

COMPARACIÓN ENTRE ANÁLISIS ESTÁTICO Y DINÁMICO DEL CÁLCULO DE CARGA SÍSMICA SEGÚN LA NORMA ECUATORIANA DE CONSTRUCCIÓN

COMPARISON BETWEEN STATIC AND DYNAMIC ANALYSIS OF SEISMIC LOAD CALCULATION ACCORDING TO THE ECUADORIAN CONSTRUCTION STANDARD

Geovanny Guillermo Novillo Andrade¹, Javier Enrique Orna Chávez²
^{1,2} Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
Panamericana sur km. 1 ½
Riobamba - Ecuador

Email: ¹geovanny.novillo@esPOCH.edu.ec, ²javier.orna@esPOCH.edu.ec

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, V Edición 2016, No. 15 (15)

RESUMEN

En la región andina los países como Ecuador, Chile, Perú, Colombia tienen riesgo sísmico elevado, por lo cual sus estructuras deben cumplir con requisitos de resistencia frente a un sismo. El presente artículo pretende calcular y comparar cargas sísmicas calculadas según la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC la cual propone un análisis estático en estructuras de hasta 10 pisos con las cargas determinadas en un análisis dinámico específicamente se utilizará métodos modales, con la finalidad de establecer una relación entre los 2 análisis. Para ello se estudiará el comportamiento de una estructura frente a una carga sísmica para ello se empleará el espectro de aceleraciones que ofrece la Norma Ecuatoriana de Construcción.

Palabras Clave:

Riesgo sísmico, análisis estructural, cortante basal.

ABSTRACT

In the Andean region countries like Ecuador, Chile, Peru, Colombia have high seismic risk, so their structures must meet resistance requirements against an earthquake. The present article aims to calculate and compare seismic loads calculated according to the Ecuadorian Construction Standard NEC which proposes a static analysis in structures of up to 10 floors with the loads determined in a dynamic analysis specifically using modal methods, with the purpose of establishing a Relationship between the 2 analyzes. For this purpose, the behavior of a structure against a seismic load will be studied. For this purpose, the acceleration spectrum offered by the Ecuadorian Construction Standard will be used.

Keywords:

Seismic risk, structural analysis, basal shear.



1. INTRODUCCIÓN

Una de las cargas más peligrosas que debe afrontar una estructura es la carga de sismo, la cual se produce por una rápida y repentina liberación de energía, está produce vibración en la tierra que genera una aceleración en las bases de una estructura, esta liberación de energía principalmente se produce por el deslizamiento de la corteza terrestre, normalmente éstas se producen a lo largo de fallas preexistentes [1], el mecanismo de generación de un sismo no era muy entendido por parte de los geólogos, hasta que en 1906 después del sismo de San Francisco se pudo comprobar que la placa del Pacífico se había desplazado 4.7 metros hacia el norte con respecto a la placa de Norteamericana [1], estudios sobre el riesgo sísmico se remontan a 1980[2], donde se pretende estimar el riesgo de un sector frente a cargas sísmicas.

Se han desarrollado varias metodologías para evaluar el riesgo debido a riesgos naturales, por lo general estas metodologías proporcionan una estimación del daño físico potencial en una zona determinada, el daño físico se evalúa en edificios, personas muertas, heridas, sin hogar, desempleados [3].

El riesgo sísmico se define como la función de probabilidad de pérdidas derivadas de los daños a una estructura como consecuencia de la acción de un sismo [4] el mismo depende de 3 factores principalmente que son la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad[5], la peligrosidad sísmica se define como la capacidad de daño del movimiento del suelo[6], por otra parte la vulnerabilidad sísmica de una estructura expresa la relación entre la intensidad del movimiento del suelo generado por el sismo y el desplazamiento de un elemento de la estructura[4].

La intensidad de un sismo es una medida indirecta de la fuerza del sismo, que se observa en edificaciones, personas, objetos

y en si la naturaleza, entre las escalas más conocidas son la Mercalli Modificada que consta con 12 grados [7], los mismo se pueden relacionar fácilmente con la PGA, que es la aceleración que sufre la superficie del suelo, otra escala muy utilizada es la Escala Macrosísmica Europea (EMS-98), y la escala de Richter que mide la magnitud del sismo.

