

METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL DE EDIFICACIONES APORTICADAS DE HORMIGÓN ARMADO DEBIDO A ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES



Gallardo López Gabriela Edith



gaby58edith@gmail.com



Edificarte Ingenieros. Tarija - Bolivia. C/ 26 de Mayo #204,

RESUMEN:

Este trabajo propone una metodología simplificada para evaluar la respuesta estructural de edificios aporticados de hormigón armado expuestos a asentamientos diferenciales, mediante el uso de procedimientos inspirados en el análisis de riesgo sísmico.

Calcular los asentamientos diferenciales que una estructura puede experimentar a lo largo de su vida útil es una tarea muy complicada debido a la heterogeneidad del suelo y a las condiciones externas. Por ello la metodología utilizada permite obtener una visión probabilística de daño estructural en varios escenarios de amenazas, lo que permite desarrollar un enfoque más consistente de los límites de servicio en estructuras consideradas "esenciales" basado en la confiabilidad y limitando el análisis de vulnerabilidad a las variables más importantes e influyentes de la respuesta estructural.

Se ha tomado en cuenta diferentes parámetros que podrían influir en la respuesta estructural como ser:

la compresibilidad del suelo, ubicación y magnitud del asentamiento, tipología estructural, fluencia, características mecánicas de los materiales, geometría y cuantía de las secciones, para definir los estados de daño y desarrollar curvas de fragilidad que pueden ser utilizadas para evaluar cuantitativamente la vulnerabilidad estructural debido a asentamientos diferenciales no previstos por consolidación, deslizamientos, excavaciones cercanas, subsidencia, etc.

Palabras clave: Vulnerabilidad, respuesta estructural, asentamiento diferencial, curvas de fragilidad.

ABSTRACT

This work proposes a simplified methodology to evaluate the structural response of reinforced concrete framed buildings exposed to differential settlements, through the use of procedures inspired by seismic risk analysis.

Calculating the differential settlements that a

structure can experience throughout its useful life is a very complicated task due to the heterogeneity of the soil and external conditions. Therefore, the methodology used allows obtaining a probabilistic view of structural damage in various threat scenarios, which allows developing a more consistent approach to the service limits in structures considered "essential" based on reliability and limiting the vulnerability analysis to most important and influential variables of the structural response.

Different parameters that could influence the structural response have been taken into account, such as: soil compressibility, location and magnitude of settlement, structural typology, creep, mechanical characteristics of the materials, geometry and quantity of the sections, to define the states damage and develop fragility curves that can be used to quantitatively assess structural vulnerability due to unforeseen differential settlements due to consolidation, landslides, nearby excavations, subsidence, etc.

Keywords: Vulnerability, structural response, differential settlement, fragility curves.

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace más de 60 años se han desarrollado estudios y metodologías para calcular la respuesta de la edificación al asentamiento diferencial, una tarea complicada debido a la particularidad de cada estructura. Algunos estudios relevantes son los realizados por Skempton y MacDonald (1956), Burland y Wroth (1974) y Son y Cording (2011) que representan las diferentes tendencias desarrolladas a lo largo del tiempo como ser: los métodos empíricos, los métodos basados en el análisis estructural y los métodos basados en modelaciones numéricas.

Skempton y MacDonald (1956) través de la observación de daños causados por asentamientos diferenciales en 98 edificios de diferente tipología estructural recopilaron información estadística para establecer los niveles de daño arquitectónico y estructural. Usaron la distorsión angular como parámetro para establecer el nivel de daño, el cual se define como la relación entre el asentamiento diferencial entre dos columnas vecinas y la distancia horizontal entre ejes. Por ejemplo el valor límite de distorsión angular adoptado para iniciar la aparición de grietas en paredes o acabados es de $1/300$ y un valor de $1/150$ para generar daños estructurales, es decir, para luces de 6 m estos límites corresponde a 2 y 4 cm, respectivamente.

Burland y Wroth (1974) afirmaron que la aparición de fisuras en las estructuras era resultado de la deformación crítica a tracción de los materiales (ϵ_{lim}), por lo cual utilizando principios de la resistencia de materiales y análisis estructural establecieron un nuevo enfoque al representar al edificio como una viga elástica, homogénea, simplemente apoyada, de longitud y altura igual que el edificio, pero con espesor unitario, sin tomar en cuenta la ubicación de puertas y ventanas. Para evaluar la respuesta estructural aplicaron los posibles desplazamientos (aislados) del suelo de fundación a la viga equivalente como una carga puntual y calcularon las deformaciones usando la ecuación de Timoshenko, que toma en cuenta las deformaciones por corte y flexión.

Son y Cording (2011) realizaron estudios numéricos para modelar un edificio de cuatro pisos con tres diferentes tipologías estructurales, cada uno fue sometido a un mismo perfil de asentamiento en dos tipos de suelo para evaluar la respuesta realizando análisis elásticos e inelásticos y tomando en cuenta la interacción suelo-estructura. Los resultados

demonstraron que la respuesta estructural es altamente dependiente de la compresibilidad del suelo. Una vez que el agrietamiento ocurre, las grietas subsecuentes se concentran alrededor de las iniciales y se propagan aún más siguiendo el perfil de asentamiento del suelo provocando mayor distorsión a la estructura.

El avance de la tecnología ha permitido que se desarrollen investigaciones de vulnerabilidad estructural por asentamientos no previstos del suelo, usando modelaciones numéricas que son más económicas que los estudios experimentales y dan un panorama aproximado que permite identificar los elementos críticos de las estructuras, reforzarlos y mejorar su diseño.

Entre las investigaciones de vulnerabilidad estructural por asentamientos diferenciales utilizando curvas de fragilidad destacan las realizadas por: Negulescu y Foerster (2010), quienes realizaron análisis numéricos para determinar la vulnerabilidad de un pórtico de hormigón armado expuesto a asentamientos por excavaciones cercanas, Cifuentes (2011), analizó la vulnerabilidad física de estructuras de uno y dos pisos, asociada a deslizamientos, De Lira (2016), estudió la vulnerabilidad estructural debido a la subsidencia del suelo.

