

**ESTUDIO DE LA INCIDENCIA DE LAS VIGAS DE CIMENTACIÓN EN LA
RESPUESTA SÍSMICA DE UNA EDIFICACIÓN**

**MANUEL ALEJANDRO ALBARRACÍN PEDRAZA
ANA LIZBETH TIRADO ARIZA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2013**

**ESTUDIO DE LA INCIDENCIA DE LAS VIGAS DE CIMENTACIÓN EN LA
RESPUESTA SÍSMICA DE UNA EDIFICACIÓN**

**MANUEL ALEJANDRO ALBARRACÍN PEDRAZA
ANA LIZBETH TIRADO ARIZA**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Civil.

Director:

JOSÉ MIGUEL BENJUMEA ROYERO

Ms. Ingeniero Civil
Universidad Industrial de Santander

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2013

DEDICATORIA

A Dios, porque a pesar de mis momentos de carencia de fe, ha estado siempre iluminando mi camino, concediéndome la sabiduría y la fuerza para seguir adelante.

A mi madre Janeth, por tener siempre fe en mí y brindarme su apoyo día tras día, enseñarme a luchar contra las dificultades de la vida y saber encontrar en esos momentos de adversidad la felicidad.

A mi padre Rubiel, por ser ese hombre ejemplar que dedico muchos esfuerzos y sacrificios en pro de mi bienestar, y por regalarme las enseñanzas y ejemplo que me permitieron convertirme en la persona que soy.

A mis abuelos José y Domíngua por ser inspiración y modelos a seguir, y motivarme y apoyarme en cada etapa de mi vida.

A Lizbeth, mi compañera de proyecto y pareja, por haber estado siempre en todo momento a mi lado, en especial los difíciles, brindándome incondicionalmente su cariño y apoyo, y permitiéndome caminar a su lado en esta etapa de nuestra formación profesional, que hoy por hoy ha culminado exitosamente.

A mi tío, a mi hermano y a todos los familiares y amigos quienes con su ayuda, estímulo y acompañamiento hicieron posible la culminación de este proceso.

Manuel Alejandro Albarracín Pedraza

DEDICATORIA

A Dios, por ser la fuerza creadora que nos permite día a día continuar, por ser la luz que nos ilumina y nos señala el camino correcto, y la fuente de todo conocimiento, que nos permitió la sapiencia y el saber para afrontar los retos de este proceso.

A mis padres Miguel Antonio y Ana Felisa por creer en mí y brindarme su apoyo incondicional.

A mis hermanos Edwin, David y Leonardo por ser mi ejemplo a seguir y motivarme en cada proyecto emprendido.

A Manuel, quien además de ser mi pareja y compañero de proyecto de grado, ha sido un apoyo fundamental en el transcurso de este proceso, logrando con amor y dedicación culminar con éxito esta etapa.

A todos mis familiares y amigos quienes con su colaboración y motivación hicieron posible el cumplimiento de esta meta.

Ana Lizbeth Tirado Ariza

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	15
1. ESCENARIO DE CÁLCULO	17
1.1. DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS	17
1.2. METODOLOGÍA.....	20
1.3. MODELO Y DISEÑO ESTRUCTURAL.....	23
2. RESULTADOS Y ANÁLISIS	24
2.1. COMPARACIÓN DE DERIVAS	24
2.2. RESPUESTA MODAL	27
2.3. MOMENTOS DE VOLCAMIENTO.....	28
2.4. CORTANTE SÍSMICO POR PISO.....	31
2.5. ACCIONES EN LA ZAPATA.....	32
2.6. CANTIDADES DE OBRA	33
3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	35
BIBLIOGRAFÍA	37
ANEXOS	38

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Coeficientes A_a y A_v19
Tabla 2.	Combinaciones de carga para estado limite último y de servicio.21
Tabla 3.	Carga axial de servicio para zapatas modelo en ZASA de 4 pisos33
Tabla 4.	Cantidades de obra estructurales modelo en ZASA de 4 pisos34

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Simplificaciones de un modelo estructural	16
Figura 2.	Sistema de pórtico resistente a momentos [5]	17
Figura 3.	Configuración en planta de la estructura:.....	18
Figura 4.	Altura de la edificación	18
Figura 5.	Espectro elástico de aceleraciones.....	21
Figura 6.	Procedimiento seguido para el estudio de la incidencia de las VDA en el modelo estructural.....	23
Figura 7.	Zapatas y VDA tipo para los modelos regulares.	24
Figura 8.	Zapatas y VDA tipo para el modelo irregular.....	25
Figura 9.	Derivas estructura 4 pisos	26
Figura 10.	Derivas estructura 8 pisos.....	26
Figura 11.	Derivas estructura irregular 4 pisos	26
Figura 12.	Modos de vibración tipo de la estructura: (a) Traslacional en Y, (b) Traslacional en X, (c) Rotacional en Z.	28
Figura 13.	Momentos de volcamiento estructura de 4 pisos	29
Figura 14.	Momentos de volcamiento estructura de 8 pisos	30
Figura 15.	Momentos de volcamiento estructura irregular	30
Figura 16.	Cortantes sísmicos estructura de 4 pisos	31
Figura 17.	Cortantes sísmicos estructura de 8 pisos	32
Figura 18.	Cortantes sísmicos estructura irregular	32

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A.	DIMENSIONES DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES.....	38
ANEXO B.	DIMENSIONES DE ZAPATAS.....	40
ANEXO C.	VALORES MÁXIMOS DE DERIVA.....	41
ANEXO D.	MODOS DE VIBRACIÓN Y MOMENTOS DE VOLCAMIENTO	42
ANEXO E.	CORTE SÍSMICO	44

RESUMEN

TÍTULO:

ESTUDIO DE LA INCIDENCIA DE LAS VIGAS DE CIMENTACIÓN EN LA RESPUESTA SÍSMICA DE UNA EDIFICACIÓN. ¹

AUTOR:

Manuel Alejandro Albarracín Pedraza
Ana Lizbeth Tirado Ariza ²

PALABRAS CLAVES:

Vigas de cimentación, Modelamiento estructural, Análisis Sísmico, Empotramiento, Rigidez, Cantidad de obra, Zona de amenaza sísmica.

Se desarrolló un estudio de la respuesta sísmica de una edificación aporticada modelada con sus vigas de cimentación, con base en una revisión bibliográfica sobre la importancia de las funciones que se le atribuyen a estas, como lo son servir de amarre de la estructura en su superficie y reducir asentamientos diferenciales. Se plantea la presente propuesta de incluir las vigas de cimentación en el modelo estructural para comparar su respuesta sísmica con la de una estructura modelada con empotramiento en su base, cuyo análisis no considera parámetros como la rigidez de dichas vigas y el comportamiento de las mismas ante sollicitaciones de carga y sismo. Para observar los diferentes comportamientos de la estructura, el modelamiento se realizó con variaciones de altura de la edificación, zona de amenaza sísmica e inclusión de una irregularidad en planta, cuyos resultados arrojaron algunas diferencias significativas en la rigidez de las vigas de cimentación más no en la respuesta sísmica de la estructura en contraste con el modelo empotrado, por lo cual se puede afirmar que modelar las vigas de cimentación no influye en la respuesta sísmica de una edificación aporticada siempre y cuando la rigidez de estas sea proporcional a la rigidez global de la estructura. Se sugiere para estudios futuros realizar un modelo con interacción suelo - estructura, en el cual se podrían observar cambios más representativos en los comportamientos estructurales que los registrados a partir las comparaciones de este estudio entre modelos empotrados y modelos con vigas de cimentación.