Muchos países de la región andina tienen en sus territorios fallas, países como Ecuador, Chile, Perú, Colombia entre otros se encuentran sobre la placa Sudamericana en su borde occidental donde convergen y generan zonas de subducción las placas de Nazca[8], por lo cual estos países tienen un riesgo sísmico elevado. El Centro de Sismología Nacional de Chile CSN, contabiliza 1570 sismos ocurridos en Chile con una magnitud mayor o igual a 7 en la escala de Richter, el primero de abril del 2014 se produjo un sismo de 8.2 a una profundidad de 38.9 km, que afecto a varias poblaciones del norte de Chile.

En Ecuador se han registrado varios sismos de gran magnitud en los últimos 50 años, el factor que más pesa en la magnitud es la dimensión de la superficie de falla que se rompe y se desplaza considerablemente para producir un sismo [9], el último sismo de gran magnitud se produjo el 16 de Abril del 2016 con una magnitud de 7.8 con epicentro en la costa ecuatoriana entre las provincias de Esmeraldas y Manabí, a una profundidad de 20 km, causando la muerte de 661 personas[10], y el colapso de la mayoría de las estructuras cercanas al epicentro del sismo en el gráfico 1 se muestra una edificación de 3 pisos que colapso debido al sismo producido.



Figura 1. Edificación colapsada en sismo producido en Ecuador, 2016.

La aceleración medida en la superficie del suelo PGA en cercanía del epicentro del sismo fue de 10.41 m/s²[11], la aceleración es importante en el diseño de edificaciones debido a que es directamente proporcional a la fuerza que debe soportar la estructura durante un evento sísmico.

El sismo tuvo una intensidad máxima de 9 EMS en la escala Macrosísmica Europea en las zonas de Pedernales y Chamanga, en estas poblaciones la mayoría de edificaciones sufrió daños severos [11], un sismo de esta categoría se define como un sismo destructivo según la EMS-98, con las siguientes características: “Pánico general. Muchas construcciones endebles colapsan. Aun los edificios ordinarios bien construidos muestran daños serios: fallas graves en los muros y falla estructural parcial.” [12], [13].

Este sismo ha demostrado que la mayoría de las construcciones en el país no cumplen con los requisitos mínimos para soportar este tipo de fenómenos naturales, desde el 2011 se encuentra vigente en el país la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC, esta norma establece los requerimientos mínimos para diseñar y construir una edificación resistente a sismos, la norma NEC-SE-DS divide al territorio ecuatoriano en 6 zonas sísmicas[14], como se muestra en la gráfica 2.

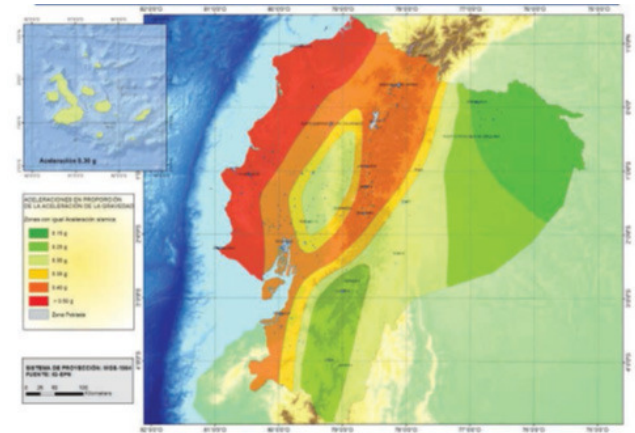


Figura 2. Zonas sísmicas en Ecuador

El mapa de las zonas sísmicas de Ecuador se basa en un período de retorno de 475 años, y establece un factor Z que es la aceleración esperada en roca, las unidades son gravedades, es decir 9.81 m/s², como se aprecia en el gráfico la zona de más alto riesgo es la costa ecuatoriana con un factor Z igual a 0.5.