En Bolivia la normativa no establece recomendaciones cuantitativas sobre los límites tolerables de asentamientos diferenciales en las edificaciones, sino que lo deja al criterio del ingeniero calculista. Por lo tanto es deber del ingeniero estructural realizar una evaluación realista de la vulnerabilidad de las estructuras frente a las amenazas que pueden suscitar a lo largo de su periodo de vida útil, en especial si se trata de estructuras consideradas esenciales como

ser: colegios, hospitales, fábricas, etc.

Este trabajo de investigación realiza una revisión general de las metodologías desarrolladas a lo largo de los últimos 60 años para calcular la respuesta estructural debido a los asentamientos diferenciales y los estados de daños alcanzados, haciendo énfasis en particular a la evaluación de la vulnerabilidad de estructuras esenciales de cinco pisos formadas por un sistema de pórticos de hormigón armado con fundaciones superficiales de zapatas aisladas conectadas entre sí con vigas de enlace y considerando la interacción suelo-estructura, para lo cual se realiza el modelamiento computacional en el programa SAP2000 incorporando las características mecánicas de los materiales constituyentes y su afectación a través del tiempo en 0.5 y 5 años.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación realizada es de tipo paramétrica, en la cual a través de la manipulación de variables se identificará los factores más relevantes en la respuesta estructural debido a diferentes asentamientos del suelo y los niveles de daño alcanzados, tomando en cuenta la interacción suelo-estructura, compresibilidad del suelo, las propiedades mecánicas de las secciones, la no linealidad de los materiales y el tiempo en el que es aplicado el asentamiento, con el fin de desarrollar una metodología simplificada que permita evaluar la vulnerabilidad de estructuras aporticadas de hormigón armado expuestas a asentamientos diferenciales.

En la investigación se utiliza procedimientos inspirados en el riesgo sísmico, como ser: el análisis estático no lineal o pushover. Por lo general en este tipo de análisis se impone un conjunto de fuerzas laterales a la estructura que van incrementando

de manera monotónica hasta que la estructura alcanza su capacidad máxima, lo cual nos permite identificar la secuencia de agrietamiento, ductilidad, cedencia y falla de los elementos. A pesar de que los sismos son movimientos horizontales de rápida duración a comparación de los asentamientos diferenciales, es posible adaptar este análisis para imponer movimientos monotónicos verticales a las fundaciones.

Se incorpora además al análisis: la interacción suelo – estructura, con el fin de estudiar la incidencia de la compresibilidad del suelo en los efectos del asentamiento diferencial. Para lo cual se utiliza el programa ISE-2007, desarrollado por Echavarría y Hoyos (1995) que permite enlazarse al SAP2000 y realizar diferentes ciclos de iteración en el archivo de datos del modelo de la estructura, hasta igualar las deformaciones verticales de los apoyos calculadas inicialmente con un coeficiente de balasto “K” con las deformaciones del suelo obtenidas con el módulo de compresibilidad volumétrica “mv”, hasta un nivel de tolerancia aceptable.

Así mismo el suelo es modelado como un conjunto espacial de estratos paralelos, caracterizado cada uno de ellos según sus propiedades físicas y mecánicas, teniendo en cuenta que si los esfuerzos admisibles son alcanzados en alguna dovela, el ISE-2007 hace la corrección correspondiente por medio de una redistribución de esfuerzos con las dovelas adyacentes, siguiendo el modelo de medio continuo propuesto por Zeevaert (1975).

Las deformaciones del hormigón dependientes del tiempo como la fluencia se calcula con el método propuesto por la CEP-FIB del módulo efectivo, para un tiempo de 0.5 y 5 años, que por su sencillez el programa SAP2000 las incluye en el análisis, en opciones de propiedades avanzadas de los materiales que dependen del tiempo.

2.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES CONSTITUTIVOS

Se toma en cuenta la no linealidad de los materiales. Para lo cual se eligen los modelos propuestos por Hognestad (1951) y Kent y Park (1971) para el hormigón, y los valores propuestos por Fargier y Fargier (2010) para definir analíticamente el comportamiento del acero.

Figura 1. Variación del comportamiento no lineal del hormigón en diferentes secciones de la estructura (Elaboración Propia).

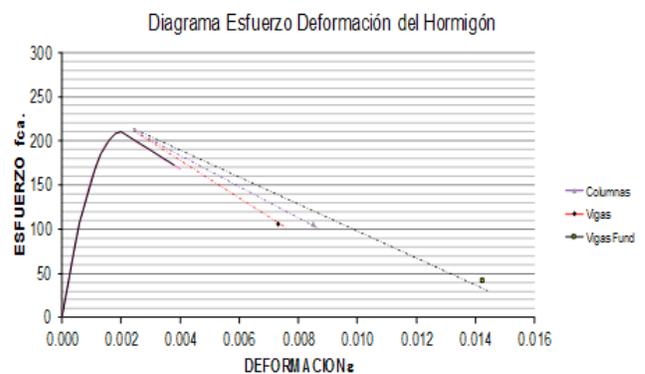
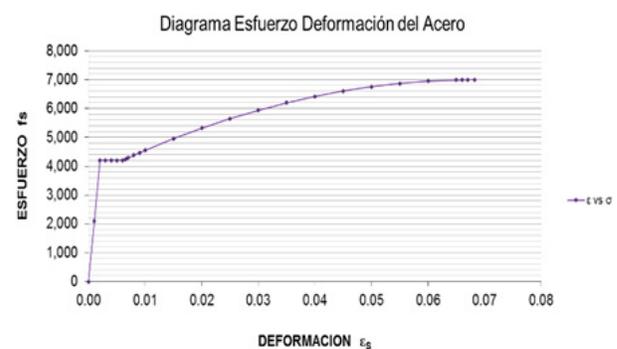


Figura 2. Modelo constitutivo del acero $F_y=4200\text{kg/cm}^2$ (Elaboración Propia).