¹ Proyecto de Grado.

² Facultad Físico – Mecánicas – Escuela de Ingeniería Civil - Director: José M. Benjumea – Ms Ing. Civil

ABSTRACT

TITLE:

ESTUDIO DE LA INCIDENCIA DE LAS VIGAS DE CIMENTACIÓN EN LA RESPUESTA SÍSMICA DE UNA EDIFICACIÓN.¹

AUTHOR:

Manuel Alejandro Albarracín Pedraza
Ana Lizbeth Tirado Ariza²

KEYWORDS:

Foundation beams, structural modeling, seismic analysis, embedment, stiffness, Number of work, seismic hazard zone.

A study on the seismic response of a breached building modeled with its foundation beams was developed based on a literature review on the importance of the functions attributed to them, such as working as a moorage of the structure on its surface and reduces differential settlements. It's propounded the next proposal to include the foundation beams in the structural model to compare the seismic response of a modeled structure with embedding in its base, which analysis does not consider parameters such as stiffness of foundation beams and the behavior of them to loading and earthquake stresses. To observe the different behavior of the structure, the modeling was performed with variations in height of the building, seismic hazard zone and inclusion of an irregularity in plant, which results showed some significant differences in the stiffness of the foundation beams but not in the seismic response of the structure in contrast to the embedded model, so it can be said that the foundation beams model does not affect the seismic response of a breached building only if the rigidity of these is proportional to the overall stiffness structure. It is suggested for future studies to make a model with soil - structure interaction, in which more representative changes could be observed in structural behavior than those recorded from the comparisons of this study between embedded and foundation beams models.

1 Proyecto de Grado.

2 Facultad Físico – Mecánicas – Escuela de Ingeniería Civil - Director: José M. Benjumea – Ms Ing. Civil

INTRODUCCIÓN

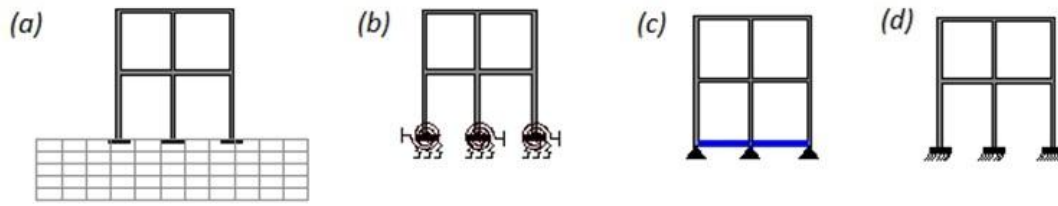
El diseño de la cimentación de una edificación puede resultar bastante complejo debido a que este depende en primer lugar del conjunto suelo-estructura y más en concreto de su interacción [1]. Tratar de integrar en los elementos de fundación (zapatas y vigas de amarre) las funciones de soportar la estructura, dar continuidad a las cargas para transmitir las al suelo de apoyo y resistir las deformaciones del suelo, ha requerido de profundos análisis, pruebas y estudios.

A través de los años, la ingeniería en su audaz avance, ha permitido simplificar el análisis estructural planteando la hipótesis de que las estructuras están empotradas en el suelo, es decir, apoyadas en un material indeformable, una condición que no es común en fundaciones [2]. La misma hipótesis considera que las vigas de cimentación le aportan a la zapata una rigidez tal que supone una restricción de rotación, pero un inadecuado dimensionamiento de las vigas de cimentación puede alterar directamente la respuesta de la estructura [3]. En la figura 1 se presenta la serie de simplificaciones a las que se somete un modelo estructural para facilitar su análisis, empezando con un modelo de la interacción suelo estructura (figura 1.a), pasando este a un modelo con resortes (figura 1.b), llegando a la reducción del modelo incluyendo vigas de amarre y apoyos de 2º grado (caso de estudio, figura 1.c), para terminar con el ya nombrado modelo empotrado (figura 1.d).

Las vigas de cimentación, amarre o fundación –llamadas en adelante VDA- son consideradas elementos estructurales esenciales, pues amarran la estructura en su superficie, reducen asentamientos diferenciales y ayudan a que la edificación tenga un mejor comportamiento sismo-resistente, siempre y cuando su diseño sea el adecuado.

El presente estudio es una propuesta de un modelamiento estructural que incluye vigas de cimentación y permite observar la respuesta sísmica de la estructura y sus posibles diferencias con un modelo estructural empotrado.

Figura 1. Simplificaciones de un modelo estructural



Fuente: Elaboración Propia.

1. ESCENARIO DE CÁLCULO

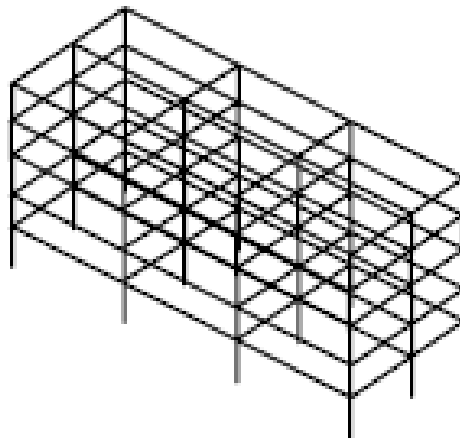
El escenario de cálculo de este estudio es el modelamiento de una edificación aporticada usando vigas de cimentación, para lo cual se realizaron variaciones en parámetros que podrían influir significativamente en la respuesta sísmica de la estructura.

1.1. DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS

En todos los casos, se usó un concreto de peso específico γ_c de 24 kN/m³, con una resistencia a compresión f'_c de 21 MPa, y cuyo módulo de elasticidad E_c es de 21538.105 MPa. El esfuerzo de fluencia f_y del acero de refuerzo es de 420 MPa.

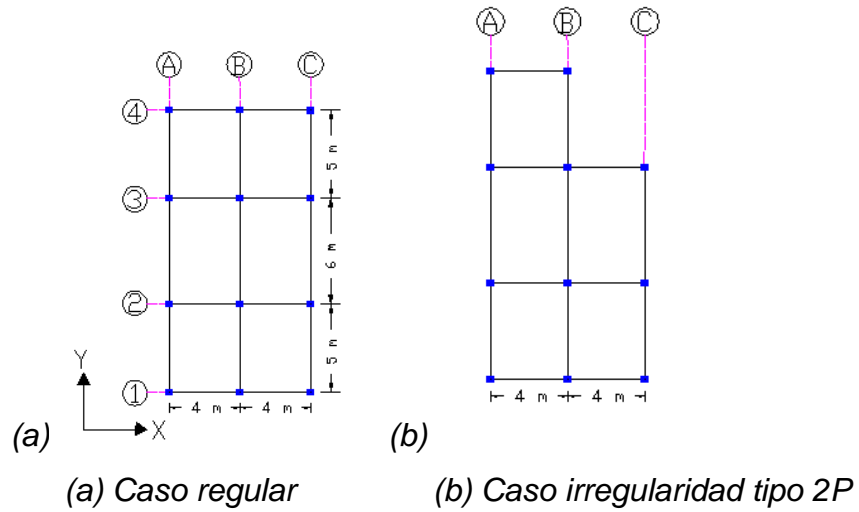
En cuanto a las propiedades de la edificación, se definió un sistema estructural de pórticos resistentes a momentos (figura 2). Para dicho sistema se plantea un modelo regular conformado por 2 luces de 4 metros cada una en dirección X y 3 luces en dirección Y de 5, 6 y 5 metros respectivamente (figura 3.a), y otro con irregularidad en planta tipo 2P (Retrosesos en las esquinas) como se muestra en la figura 3.b.