Adicional a la zona sísmica la NEC-SE-DS reconoce 6 tipos de suelos siendo el más adecuado para edificaciones el tipo A y el menos apropiado el tipo F, en las zonas de Pedernales los estudios post sismo demuestran que el suelo es tipo F, por lo que para construir edificaciones en esos terrenos se debió primero hacer un análisis de suelos para establecer el verdadero riesgo sísmico de estas áreas.

La NEC-SE-DS establece 2 métodos para el cálculo de la carga sísmica, un método estático en el cual se calcula una carga cortante basal de diseño V, la misma se calcula en función a la zona sísmica y el tipo de terreno, adicional se puede calcular la carga dinámica que el sismo produce por medio de la respuesta de espectro, en el presente artículo se analizará una estructura simple para calcular la carga de sismo en base a los 2 métodos mencionados para establecer un rango en donde esta suposición es válida.

En ambos casos es necesario determinar espectro de respuesta de aceleraciones, ya que es el punto de partida para el cálculo

de las fuerzas laterales de diseño[15]. Un espectro de respuesta indica la reacción del suelo frente a una vibración producida por un sismo, lo más común es indicar esta reacción en función de aceleraciones principalmente ya que las normas ofrecen espectro de respuesta elástico, es decir considerando que la reacción del suelo y la estructura son similares, pero debido al comportamiento elástico de las estructuras estas no son iguales aunque si tienen una relación entre sí, para corregir esta variación se debe aplicar factores de reducción por ductilidad [16].

El espectro de respuesta de aceleraciones principalmente depende de 2 factores la aceleración de la base y el período de vibración de la estructura. La norma NEC-SE-DS utiliza espectros de respuesta elásticos de aceleraciones como se muestra en la gráfica 3.

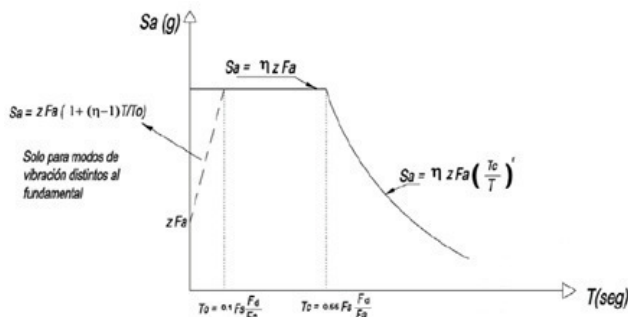


Figura 3. Espectro de respuesta elástico de aceleraciones según NEC-SE-DS

El espectro de respuesta elástico mostrado en la gráfica anterior varía dependiendo el tipo de suelo, la zona sísmica, y la región. Por lo cual se deberá fijar estas condiciones para así calcular las fuerzas laterales de diseño en las estructuras a analizar y poder comparar las mismas con un análisis estático y dinámico a fin de compararlas y establecer un rango en el cuál es aceptable utilizar una carga estática equivalente en vez del análisis dinámico.

2. METODOLOGÍA

Para el cálculo de la carga de sismo primero se deben establecer las condiciones de la estructura, las mismas que se mencionan a continuación:

- Zona sísmica: VI ($Z = 0.5$)
- Tipo de suelo: C ($F_a = 1.18$, $F_d = 1.06$, $F_s = 1.23$)
- Región: Costa- Esmeraldas ($\eta = 2.48$)

La estructura a analizar será una estructura tipo pórtico con vigas infinitamente rígidas y un grado de libertad por piso, para simplificar los cálculos, en la figura 4 se muestra un esquema de la estructura a analizar, progresivamente se aumentará el número de pisos para la comparación entre el análisis estático y dinámico.

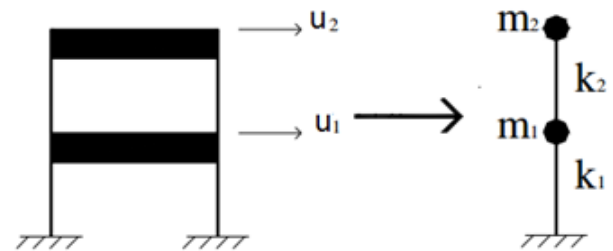


Figura 4. Modelado de la estructura a analizar

Las características del modelo a utilizar son:

- Columnas = 50x50 cm
- Módulo de Elasticidad del Concreto = 240 000 kgf/cm²
- Altura de cada piso = 3 m
- Peso en cada nivel = 25 T
- Longitud = 6 m
- Factor de ductilidad = 3
- Amortiguamiento = 5%

Con estas restricciones a continuación se detallan los cálculos para las cargas laterales de sismo para un análisis estático y dinámico. Se utilizará estructuras desde 2 pisos hasta 10 pisos para evaluar las cargas calculadas. Con las condiciones establecidas para una zona sísmica VI y un tipo de suelo

tipo C para una construcción ubicada en Esmeraldas el espectro de respuesta elástico de aceleraciones se muestra en la gráfica 5.

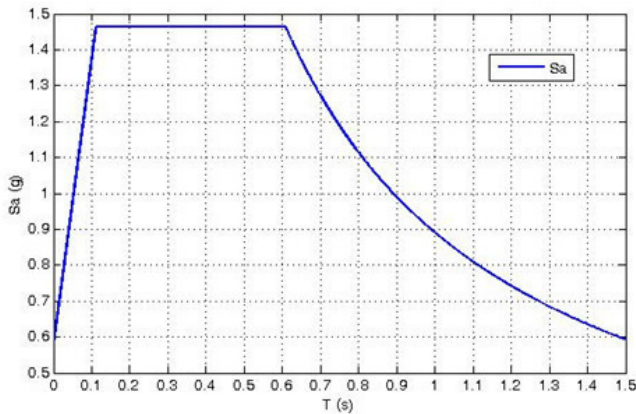


Figura 5. Espectro de respuesta elástico de aceleraciones para la estructura propuesta

Cálculo de la carga de sismo análisis dinámico - análisis estático [17]

Cuando una estructura soporta una carga de sismo, lo que se somete es a una aceleración de su base que provocará fuerzas laterales, la aceleración producida por un sismo tiene un espectro con varias frecuencias por lo que es una carga dinámica, entonces la ecuación diferencial que controla la respuesta de sistemas con un grado de libertad ante una excitación externa es:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = -m\ddot{x}_g(t) \quad Ec. 1$$

Como se puede apreciar las propiedades requeridas de la estructura para el análisis son la masa (m), el amortiguamiento del sistema(c) y la rigidez (k). Si introducimos la razón de amortiguamiento (ξ), el período fundamental de vibración (T_n) y dividimos para la masa se tiene:

$$\ddot{x}(t) + \left(\frac{4\pi}{T_n}\xi\right)\dot{x}(t) + \left(\frac{2\pi}{T_n}\right)^2x(t) = -\ddot{x}_g(t) \quad Ec. 2$$

La mayoría de estructuras de acero y concreto tienen un factor de amortiguamiento bajo alrededor de 5 a 7% (Newmark, 1982,

pág. 54) lo que provoca una respuesta subamortiguada en la cual la estructura presenta oscilaciones, la norma NEC recomienda para los cálculos considerar un 5% como razón de amortiguamiento para las estructuras y edificaciones [14].

Para la solución del problema se considerará un sistema elástico lineal por lo que se puede utilizar métodos de análisis modal, la mayoría de normas de diseño sísmico consideran adecuado un análisis espectral en la cual se calcula la respuesta máxima en cada modo de vibración de la estructura y la respuesta total se determina por medio de una combinación de máximos modales CQC (Combinación Cuadrática Completa).

A continuación se detallan los pasos a seguir con este método:

- Definir la dirección del sismo.
- Calcular la matriz de masa y rigidez de la estructura.
- Definir el factor de amortiguamiento de la estructura.
- Calcular los períodos y modos de vibración.
- Calcular los factores de participación de cada modo.
- Calcular la respuesta máxima en cada modo.
- Obtener la respuesta total por medio de CQC.

3. RESULTADOS

Para el análisis de la carga sísmica con el cálculo propuesto por la NEC 2015 y por un análisis dinámico se analiza la estructura mencionada considerándola desde 1 piso hasta 10 pisos, manteniendo constante las características del suelo y la zona sísmica en los siguientes cuadros se detallan los resultados obtenidos.