Para el hormigón se eligió una resistencia característica de $f'c=210\text{ kg/cm}^2$; un módulo de elasticidad igual a $E_o=219.600\text{ kg/cm}^2$ en la etapa lineal elástica y con valores variables en el descenso de la curva del modelo constitutivo según las características mecánicas de cada sección.

El acero tiene una resistencia a la fluencia de $F_y=4200 \text{ kg/cm}^2$, $f_{su}=7.000 \text{ kg/cm}^2$; y un módulo de elasticidad igual a $E_s=2.100.000 \text{ kg/cm}^2$.

El suelo de fundación es de compresibilidad media, cuyas propiedades físicas y mecánicas se obtuvieron del proyecto de pregrado Gallardo, G. (2014), realizada en el laboratorio de suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, con una capacidad admisible igual a $q_{adm}=1.70 \text{ kg/cm}^2$ y un módulo de compresibilidad igual a $m_v=0.01 \text{ cm}^2/\text{kg}$ obtenido del ensayo de consolidación unidimensional.

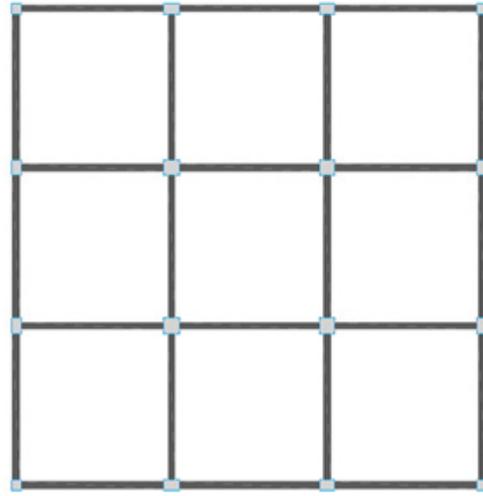
2.2 DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA

Para comprender el comportamiento de las edificaciones de hormigón armado afectadas por los asentamientos diferenciales en forma incremental, monótonica y lenta, es necesario analizar la deformación de las secciones críticas de los elementos solicitados a flexión y flexo-compresión en base a los modelos constitutivos definidos tanto para el hormigón como el acero y establecer la relación que existe entre el momento resistente de la sección y su correspondiente curvatura a través de la elaboración de los denominados diagramas momento-curvatura.

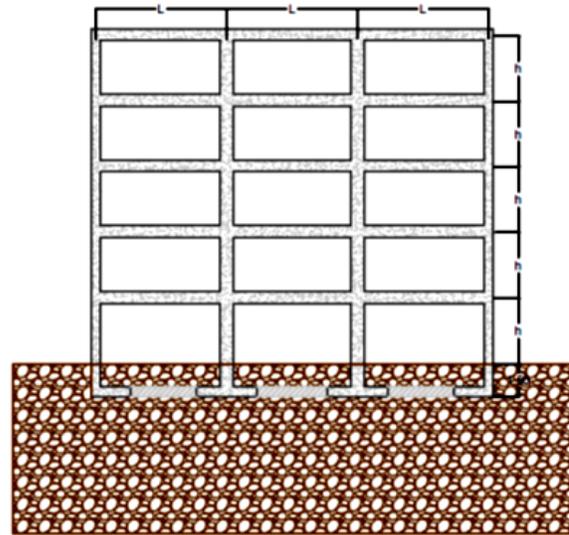
2.3 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS

En la figura 3 se muestra la planta tipo utilizada en los análisis, el cual consiste en un sistema aporticado de hormigón armado de 5 pisos, simétrico, con una altura de entrepisos igual a 3m y 3 vanos de vigas de 6m en cada dirección.

Figura 3. a) Vista en planta de la tipología propuesta para el análisis.



b) Vista de elevación (Elaboración Propia)



El sistema de fundación está formado por zapatas aisladas: centrales, medianeras y de esquina según su ubicación, conectadas entre sí por vigas de enlace a un nivel de desplante de 1.50m, apoyadas en estratos de 10 metros de suelo compresible.

Las vigas interiores, exteriores, de arrioste y columnas de la estructura se modelaron en el

programa SAP2000 como elementos tipo “frame”. Las zapatas se modelaron con la opción “Shell”.

Aguirre y Amaris (1997) recomiendan para la modelación de zapatas aisladas en el programa ISE, usar una malla de 25 nodos en adelante para la obtención de momentos y cortantes representativos.

El módulo de reacción de suelo se modela a través de elementos “Springs”, resortes traslacionales en la dirección “Z” y ubicados en los nodos de los elementos Shell, los cuales sólo son un artificio en el proceso de iteración, el cual consiste en asignar un valor inicial del módulo de Balasto “K”, mismo que se va modificando con cada ciclo de iteración del ISE.

Figura 4. Nivel de desplante de la fundación y profundidad de influencia del suelo en los asentamientos. (Elaboración Propia).

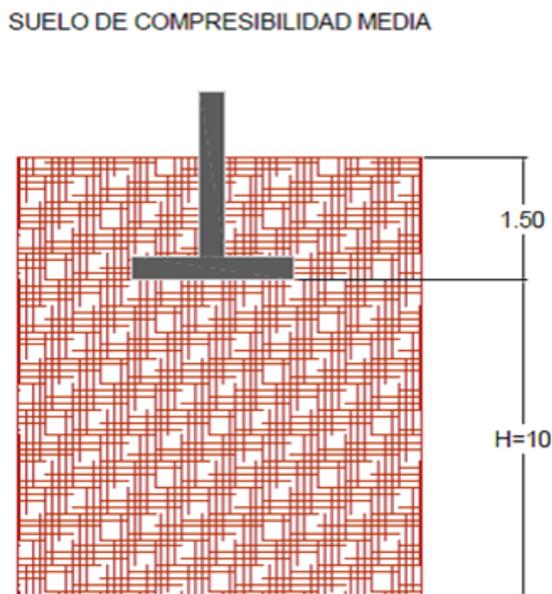
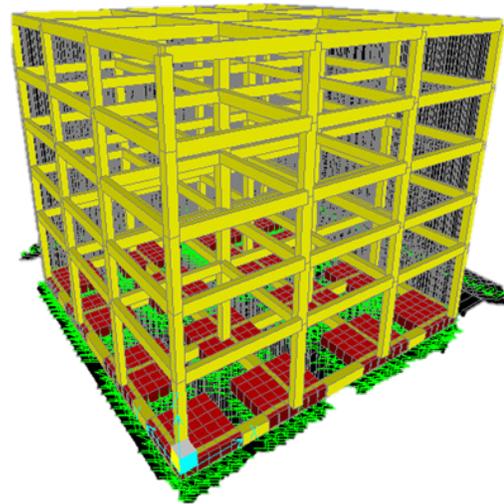


Figura 5. Modelado de la estructura en el programa SAP2000.