Figura 2. Sistema de pórtico resistente a momentos [5]



Fuente: Elaboración Propia.

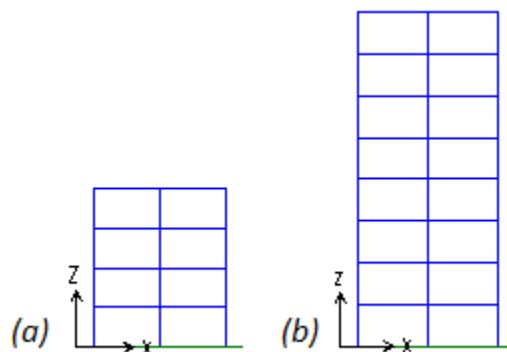
Figura 3. Configuración en planta de la estructura:



Fuente: Elaboración Propia.

Se tomó como variable la altura de la edificación con el fin de observar la incidencia de esta en la respuesta sísmica de la estructura. Por lo tanto se modeló la misma con 4 pisos (figura 4.a) y 8 pisos (figura 4.b), de 9.5 y 19 metros de altura total respectivamente. Por otro lado, la altura de entrepiso, se definió constante, siendo esta de 2.2 metros.

Figura 4. Altura de la edificación



Fuente: Elaboración Propia.

La amenaza sísmica de la estructura se adoptó como variable, para lo cual se eligieron 3 ciudades diferentes para la ubicación de la edificación. El perfil de suelo definido para todas las zonas de amenaza sísmica es Tipo C.

Se tomó la ciudad de Valledupar, Cesar, como zona de amenaza sísmica baja [ZASB], Ocaña, Norte de Santander como zona de amenaza sísmica intermedia [ZASM] y por último Bucaramanga, Santander, como zona de amenaza sísmica alta [ZASA].

Los coeficientes de aceleración horizontal pico efectiva [A_a] y velocidad horizontal pico efectiva [A_v] para cada ciudad definida se especifican en la tabla 1.

Tabla 1. Coeficientes A_a y A_v

	A_a	A_v
Valledupar	0.1	0.1
Ocaña	0.2	0.15
Bucaramanga	0.25	0.25

Fuente: Elaboración Propia.

El coeficiente de capacidad de disipación de energía R se obtuvo para cada zona de amenaza sísmica de acuerdo a:

$$R = R_0 \phi_a \phi_p \phi_r \quad (1)$$

Los valores de ϕ_a y ϕ_r fueron tomados como 1.0 para todos los casos, mientras que ϕ_p es 1.0 para la estructura regular y 0.9 para la irregular. El valor de R_0 es de 2.5 para ZASB, 5 para ZASM y 7 para ZASA. El modelo con irregularidad en planta solo se trabajó con 4 pisos y ubicado en ZASM.

Aclarado esto, se fija un $R=2.5$ para el modelo en ZASB, $R= 5$ para ZASM, $R=7$ para ZASA y por último $R=4.5$ para el modelo irregular ubicado en ZASM.

1.2. METODOLOGÍA

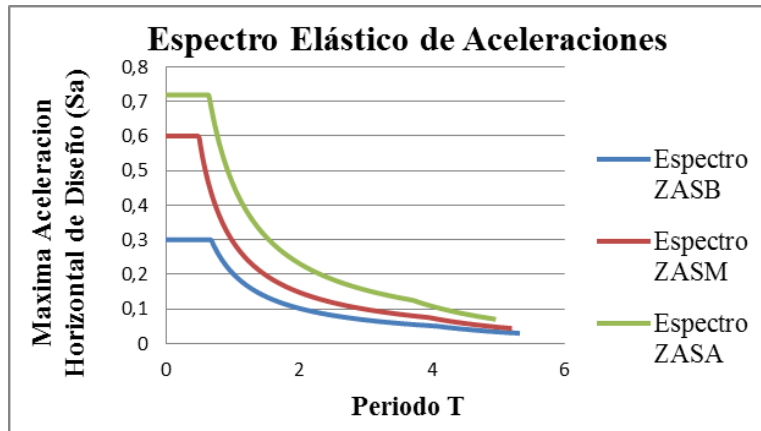
Se estableció que la estructura pertenece al grupo de uso I – Estructuras de ocupación normal – y que a su vez es de uso residencial, cuyas cargas muertas y vivas están estipuladas en el título B de la NSR-10.

La carga muerta asignada por metro cuadrado para cada entrepiso es de 7.5 kN, mientras que para la cubierta esta es de 3.15 kN, vale la pena aclarar que estos valores de carga muerta no incluyen el peso propio de vigas y columnas. De otro lado, la carga viva por metro cuadrado es de 1.8 kN para los entrepisos y de 5 kN para la cubierta. Además, se asignó a las vigas perimetrales de la cubierta una carga permanente de 3.0 kN/m debido a un muro de mampostería de 1.2 metros de altura ubicado allí. Con base en esto y los requisitos mínimos que se describen en la NSR-10 se planteó el tipo de sección a utilizar en los modelos y se especificaron las dimensiones preliminares para los principales elementos estructurales, como son las vigas de entrepiso que se eligieron de 0.3*0.35 metros y columnas de 0.3*0.3 m. Por otra parte, se pasó a incorporar en los modelos el espectro de aceleraciones, determinado por la ecuación 2:

$$S_a = \frac{1.2A_v F_v I}{T} \quad (2)$$

El espectro elástico para cada zona sísmica se observa en la figura 5.

Figura 5. Espectro elástico de aceleraciones.



Fuente: Elaboración Propia.

Las combinaciones de cargas que se tuvieron en cuenta para los estados límite último y servicio fueron:

Tabla 2. Combinaciones de carga para estado limite último y de servicio.

	CARGAS ÚLTIMAS	CARGAS DE SERVICIO
1	1.4 D	D
2	1.2 D+1.6L+0.5Lc	D+L
3	1.2 D+1.6Lc+L	D+Lc
4	1.2 D+E+L	D+0.75L+0.75Lc
5	0.9 D+E	D+0.7E
6		D+0.75(0.7E)+0.75L+0.75Lc
7		0.6 D+0.7E

Fuente: Elaboración Propia.

Una vez definidas las acciones y parámetros se inicia el modelamiento de la estructura con empotramiento en su base, y se define como modelo matemático a emplear el modelo tridimensional con diafragma rígido para la estructura regular y el modelo tridimensional con diafragma flexible para la estructura con irregularidad en planta.

