). ACI