2.4 TIPOS DE ANÁLISIS

Se considera dos tipos de análisis, en el primero se realiza un análisis estático lineal del edificio en el programa SAP2000, tomando en cuenta la interacción suelo – estructura para obtener las solicitaciones y diseñar del refuerzo; en el segundo análisis se añade al SAP2000 la cuantía calculada de cada sección, las características dependientes del tiempo de los materiales y los asentamientos inducidos en los nudos de zapatas o grupo de zapatas: central, de esquina o medianera según corresponda, para realizar un análisis estático no lineal con la obtención de solicitaciones en cada etapa de incremento del asentamiento hasta la falla de algunos de sus elementos.

2.5 ASENTAMIENTOS VERTICALES IMPUESTOS EN EL ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL.

Se impone una gama de desplazamientos verticales en los nudos de las zapatas, que van aumentando monótonicamente en cada etapa del análisis

(desde 0.10mm, 0.15mm, 0.20mm, 0.25mm, etc) para simular los movimientos lentos característicos del suelo. Los modelos de asentamiento diferencial analizados en la estructura son:

- El modelo I corresponde al asentamiento diferencial impuesto en una zapata de medianería en un periodo de 0.5 y 5 años.
- En el modelo II, los asentamientos inducidos afectan a una zapata central durante un periodo de 0.5 y 5 años.
- En el modelo III, la zapata de esquina se sometió a asentamientos impuestos durante un periodo de 0.5 y 5 años respectivamente.
- En el modelo IV, un grupo de zapatas de borde fueron sometidas a asentamientos, que generaron un perfil convexo del suelo (\cap) durante un periodo de 5 años.
- En el modelo V, un grupo de zapatas interiores a un eje se sometieron a asentamientos que generaron un perfil cóncavo del suelo (\cup) durante un periodo de 5 años.

2.6 PARÁMETROS INDICADORES DEL DAÑO

Las solicitaciones que se obtienen del segundo análisis son los momentos M2-2, M3-3, y la fuerza axial P, para determinar la capacidad de rotación a flexión en vigas y a flexo compresión en columnas. Por lo cual se proponen indicadores de daños locales basados en valores de las deformaciones unitarias del hormigón “ ϵ_c ” y del acero “ ϵ_s ”. Los estados discretos de daño definidos como: muy ligero y ligero son alcanzados inicialmente por el acero debido a que tiene un comportamiento dúctil, cuando el acero sobrepasa su límite elástico las deformaciones unitarias del hormigón se incrementan y alcanzan estados de daño: moderado,

extensivo y completo. En la tabla 1 se muestran los valores de las máximas deformaciones unitarias del hormigón y acero para cada tipo de daño con su correspondiente descripción.

Esta tabla corresponde a una recopilación de valores asumidos en diferentes investigaciones consultadas de la bibliografía con su correspondiente adaptación a este trabajo de investigación.

2.7 IDENTIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS CRÍTICOS DE LA ESTRUCTURA.

Una de las cualidades de las estructuras de hormigón armado es la ductilidad aportada por el acero, que proporciona capacidad de rotación plástica a las secciones frente a solicitaciones mayores del diseño, redistribuyendo los esfuerzos a otras secciones contiguas menos solicitadas.

Luego de una revisión general del incremento en las solicitaciones en la estructura después del asentamiento diferencial se comprobó que los elementos críticos son los que están conectados a la línea de aplicación del desplazamiento vertical, afectando a vigas, columnas y vigas de enlace respectivamente.

2.8 CONSTRUCCIÓN DE LAS CURVAS DE FRAGILIDAD.

Las curvas de fragilidad se construyen a partir del ajuste de funciones de distribución log-normal a los resultados obtenidos en el análisis. Según Bonett (2003) este tipo de función describe la dispersión en la ocurrencia de fallo de los elementos, ocasionado por la variabilidad de los desplazamientos verticales, compresibilidad del suelo, rigidez de la fundación, aplicación de las cargas, etc.

Las curvas de fragilidad permiten obtener para

cada valor de asentamiento la probabilidad de exceder un determinado estado de daño. Se construyen usando funciones de distribución acumulativa log-normal, basándose en dos parámetros de fragilidad: un valor medio ($\mu\delta$), y un valor de la dispersión estándar ($\sigma\delta$) en la siguiente fórmula matemática:

$$F_i(D) = \Phi \left[\frac{1}{\sigma\delta} \ln \left(\frac{\delta_{max}}{\mu\delta} \right) \right] \quad (1)$$

Tabla 1.
Indicadores de daño local según los valores permisibles de las deformaciones unitarias del hormigón y acero para cada estado límite.