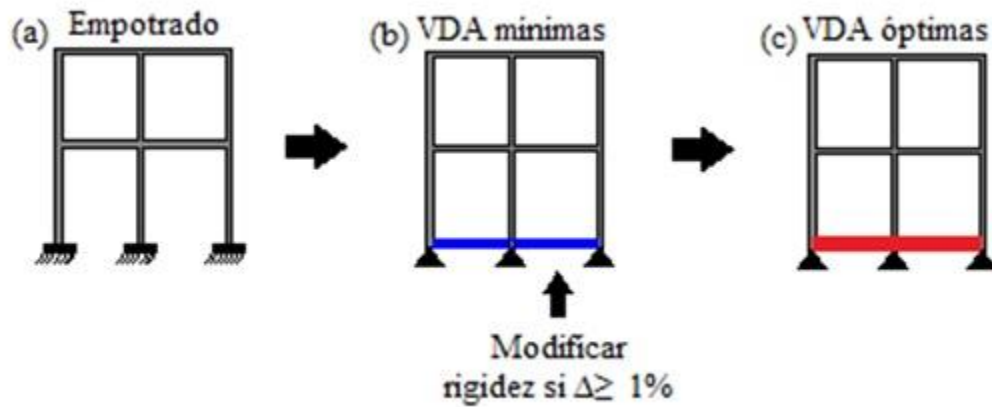
Para la edificación modelada con empotramiento se realizó un análisis dinámico elástico espectral, para el cual se verificó el cumplimiento de requisitos establecidos en el capítulo A.5 de la NSR-10, entre los que figura la obtención de modos de vibración, el ajuste de resultados por el método de la FHE, la evaluación de derivas y las fuerzas de diseño.

Luego del análisis y diseño de los elementos estructurales principales – vigas y columnas – se diseñaron las VDA y zapatas para el modelo empotrado, partiendo de los requisitos mínimos establecidos en la NSR-10. Incluyendo dichas VDA obtenidas a partir del modelo empotrado, se realizó un nuevo modelo cambiando los apoyos de 3º grado a 2º grado, llamándolo modelo con VDA mínimas.

Para el modelo estructural con VDA mínimas, se realizó el mismo procedimiento que para el modelo empotrado, verificando el cumplimiento de derivas y realizando variaciones en la sección de las VDA para aumentar su rigidez en caso de que las derivas sobrepasaran el límite admisible.

A raíz de esto surge otro modelo, el que contiene las VDA con sección adecuada para el cumplimiento de derivas. A estas se les denomina en el presente documento VDA óptimas, y fueron las tomadas como definitivas para el análisis y obtención de resultados. En resumen, se desarrollaron 3 modelos estructurales para la misma edificación y con la misma variación de parámetros, además del modelo irregular que se fijó. En la figura 6 se observa gráficamente el paso a paso realizado, partiendo del modelo empotrado (figura 6.a), luego el modelo con VDA mínimas (figura 6.b) y por último el modelo con VDA óptimas (figura 6.c)

Figura 6. Procedimiento seguido para el estudio de la incidencia de las VDA en el modelo estructural



Fuente: Elaboración Propia.

1.3. MODELO Y DISEÑO ESTRUCTURAL

El modelamiento y diseño estructural fue realizado usando el software SAP 2000 [5] cumpliendo con los requerimientos prescritos en los títulos A, B, C y H de la NSR-10, con el fin de obtener resultados verídicos que permitieran evidenciar el comportamiento sísmico de la edificación estudiada.

Todos los resultados de este estudio se usaron como parámetros de comparación entre un modelo estructural empotrado y el modelo con VDA propuesto, buscando obtener diferencias representativas con el fin de optimizar el modelo.

El cumplimiento de derivas totales fue tomado como criterio de control para la comparación de la respuesta sísmica del modelo estructural empotrado y el modelo con VDA. Así mismo, los momentos de volcamiento, cortantes sísmicos por piso, modos de vibración de la estructura y carga axial de servicio P_s para diseño de zapatas fueron evaluados en cada caso de estudio. Por último se calcularon cantidades de obra estructurales para el modelo que presentó los cambios más representativos respecto a las respuestas obtenidas anteriormente.

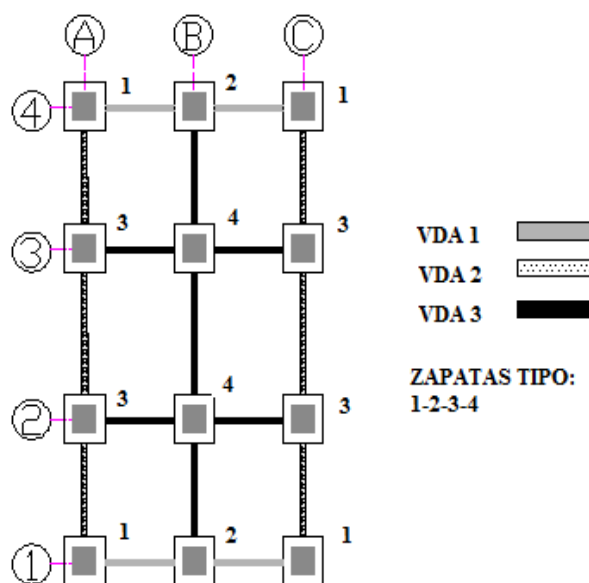
2. RESULTADOS Y ANÁLISIS

2.1. COMPARACIÓN DE DERIVAS

Al realizar el modelamiento estructural con las dimensiones preliminares de vigas y columnas verificando derivas se obtuvo que dichas dimensiones debían ser aumentadas para todos los modelos de 4 y 8 pisos, excepto el modelo de 4 pisos ubicado en ZASB, por lo tanto se realizó un nuevo dimensionamiento de los elementos.

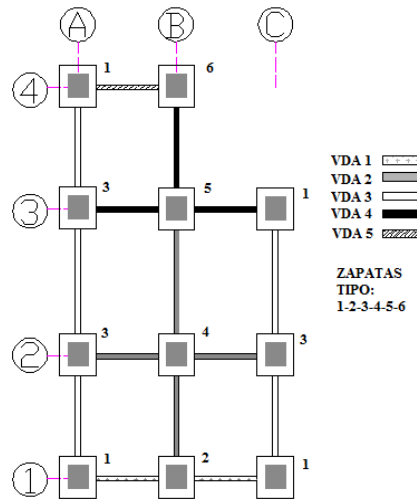
Las dimensiones de los elementos estructurales para cada uno de los casos de estudio se muestran en el anexo A y las dimensiones de las zapatas en el anexo B. También en las figuras 6 y 7 se observan las VDA tipo y zapatas tipo para los modelos regulares y el irregular respectivamente.

Figura 7. Zapatas y VDA tipo para los modelos regulares.



Fuente: Elaboración Propia.

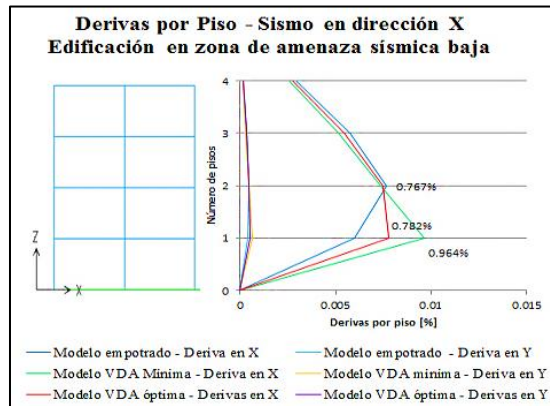
Figura 8. Zapatas y VDA tipo para el modelo irregular.