Tabla 1. Cortante basal para estructuras en toneladas

Pisos	Cortante Basal Estática	Cortante Basal Dinámica
1	14.63	13.42
2	29.26	27.78
3	43.89	40.29
4	58.53	52.57
5	70.65	64.75
6	71.95	66.40
7	73.07	68.13
8	74.05	69.94
9	74.93	71.81
10	75.72	73.70

Tabla 2. Período fundamental de vibración

Pisos	Según NEC 2015	Según análisis dinámico
1	0.1478	0.0952
2	0.2759	0.1540
3	0.3974	0.2138
4	0.5148	0.2740
5	0.6293	0.3343
6	0.7415	0.3947
7	0.8518	0.4552
8	0.9606	0.5156
9	1.0680	0.5761
10	1.1743	0.6367

En las siguientes gráficas se muestran las tendencias de la cortante basal y el período fundamental de vibración obtenido con el análisis estático y dinámico.

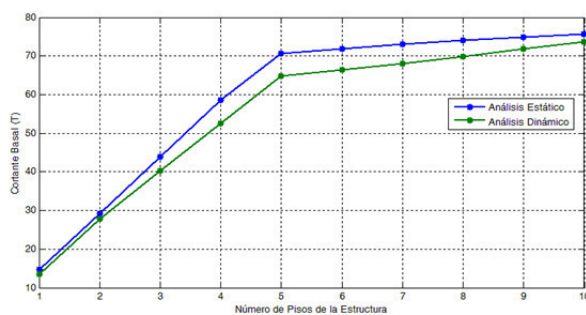


Figura 6. Cortantes Basales vs. Número de pisos

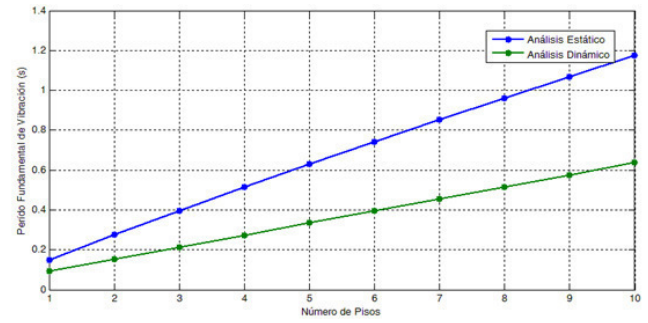


Figura 7. Períodos fundamentales vs. Número de pisos

4. CONCLUSIONES

Se puede notar que en estructuras hasta de 10 pisos la cortante calculada por el análisis estático es mayor a la calculada por el análisis dinámico, por lo que se puede concluir que el análisis estático proporcionado por la Norma Ecuatoriana de la Construcción es una carga conservadora que puede ser tomada en el cálculo de cargas sísmicas en este tipo de estructuras.

Se debe tomar en cuenta que en el método estático se considera un solo período como base mientras que en el análisis dinámico la NEC recomienda que se utilice los modos de vibración necesarios de tal forma que se considere el 90% de participación de masas en el análisis, en estructuras regulares el primer periodo es el más crítico por lo que se recomienda un análisis estático, mientras que en estructuras especiales no regulares no siempre el primer período de vibración es el más crítico y es en estos casos en donde se recomienda un análisis dinámico.

Se puede apreciar un decrecimiento muy notorio en la cortante basal en estructuras superiores a 5 pisos, esto se debe a que en estas estructuras y dadas las condiciones el período fundamental de vibración es mayor a T_c por lo que según el espectro de aceleraciones proporcionado por la NEC la aceleración S_a disminuye, este comportamiento es similar tanto para el análisis estático como el dinámico.

El período fundamental de vibración a

medida que aumenta el número de pisos de la estructura tiene una diferencia mayor en el análisis estático y dinámico, pero la variación se puede apreciar que no afecta en gran medida en el cálculo de la cortante basal, hay que considerar que el método estático utiliza una ecuación empírica mientras que en el análisis dinámico se considera a la estructura solo con columnas y losas, esta simplificación hace que el período fundamental calculado con el método dinámico sea menor al real.