Daño Estructural	Descripción		
Muy Ligero	Se observan pequeñas fisuras muy finas o del espesor de un cabello (<0.1mm). En términos del diagrama "momento curvatura" se puede indicar que los elementos han sobrepasado el punto de agrietamiento pero están distantes del punto de fluencia.		
	$\epsilon_c =$	Grafica M- ϕ	$\epsilon_s =$
Ligero	Se pueden observar pequeñas fisuras por flexión menores a 0.4 mm en la cara traccionada, por lo que el estado límite de deformación unitaria corresponde al límite de la elasticidad del acero.		
	$\epsilon_c =$	Grafica M- ϕ	$\epsilon_s =$
Moderado	La sección se encuentra al límite de la respuesta elástica lineal, el acero fluye y comienzan a aparecer fisuras más pronunciadas.		
	$\epsilon_c =$	0.002	$\epsilon_s =$
Extensivo	Respuesta no lineal de la sección, se alcanza la resistencia a flexión, el hormigón llega a la máxima deformación útil a la compresión, se inicia el desprendimiento del recubrimiento, lo que conlleva a una reparación significativa de la estructura.		
	$\epsilon_c =$	0.003	$\epsilon_s =$
Completo	Desprendimiento total del hormigón de recubrimiento de la sección.		
	$\epsilon_c >$	0.0038	$\epsilon_s =$

(Elaboración propia).

Donde $F_i(D)$ es la probabilidad que el elemento alcance un estado de daño "i" o un estado de daño más severo como una función del parámetro de demanda "D"; σ denota el parámetro de la distribución normal estándar acumulada, $\sigma\delta$ es la desviación estándar logarítmica, δ_{max} es el valor límite para el estado de daño "i" y $\mu\delta$ es el valor medio de los parámetros indicadores de daño correspondientes a las deformaciones unitarias de la sección. La probabilidad de excedencia para que el elemento sobrepase el estado de daño "i" está dado por:

$$P_i(D) = 1 - F_i(D) \quad (2)$$

Las curvas de fragilidad se grafican tabulando las deformaciones unitarias de las secciones transversales más solicitadas en vigas y columnas por los momentos flectores inducidos de los asentamientos diferenciales. Para obtener la probabilidad de excedencia asociado al estado de daño anteriormente descrito se utiliza el programa Excel usando la función de distribución Log-normal con el cálculo de la media y desviación estándar, para poder generar las curvas de fragilidad correspondientes.

A continuación se enumeran los pasos de la metodología propuesta para realizar el análisis de vulnerabilidad de una estructura sometida a asentamientos diferenciales:

- Se define la tipología estructural y las características mecánicas de los materiales constitutivos.
- Se elige el sistema de fundación.
- Se realiza el pre-dimensionamiento de los elementos de la estructura.

- Se modela la estructura y el suelo de fundación en un programa de elementos finitos.
- Se definen estados de cargas y combinaciones.
- Se analiza la estructura tomando en cuenta la interacción suelo-estructura.
- Se calcula el refuerzo de las secciones con la norma ACI.
- Se ajustan las curvas analíticas esfuerzo-deformación de los materiales constituyentes de la estructura, considerando el comportamiento no lineal
- Se determinan las gráficas: Momento-curvatura de las secciones de vigas y columnas, incluyendo los efectos del tiempo.
- Se definen los parámetros indicadores del daño en función de las deformaciones unitarias del hormigón y del acero asociado a un estado discreto de daño.
- Posteriormente se realiza un análisis estático no lineal, imponiendo asentamientos verticales en los nodos de cada zapata: central, de esquina y medianera que van incrementando de manera monotónica.
- Se identifican los elementos críticos de la estructura en cada modelo de asentamiento diferencial para la obtención de sus correspondientes solicitaciones.
- A través de diagramas momento-curvatura se obtienen las deformaciones unitarias de las secciones.
- Se calculan las curvas de fragilidad.

3. RESULTADOS

Después de analizar los modelos de asentamientos propuestos, se obtienen las solicitaciones para

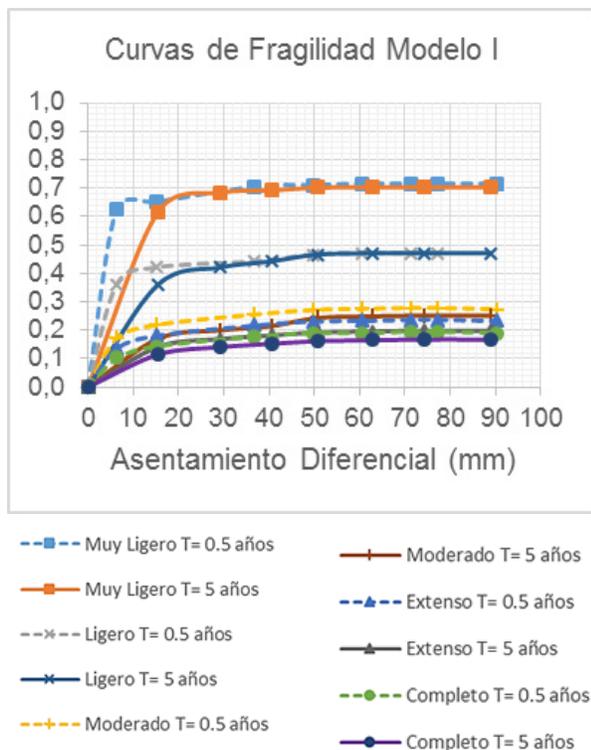
cada escenario de amenaza y se grafican las curvas de fragilidad. Donde el eje de las abscisas representa la magnitud de la amenaza y el eje de las coordenadas la probabilidad de que los elementos críticos identificados sufran algún tipo de daño de los cinco definidos en la Tabla 1.

MODELO I. ASENTAMIENTOS IMPUESTOS A LA ZAPATA MEDIANERA

El Modelo I de asentamiento diferencial alcanzó diferentes probabilidades de sobrepasar algún tipo de daño según el tiempo de aplicación de los asentamientos en 0.5 ó 5 años y a partir de esto se grafican las curvas de fragilidad correspondientes.

Figura 6.

Comparación de las curvas de fragilidad del Modelo I según el tiempo de aplicación del asentamiento (Elaboración Propia).