Fuente: Elaboración Propia.

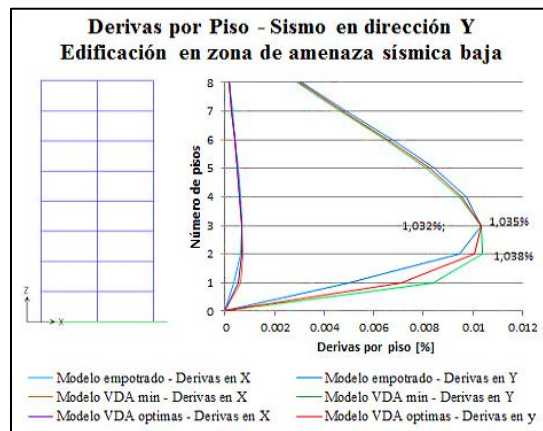
En el anexo C se muestran las derivas máximas en las direcciones X y Y obtenidas para cada uno de los modelos analizados, a su vez también se muestran las derivadas máximas torales por nodo. El caso más crítico fue el modelo de 4 pisos regular con presencia de amenaza sísmica alta, donde se requirió aumentar las secciones de las VDA mínimas en un 50% aproximadamente, para el cumplimiento de dicho control. Otro aspecto importante a resaltar, es que en los modelos con altura de ocho pisos para acción sísmica media y alta, no se requirió la rigidización de las VDA para el cumplimiento de derivas, permitiendo establecer como óptimas las secciones mínimas de dichos elementos. En las figuras 9, 10 y 11 se presentan las gráficas tipo correspondientes a derivas por piso para la edificación de 4 pisos, de 8 pisos y para el modelo irregular respectivamente.

Figura 9. Derivas estructura 4 pisos



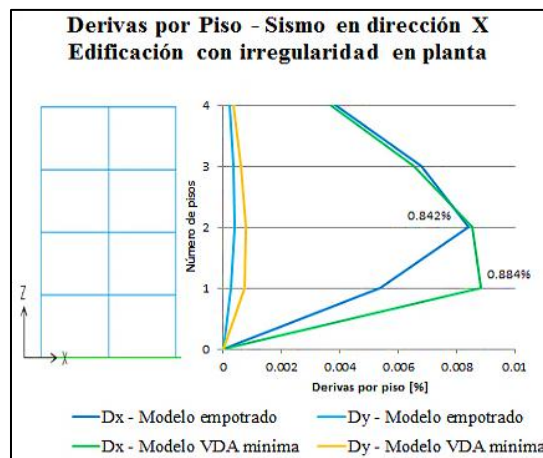
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 10. Derivas estructura 8 pisos



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 11. Derivas estructura irregular 4 pisos



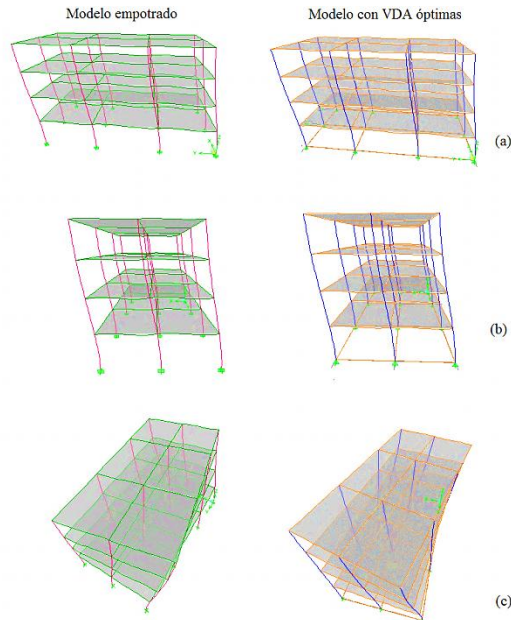
Fuente: Elaboración Propia.

2.2. RESPUESTA MODAL

Haciendo un paralelo entre los modos de vibración de los 3 modelos estructurales con diferente amenaza sísmica y altura, se observó que las variaciones en el periodo fundamental de la edificación son pequeñas de un modelo a otro, sin embargo, los modelos con VDA mínimas presentan un aumento respecto a los modelos empotrados, debido a que al cambiar el tipo de apoyo e incluir las VDA el movimiento de la estructura no está igualmente restringido y se comprueba que las VDA no toman todo el momento asumido en un empotramiento. A pesar de lo anterior, la estructura tiende a comportarse de la misma manera ante la acción de un sismo, bien sea modelada con VDA o con empotramiento en su base, ya que dicho comportamiento depende de gran manera de la rigidez global de la estructura, y esta es equivalente para los casos en paralelo.

En las tablas del anexo D se observan los modos de la edificación de 4 pisos y la de 8 pisos respectivamente. Para complementar este resultado, la figura 12 presenta la comparación de los movimientos tipo de la estructura para los 3 principales modos de vibración de esta. El gráfico presentado es el paralelo entre la estructura de 4 pisos en ZASA empotrado y con VDA óptima.

Figura 12. Modos de vibración tipo de la estructura: (a) Traslacional en Y, (b) Traslacional en X, (c) Rotacional en Z.



Fuente: Elaboración Propia.

En total son 12 los modos de vibración que contribuyeron de manera significativa al análisis dinámico (en la figura anterior solo se muestran los 3 principales), que para cada una de las direcciones de análisis sumaban un porcentaje de masa participante entre el 98 y 100% de la masa total de la estructura.

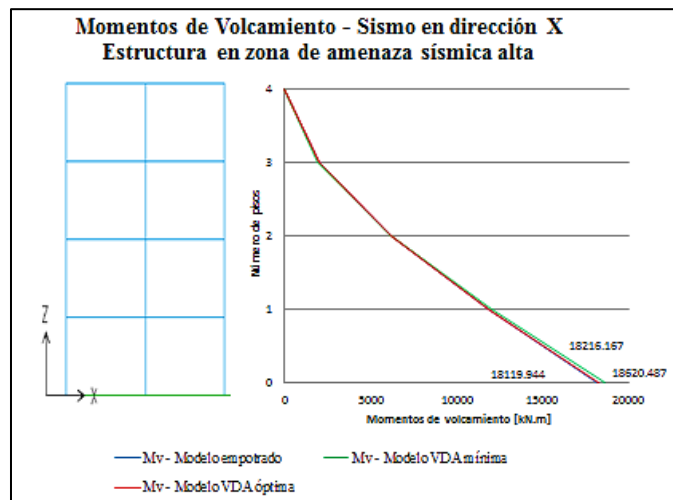
2.3. MOMENTOS DE VOLCAMIENTO

En las tablas del anexo D se presentan los momentos máximos de volcamiento de las estructuras analizadas. De estas se observa que los momentos de volcamiento en los modelos regulares con VDA presentan una disminución entre un 3 y 10% respecto a los mismos empotrados. Esto se debe a que al modelar la cimentación como un empotramiento se asume que esta es mucho más rígida de lo que es en realidad, puesto que existe la restricción de rotación en la base, mientras que modelando la cimentación con las VDA y los apoyos de 2º grado se presenta un comportamiento más apropiado, teniendo en cuenta que el medio

donde se apoya la estructura no es isotrópico ni homogéneo y por lo tanto se debe considerar una posible rotación de la misma.