El análisis de los métodos para el cálculo de la carga sísmica demuestra que para estructuras de hasta 10 pisos es suficiente realizar un análisis estático como lo recomienda la norma debido a su facilidad de cálculo y se ha demostrado que los resultados son más conservadores que el análisis dinámico.

En el presente estudio se ha utilizado una estructura regular por lo que se desprecian los efectos de torsión que puede ocurrir en la estructura, de ser una estructura irregular se recomienda un análisis dinámico.

El análisis demuestra que la carga sísmica en una estructura es considerable por lo que su omisión en el proceso de diseño puede ser fatal en el momento que ocurra un sismo por lo que se recomienda un mayor control para que todas las edificaciones cumplan con los requisitos mínimos establecidos en la Norma Ecuatoriana de la Construcción.

Se puede apreciar que la cortante basal depende de la zona sísmica y el tipo de suelo, por lo que un análisis de suelos es fundamental para determinar el tipo de suelo sobre el cuál se construirá una edificación, suelos más blandos transmiten mayor aceleración que es perjudicial para la estructura, lo recomendable es construir sobre suelos rígidos.

5. REFERENCIAS

- [1] TARBUCK, E. (2005). Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física. Madrid: Pearson Educación S.A. Pág. 308-310.
- [2] MARTÍN, A. J. (1983). Riesgo sísmico en la Península Ibérica. Madrid: Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Pág. 90
- [3] JARAMILLO, N. (2016). Evaluation of social context integrated into the study of seismic risk. International Journal of Disaster Risk Reduction, Pág. 185-198.
- [4] LÓPEZ, A. (1999). Metodología Simplificada para el Análisis del Riesgo Sísmico. Física de la Tierra, Pág. 269-284.
- [5] CRICHTON, D. (1999). The Risk Triangle. Natural Disaster Management, Pág. 102-110.
- [6] UNDRO. (1979). Natural Disasters and Vulnerability Analysis. Report Expert Group Meeting, Pág. 49.
- [7] LEYTON, F. (2010). Re-evaluation of probabilistic seismic hazard in central Chile. Revista Geológica de Chile, Pág. 455-472.
- [8] CSN. (2014). Sismicidad y terremotos en Chile. Santiago de Chile: CSN.
- [9] CAPOTE, R. (2011). Where and why earthquakes occur in the Iberian. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, Pág. 317-329.
- [10] DINASED/FGE. (2016). Informe de Situación N°71 – 19/05/2016 (20h30). Quito: Secretaría de Gestión de Riesgos.

[11] IGEPN. (15 de 02 de 2017). IG EPN. Obtenido de IG EPN: <http://www.igepn.edu.ec/mapas/mapa-evento-20160416.html>

[12] EMS-98. (1998). Escala Macrosísmica Europea 1998. Luxemburgo: Comisión Sismológica Europea.

[13] ALVAREZ. (1999). Intensidad Macrosísmica. Física de la Tierra, 237 - 252.

[14] NEC. (2015). Peligro sísmico. Diseño Sismoresistente. Quito: MIDUVI.

[15] ORDAZ, E. (2003). PROPUESTA DE ESPECTROS DE DISEÑO POR SISMO PARA EL DF . Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras, 189-207.

[16] VIELMA, W. (2005). Factores de reducción de respuesta por ductilidad de estructuras. REVISTA INGENIERÍA UC, Pág. 14-22.

[17] CHOPRA, A. (2014). Dinámica de Estructuras. México: Pearson Educación.

6. BIOGRAFÍA



¹ Geovanny Guillermo Novillo Andrade es Ingeniero Mecánico, Máster en Ciencias Mención Diseño Mecánico y Magister en Formulación Evaluación y Gestión de Proyectos Sociales y Productivos. Es consultor de proyectos de análisis estructural. Actualmente se desempeña como docente principal a tiempo completo en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.



² Javier Enrique Orna Chávez es Ingeniero Mecánico, Magíster MSc. en Diseño, Producción y Automatización Industrial. Consultor de proyectos de diseño mecánico y estructural. Actualmente se desempeña como docente ocasional a tiempo completo en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN

Fecha recepción	26 junio 2016
Fecha aceptación	09 diciembre 2016