En la gráfica se puede observar que el máximo asentamiento diferencial alcanzado para los

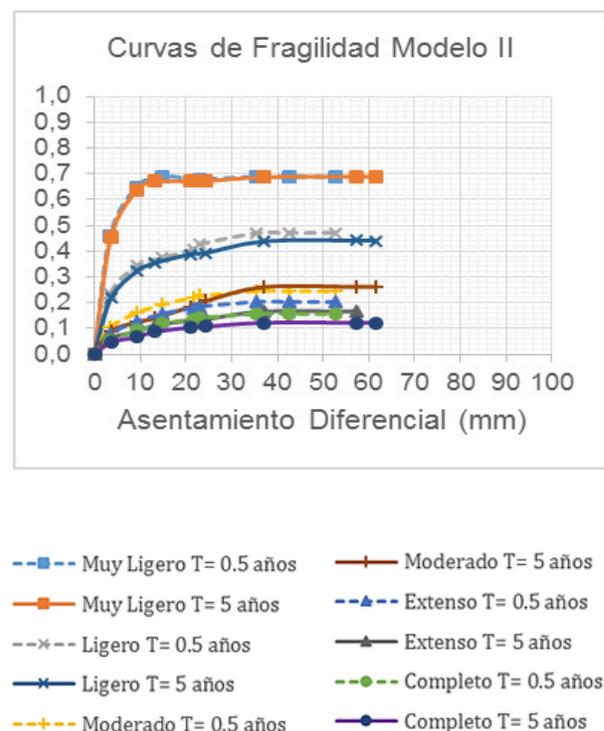
tiempos considerados de 0.5 y 5 años es alrededor de 90mm. También existe una variación favorable con la disminución de la probabilidad de excedencia de daños para los asentamientos impuestos a lo largo de 5 años, el cual se hace más evidente en los primeros 15 mm del asentamiento diferencial y que luego se va uniformizando hasta alcanzar una diferencia promedio de 3% en favor de los asentamientos impuestos a largo plazo.

MODELO II. ASENTAMIENTOS IMPUESTOS A LA ZAPATA CENTRAL

Los asentamientos impuestos a la zapata central de la estructura alcanzaron diferentes probabilidades de sobrepasar algún tipo de daño, los cuales se observan en la figura 7 para un tiempo igual a 0.5 ó 5 años.

Figura 7.

Comparación de las curvas de fragilidad del Modelo II según el tiempo de aplicación del asentamiento (Elaboración Propia).



Al observar las curvas de fragilidad se puede determinar que la estructura toleró 10mm más de asentamiento diferencial impuesto a lo largo de 5 años que en un tiempo de 0.5 años. También existe una variación favorable con la disminución de la probabilidad de excedencia de daños para los asentamientos impuestos en 5 años.

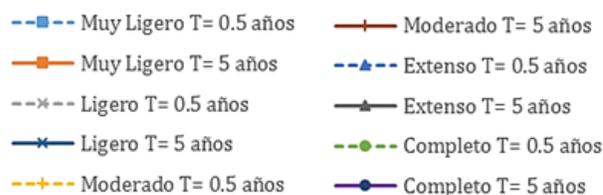
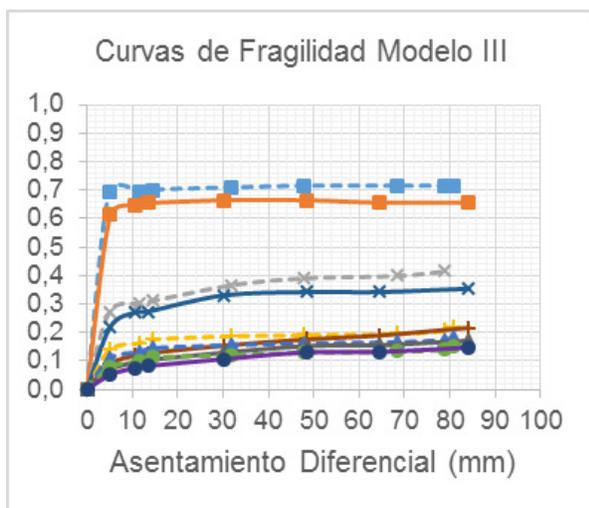
MODELO III. ASENTAMIENTOS IMPUESTOS A LA ZAPATA DE ESQUINA

Los asentamientos diferenciales impuestos a la zapata de esquina de la estructura alcanzaron menores probabilidades de sobrepasar algún tipo de daño en comparación a los asentamientos en la zapata central y medianera.

El máximo asentamiento diferencial tolerado por la estructura es de 81 mm y 84 mm, para T=0.5 y 5 años respectivamente, con una variación favorable para los asentamientos impuestos a lo largo de 5 años, al igual que disminución de la probabilidad de excedencia de daños.

Figura 8.

Comparación de las curvas de fragilidad del Modelo III según el tiempo de aplicación del asentamiento (Elaboración Propia).

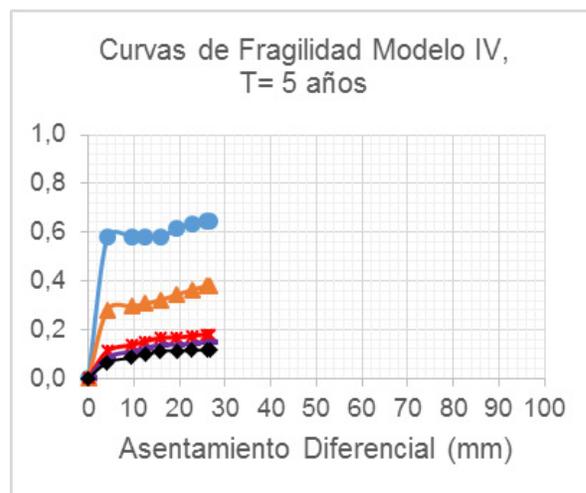


MODELO IV. ASENTAMIENTOS IMPUESTOS A ZAPATAS DE BORDE

El Modelo IV de asentamientos monotónicos impuestos a un grupo de zapatas de borde que genera un perfil convexo del suelo (M), toleró un asentamiento máximo diferencial igual a 27 mm con diferentes probabilidades de sobrepasar algún tipo de daño.

Figura 9.

Curvas de fragilidad del Modelo IV, con asentamientos diferenciales aplicados en las zapatas de borde en un tiempo igual a 5 años (Elaboración Propia).