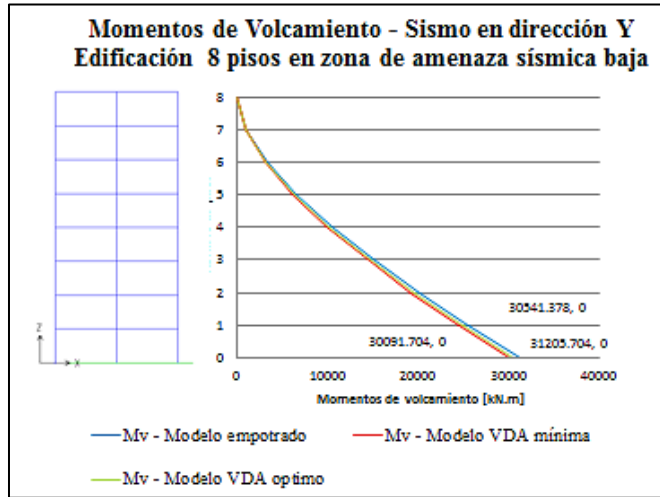
Se observa además el caso especial del modelo de 4 pisos en ZASA, donde el momento de volcamiento aumentó en el modelo con VDA óptimas, caso contrario a los demás modelos. Esto sugiere que la rigidez de las VDA es muy alta respecto a la rigidez global de la estructura, y por lo tanto, su oposición a un eventual volcamiento es mayor. Por último, el modelo con irregularidad en planta presenta momentos de volcamiento (muy pequeños) en la misma dirección de acción del sismo, mientras que los modelos regulares solo presentan en la dirección opuesta como es de esperarse, esto demuestra que la probabilidad de volcamiento de la estructura irregular (solo la estudiada en este caso) es mayor que la regular, aunque no en grandes proporciones. A continuación, las figuras 13, 14 y 15 presentan la gráfica tipo de momentos de volcamiento para la edificación de 4 pisos, de 8 pisos y para el modelo irregular respectivamente.

Figura 13. Momentos de volcamiento estructura de 4 pisos



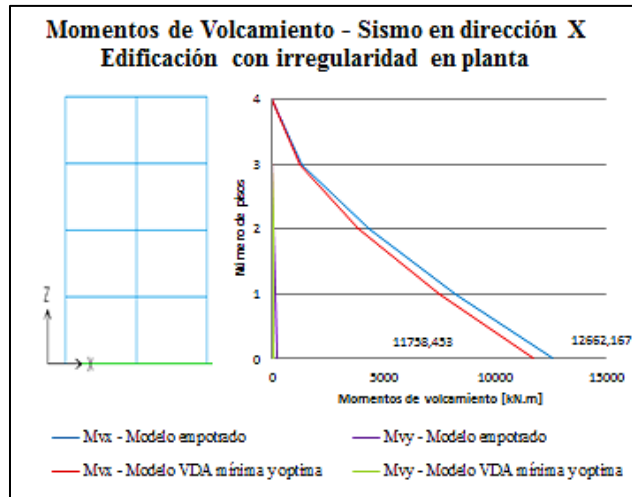
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 14. Momentos de volcamiento estructura de 8 pisos



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 15. Momentos de volcamiento estructura irregular

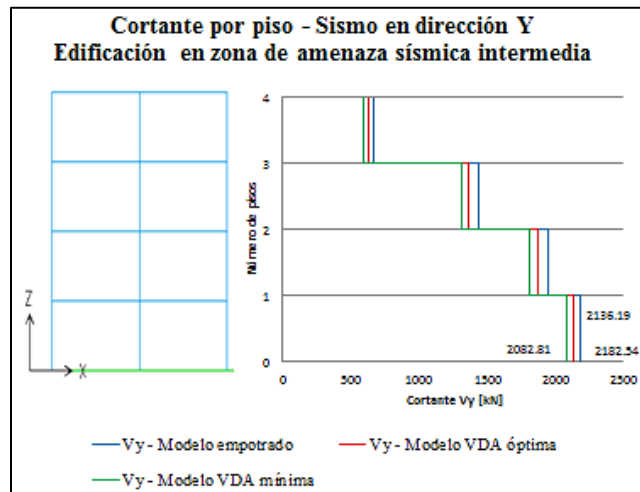


Fuente: Elaboración Propia.

2.4. CORTANTE SÍSMICO POR PISO

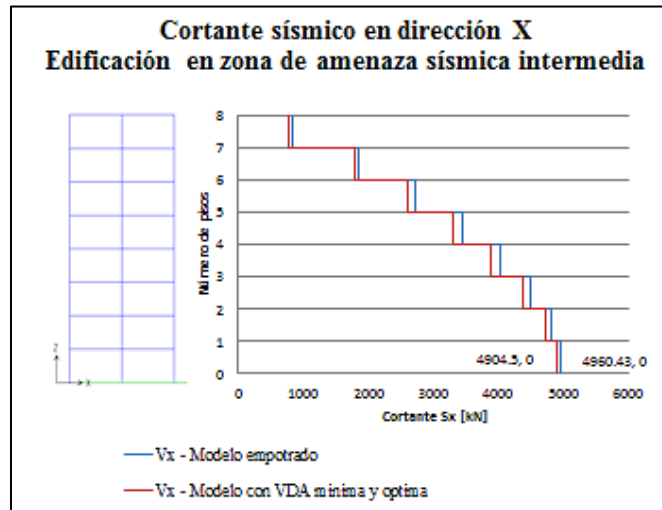
Sobre los datos obtenidos de cortante sísmico para los modelos empleados, se observó que las variaciones en los mismos son bastante ligeras, aproximadamente entre un 0.2 y un 1.5%, por lo cual se puede afirmar que el cortante sísmico no depende tanto de la condición de apoyo, sino de la rigidez de la estructura que como ya se ha mencionado, es igual en los casos comparados. La tabla del anexo E presenta los cortantes sísmicos por piso de los modelos regulares y la tabla del mismo anexo, los cortantes del modelo irregular. Se presentan a continuación las figuras 16, 17 y 18 que muestran las gráficas tipo de cortante sísmico para cada caso de estudio.

Figura 16. Cortantes sísmicos estructura de 4 pisos



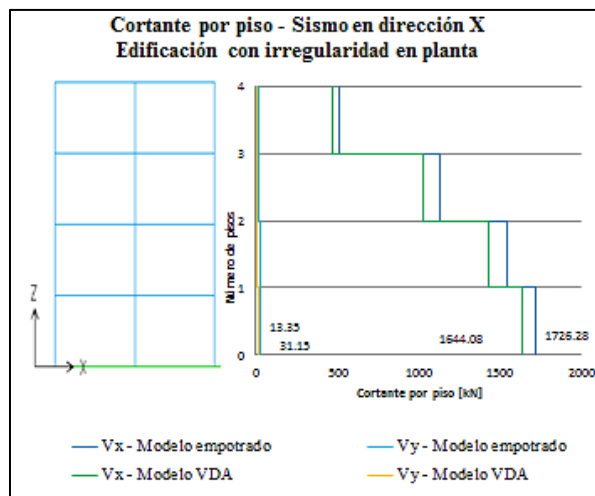
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 17. Cortantes sísmicos estructura de 8 pisos



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 18. Cortantes sísmicos estructura irregular



Fuente: Elaboración Propia.