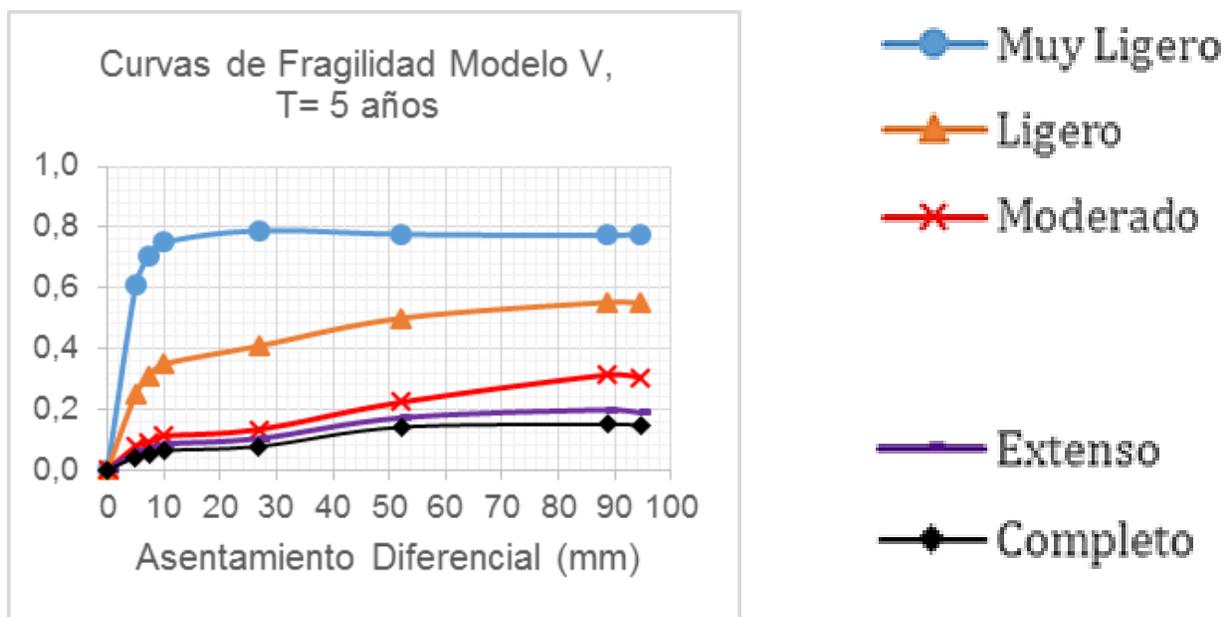


MODELO V. ASENTAMIENTOS IMPUESTOS A ZAPATAS INTERIORES A UN EJE

El Modelo V, que genera un perfil de deformación del suelo cóncavo (\cap) después de ocurrido los asentamientos impuestos a un grupo de zapatas centrales a un eje, alcanzó diferentes probabilidades de sobrepasar algún tipo de daño, según se observa en las curvas de fragilidad. El asentamiento máximo tolerado por la estructura fue de 95mm.

Figura 10.

Curvas de fragilidad del Modelo V, con asentamientos diferenciales aplicados en las zapatas centrales en un tiempo igual a 5 años (Elaboración Propia).



SENSIBILIDAD DEL DAÑO SEGÚN CONFIGURACIÓN DE ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES

Se compara el daño estructural calculado de los cinco modelos de asentamiento diferencial en una tabla global de daño, considerando el total de los elementos de la estructura, para observar la variabilidad de la vulnerabilidad según la configuración de los asentamientos diferenciales impuestos en zapatas individuales o grupales.

Al comparar la vulnerabilidad estructural de los cinco modelos de asentamientos, se analiza la capacidad de servicio de la estructura con la distribución global de daños alcanzados y se puede evidenciar que el Modelo V (Asentamiento de un grupo de zapatas centrales a un eje) genera mayor vulnerabilidad en la estructura a sufrir daños, seguido por el Modelo IV (Asentamiento de un grupo de zapatas de borde), los modelos de asentamiento individual: Modelo II (Asentamiento de zapata central), Modelo I (Asentamiento de zapata medianera) y finalmente el Modelo III (Asentamiento de zapata esquinera).

Tabla 2.

Tabla resumen de la vulnerabilidad global de la estructura según la configuración de asentamientos impuestos.

Resumen				
Δ (mm)	Modelo	Daño Muy Ligero	Daño Ligero	Daño Moderado
		%	%	%
95	V (Zapatas Centrales)	78	55	30
27	IV (Zapatas de Borde)	51	30	14
62	II (Zapata Central)	22	15	8
89	I (Zapata Medianera)	18	12	6
84	III (Zapata de Esquina)	12	7	4

4. DISCUSIÓN

Con base a los resultados obtenidos se comprueba que es posible aplicar una metodología sencilla, económica y rápida, para evaluar la vulnerabilidad de estructuras aporricadas de hormigón armado afectadas por asentamientos diferenciales a lo largo de un tiempo definido.

Las curvas de fragilidad para evaluar el daño pueden calcularse considerando la no linealidad de los materiales, la interacción suelo estructura y los efectos a largo plazo para obtener valores representativos a la realidad constructiva.

Al comparar la probabilidad de daño calculado para los asentamientos ocurridos en un tiempo de 0.5 años vs. 5 años para un mismo modelo, existe una variación favorable en las estructuras que fueron sometidas a asentamientos diferenciales en un tiempo de 5 años. El modelo II (zapata central) toleró 10 mm más de asentamiento diferencial que en un tiempo de 0.5 años para rangos de vulnerabilidad similares, también se redujo la probabilidad de daño con un asentamiento mayor en los modelos I (zapata medianera) y III (zapata de esquina). Evidenciando que la influencia del flujo plástico permite a las estructuras de hormigón armado adaptarse y tolerar mejor los asentamientos diferenciales con el pasar del tiempo.