2.5. ACCIONES EN LA ZAPATA

Se quiso revisar no solo la respuesta sísmica global de la edificación, sino también las solicitaciones para el diseño de las zapatas que podrían variar entre el modelo empotrado y el modelo con VDA óptima, sin embargo los resultados obtenidos muestran que las cargas axiales de servicio son similares para los 2 modelos utilizados en las zapatas tipo 1, 2 y 3, y las diferencias más notorias se

presentan en la zapata tipo 4, ya que esta es la que soporta las mayores cargas transmitidas por las columnas medianeras. Este parámetro se verificó en el caso crítico presentado en el modelo en ZASA de 4 pisos. A continuación, la tabla 3 muestra dichos resultados.

Tabla 3. Carga axial de servicio para zapatas modelo en ZASA de 4 pisos

		Ps [kN]	%cambio Ps
ZAPATA TIPO 1	<i>Empotramiento</i>	309.36	0.12%
	<i>VDA óptima</i>	309.48	
ZAPATA TIPO 2 Y 3	<i>Empotramiento</i>	475.24	0%
	<i>VDA óptima</i>	475.24	
ZAPATA TIPO 4	<i>Empotramiento</i>	884.07	8.01%
	<i>VDA óptima</i>	892.08	

Fuente: Elaboración Propia.

Aunque los valores de carga axial sean similares para las zapatas del modelo empotrado y el modelo con VDA, las zapatas diseñadas para cada caso no son iguales, ya que el diseño de las primeras se hizo incluyendo los momentos flectores que transmite cada columna, mientras que el diseño de las zapatas partiendo del modelo con VDA se planteó solo para carga axial, puesto que se asume que el conjunto de la cimentación reparte ese momento flector entre sus elementos, encargándose las VDA de gran parte de los mismos debido a su rigidez.

2.6. CANTIDADES DE OBRA

Las cantidades de obra se calcularon realizando los despieces de elementos estructurales para el caso crítico – Modelo en ZASA de 4 pisos – y se obtuvo un aumento de aproximadamente 4% en la cantidad de acero de refuerzo y cerca de 22% de concreto para el modelo con VDA óptima respecto al modelo empotrado, aunque precisamente este aumento se debe solo a las dimensiones finales de VDA y zapatas. La tabla 4 expone el contraste entre las cantidades de obra del

modelo empotrado y el modelo con VDA óptimas. Vale la pena aclarar que dicho aumento en las cantidades de obra sólo ocurre en el modelo crítico, y no se generaliza para todos los casos estudiados, de hecho, para los demás modelos no se dan aumentos significativos y en algunas ocasiones requiere la misma cantidad de acero y concreto para el modelo empotrado como para el modelo con VDA, ya que las secciones finales de los elementos de cimentación presentan pequeños cambios e incluso no presentan, contrastando los 2 modelos.

Tabla 4. Cantidades de obra estructurales modelo en ZASA de 4 pisos

		Concreto[m ³]	Acero [Kg]	Cuantía [kgf/m3]
MODELO EMPOTRADO	COLUMNAS	28	3293	118
	VIGAS	27	3650	135
	VDA	14	2238	160
	ZAPATAS	21	480	23
MODELO VDA ÓPTIMA	COLUMNAS	28	3293	118
	VIGAS	27	3650	135
	VDA	39	2563	66
	ZAPATAS	15	474	31

Fuente: Elaboración Propia.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al analizar el comportamiento de una edificación aporticada modelada con VDA se obtuvo como resultado que ante el cambio de amenaza sísmica, el parámetro de control (derivadas) sobrepasaba en la mayoría de los casos su límite máximo haciendo necesario el aumento en la rigidez de los elementos estructurales y de las VDA a medida que se incrementa la magnitud de sismo.

La altura de la edificación que se modela sí influye significativamente en la rigidez de las VDA siempre y cuando la rigidez global de la estructura que ha sido previamente dimensionada no permita que se exceda la deriva límite. Por ejemplo, la edificación de 4 pisos modelada en las 3 diferentes zonas de amenaza sísmica requirió una optimización de las secciones de las VDA para ajustarse al parámetro de control y en cambio la de 8 pisos (solamente en ZASM y ZASA) sí se ajustó a este con los requerimientos mínimos de diseño.

Al someter la edificación a una irregularidad en planta tipo 2P se determinó que aún con requisitos mínimos de diseño de las VDA la estructura se ajustó a la deriva permitida. No obstante, no se puede generalizar dicho resultado a todos los tipos de irregularidad descritos en la NSR-10, ya que solo se evaluó el tipo antes mencionado.

Al confrontar la respuesta sísmica de una edificación modelada con empotramiento en su base y la misma con VDA se obtuvo como resultado que los parámetros de comparación no arrojan diferencias representativas. Por lo tanto el modelo propuesto puede resultar conveniente para evaluar el comportamiento de la estructura ante un sismo. En cuanto a las cantidades de obra estructurales se obtuvo que para el modelo con VDA óptimas se requiere un porcentaje mayor de concreto (aproximadamente 22% más) y acero de refuerzo (cercano al 4%) – para el caso crítico- en contraste con el modelo empotrado, esto se debe a que la rigidez de los apoyos empotrados es superior a la rigidez que brindan los apoyos de 2º grado y VDA cuyo enfoque es más real, requiriendo mayores dimensiones para lograr una rigidez similar al empotramiento.

A manera de sugerencia, se propone para estudios futuros realizar un análisis dinámico no lineal junto con la interacción suelo-estructura para posiblemente encontrar resultados más próximos al comportamiento real de la edificación. Por lo pronto, de este estudio podemos concluir de manera general, que a pesar de que la respuesta sísmica de la edificación no presente gran variación entre el modelo empotrado y el modelo con VDA, sí se tiene que garantizar que la rigidez de las VDA sea significativa respecto a la rigidez global de la estructura para asegurar un comportamiento elástico ante un eventual sismo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Calavera Ruiz J. “Cálculo de estructuras de cimentación”. 4° edición; Intemac ediciones; Madrid, 2000; Capítulo 7.
- [4] Comisión Asesora Permanente para el régimen de Construcciones Sismo Resistentes. “Reglamento colombiano de construcción sismo resistente: NSR-10”. 1° edición. Bogotá, 2010. 2124 p.
- [5] Computers and structures, Inc. Sap2000 [DVD] o [FTP]; 2009.
- [2] Garza Vasquez L. “Diseño y construcción de cimentaciones”. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín; Facultad nacional de minas; Medellín, 2000; p. 204.
- [3] Tamasco J. “Cimentaciones”; Apuntes; Sin fecha; capítulo 5.