La ubicación del asentamiento diferencial parece tener mayor incidencia en los daños de la estructura que la magnitud del mismo, siempre que se encuentre en valores similares. El asentamiento de una zapata central (Modelo II) con una magnitud de 63mm genera mayor vulnerabilidad en la estructura a sufrir daños que el asentamiento de 89mm de una zapata medianera (Modelo I) y que el de una zapata de esquina (Modelo III) con un asentamiento de 84mm.

El perfil de deformación del suelo después de ocurrido los asentamientos impuestos a la estructura, podría

influir en el asentamiento diferencial máximo que puede tolerar la misma. El asentamiento cóncavo (hacia abajo) del suelo por el descenso de un grupo de zapatas centrales (Modelo V, $\delta_{\text{máx}}=95$ mm) fue aproximadamente tres veces mayor que la deformación convexa del suelo (hacia arriba) por el asentamiento de un grupo de zapatas de borde (Modelo IV, $\delta_{\text{máx}}=27$ mm) en los mismos rangos de probabilidad de daño.

La analogía utilizada del análisis sísmico “Pushover” para evaluar el comportamiento de una estructura sometida a diferentes modelos de asentamiento diferencial, es una técnica de gran ayuda que permite generar curvas de fragilidad para evaluar el daño en diferentes escalas: muy leve, leve, moderado, extenso y completo, para obtener una visión probabilística en varios escenarios de amenazas, al igual que en los estudios de riesgo sísmico pero en este caso utilizando los asentamientos diferenciales como el factor de amenaza.

Las curvas de fragilidad permiten calcular el nivel de daño que puede experimentar una estructura debido a asentamientos diferenciales, considerando la compresibilidad del suelo, ubicación y magnitud del asentamiento, tipología estructural, tipo de fundación, características geométricas y mecánicas de las secciones de los elementos estructurales, etc. lo que permite desarrollar un enfoque más consistente de los límites de servicio basado en la confiabilidad de estructuras consideradas esenciales.

El análisis de vulnerabilidad por asentamientos diferenciales realizado a los cinco modelos sugiere que la probabilidad de que la estructura exceda un daño moderado, extenso y completo es menor al 0.30, 0.19 y 0.15 respectivamente. Según estos resultados la posibilidad de que la estructura

colapse totalmente es mínima debido a que los esfuerzos adicionales generados en los elementos próximos al asentamiento son redistribuidos a las demás secciones. Sin embargo es posible que en casos extremos debido a las excesivas deformaciones, la estructura quedaría fuera de uso y representaría un problema de servicio.

Para finalizar, este trabajo representa un pequeño paso para obtener una metodología que nos permita evaluar la vulnerabilidad de estructuras aporticadas de hormigón armado expuestas a asentamientos diferenciales, combinando los aportes de varios investigadores a nuestra realidad constructiva, por lo tanto se espera que este trabajo sirva como un punto de partida para futuras investigaciones como ser:

- a) Análisis de la vulnerabilidad estructural de columnas esbeltas por asentamientos diferenciales, considerando la secuencia constructiva y efectos P-delta.
- b) Influencia del flujo plástico en la reducción de daños en estructuras afectadas por asentamientos diferenciales de consolidación primaria del suelo.
- c) Vulnerabilidad estructural debido al desplazamiento horizontal en los apoyos de fundación.

5. BIBLIOGRAFÍA

- ✍ Aguirre C.M. y Amaris A.D., (1997) Análisis estructural de Zapatas Medianeras. Tesis ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia – Seccional Medellín.
- ✍ Bonett, R., (2003) Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de Edificios. Aplicación a entornos Urbanos en Zonas de amenaza Alta y Moderada. Tesis Doctoral. Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña.

✍ Burland, J.B. and Wroth, C.P., (1974) "Settlement of Buildings and Associated Damage" en Proceedings of the Conference on Settlement of Structures – Session V, Cambridge, England, pp. 611–654.

✍ Cifuentes, D. L., (2011) Modelación de Vulnerabilidad Física de estructuras de uno y dos pisos, asociada a deslizamientos. Tesis Magister, Universidad Nacional de Colombia.

✍ De Lira G., (2016) Estudio de la Vulnerabilidad Estructural de las Construcciones ante Fracturamientos por Subsistencia. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Aguas Calientes.

✍ Echavarría W. y Hoyos F., (1995) Efecto Tridimensional en el Análisis de Sistemas de Cimentación Superficial por el método de Interacción Estática Suelo Estructura. Tesis de Licenciatura. Colombia, Universidad Nacional de Colombia – Seccional Medellín.

✍ Fargier, L. B. y Fargier, L. E., (2010) Concreto Armado, Comportamiento y Diseño. Primera Edición. Kapi.

✍ Gallardo, G., (2014) Rigidización del Sistema de fundación para minimizar de la aparición de fisuras en las estructuras por asentamientos diferenciales. Tesis de Licenciatura. Bolivia, Universidad Autónoma Juan Misael Saracho – Tarija.

✍ Hognestad E., (1951) "A Study of combined bending and axial load in reinforced concrete Members" en University of Illinois Engineering Experiment Station Bulletin, Número 399.

✍ Kent, D. y Park, R., (1971) "Flexural members with confined concrete" en Journal of the Structural Division. Volumen 97, número STT, pp. 1969-1990.

✍ Negulescu, C. y Foerster, E., (2010)

"Parametric studies and quantitative assessment of the vulnerability of a RC frame Building Exposed to differential settlements" en Natural Hazards and Earth System Sciences. Volumen 10, pp 1781-1792.

✍ Skempton, A.W. y MacDonald, D.H., (1956) "The Allowable Settlement of Buildings" en ICE Proceedings: Engineering Division Civil. Volumen 5, número 6, pp. 727–768.

✍ Son M. y Cording E.J., (2011) "Responses of Buildings with Different Structural Types to Excavation-Induced Ground Settlements" en Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Volumen 137, número 4, pp 323-333.

✍ Zeevaert, L., (1975) Interacción Suelo Estructura de Cimentaciones superficiales y profundas, sujetas a cargas estáticas y sísmicas. México, Primera Edición, Limusa S.A.