ANEXOS

ANEXO A. DIMENSIONES DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES

- Dimensiones de elementos estructurales para estructura de 4 pisos en ZASB

ZASB 4P	B [m]	H [m]
COLUMNAS	0.3	0.3
VIGAS	0.3	0.35
VDA MÍN 1	0.25	0.2
VDA MÍN 2	0.25	0.25
VDA MÍN 3	0.3	0.3
VDA ÓPT 1	0.3	0.3
VDA ÓPT 2	0.3	0.3
VDA ÓPT 3	0.35	0.35

- Dimensiones de elementos estructurales para estructura de 4 pisos en ZASM

ZASM 4P	B [m]	H [m]
COLUMNAS	0.4	0.4
C4-6-7-9 P4	0.45	0.45
C 5-8 P4	0.45	0.5
VIGAS	0.3	0.35
VDA MÍN 1	0.3	0.3
VDA MÍN 2	0.3	0.35
VDA MÍN 3	0.4	0.45
VDA ÓPT 1	0.4	0.45
VDA ÓPT 2	0.4	0.45
VDA ÓPT 3	0.5	0.5

- Dimensiones de elementos estructurales para estructura de 4 pisos en ZASA

ZASA 4P	B [m]	H [m]
COLUMNAS	0.45	0.45
C5-8 P4	0.45	0.5
VIGAS	0.3	0.35
VDA MÍN 1	0.35	0.35
VDA MÍN 2	0.35	0.4
VDA MÍN 3	0.45	0.5
VDA ÓPT 1	0.65	0.75
VDA ÓPT 2	0.65	0.75
VDA ÓPT 3	0.65	0.75

- Dimensiones de elementos estructurales para estructura de 8 pisos en ZASB

ZASB 8P	B [m]	H [m]
COLUMNAS	0.45	0.5
VIGAS	0.35	0.35
VDA MÍN 1	0.3	0.4
VDA MÍN 2	0.3	0.4
VDA MÍN 3	0.4	0.45
VDA ÓPT 1	0.4	0.45
VDA ÓPT 2	0.45	0.45
VDA ÓPT 3	0.45	0.5

- Dimensiones de elementos estructurales para estructura de 8 pisos en ZASM

ZASM 8P	B [m]	H [m]
COLUMNAS	0.5	0.6
VIGAS	0.35	0.5
VDA MÍN 1	0.45	0.5
VDA MÍN 2	0.5	0.6
VDA MÍN 3	0.6	0.65

- Dimensiones de elementos estructurales para estructura de 8 pisos en ZASA

ZASA 8P	B [m]	H [m]
COLUMNAS	0.6	0.6
VIGAS	0.35	0.5
VDA MÍN 1	0.55	0.6
VDA MÍN 2	0.55	0.65
VDA MÍN 3	0.65	0.75

- Dimensiones de elementos estructurales para estructura de 4 pisos irregular en ZASM

ZASM IRREG	B [m]	H [m]
COLUMNAS	0.4	0.4
C4-6-7-9 P4	0.45	0.45
C 5-8 P4	0.45	0.5
VIGAS	0.3	0.35
VDA MÍN 1	0.3	0.3
VDA MÍN 2	0.4	0.45
VDA MÍN 3	0.3	0.35
VDA MÍN 4	0.35	0.4
VDA MÍN 5	0.25	0.25

ANEXO B. DIMENSIONES DE ZAPATAS

- Dimensiones de zapatas para todos los modelos analizados.

		MODELO EMPOTRADO			MODELO CON YDA		
		B [m]	L [m]	H [m]	B [m]	L [m]	H [m]
ZASB 4P	ZT 1	2	2	0.3	1.5	1.5	0.25
	ZT 2	2	2	0.35	1.5	1.5	0.3
	ZT 3	2	2	0.35	2	2	0.35
	ZT 4	2.4	2.4	0.35	2.5	2.5	0.45
ZASM 4P	ZT 1	2.2	2.2	0.3	1.5	1.5	0.25
	ZT 2	2.2	2.2	0.35	2	2	0.3
	ZT 3	2.1	2.1	0.35	2	2	0.3
	ZT 4	2.4	2.4	0.4	2.5	2.5	0.4
ZASA4P	ZT 1	2.3	2.3	0.3	1.5	1.5	0.25
	ZT 2	2.1	2.1	0.35	2	2	0.3
	ZT 3	2.1	2.1	0.35	2	2	0.3
	ZT 4	2.5	2.5	0.4	2.5	2.5	0.4
ZASM 4P IRREGULAR	ZT 1	2	2	0.3	1.5	1.5	0.25
	ZT 2	2	2	0.35	2	2	0.3
	ZT 3	2.1	2.1	0.35	2	2	0.3
	ZT 4	2.5	2.5	0.4	2.5	2.5	0.4
	ZT 5	2.3	2.3	0.4	2	2	0.35
	ZT 6	2.1	2.1	0.3	1.5	1.5	0.25
ZASB 8P	ZT 1	2.8	2.8	0.45	2.5	2.5	0.35
	ZT 2	3	3	0.45	2.5	2.5	0.45
	ZT 3	3.2	3.2	0.5	3	3	0.45
	ZT 4	3.6	3.6	0.6	3.5	3.5	0.6
ZASM 8P	ZT 1	2.8	2.8	0.45	2.5	2.5	0.35
	ZT 2	3	3	0.45	2.5	2.5	0.4
	ZT 3	3.2	3.2	0.5	3	3	0.5
	ZT 4	3.5	3.5	0.6	3.5	3.5	0.55
ZASA 8P	ZT 1	2.8	2.8	0.45	2.5	2.5	0.35
	ZT 2	3	3	0.5	2.5	2.5	0.4
	ZT 3	3.2	3.2	0.5	3	3	0.45
	ZT 4	3.5	3.5	0.6	3.5	3.5	0.55

ANEXO C. VALORES MÁXIMOS DE DERIVA

- Derivas máximas en dirección X y Y para modelos regulares

			ZASB		ZASM		ZASA	
			δx	δy	δx	δy	δx	δy
4 PISOS	EMPOTRADO	<i>Sismo X</i>	0.767%	0.047%	0.891%	0.056%	0.972%	0.062%
		<i>Sismo Y</i>	0.046%	0.718%	0.061%	0.938%	0.062%	0.970%
	VDA MÍNIMAS	<i>Sismo X</i>	0.964%	0.066%	0.907%	0.061%	1.101%	0.070%
		<i>Sismo Y</i>	0.065%	0.867%	0.065%	0.960%	0.070%	1.113%
	VDA ÓPTIMAS	<i>Sismo X</i>	0.782%	0.051%	0.898%	0.056%	0.991%	0.062%
		<i>Sismo Y</i>	0.050%	0.740%	0.061%	0.950%	0.062%	0.992%
8 PISOS	EMPOTRADO	<i>Sismo X</i>	0.939%	0.063%	0.795%	0.053%	0.937%	0.057%
		<i>Sismo Y</i>	0.068%	0.948%	0.058%	0.909%	0.062%	0.994%
	VDA MÍNIMAS	<i>Sismo X</i>	0.944%	0.065%	0.798%	0.055%	0.939%	0.057%
		<i>Sismo Y</i>	0.070%	1.038%	0.061%	0.909%	0.062%	0.996%
	VDA ÓPTIMAS	<i>Sismo X</i>	0.943%	0.063%	-	-	-	-
		<i>Sismo Y</i>	0.068%	1.035%	-	-	-	-

- Derivas máximas en dirección X y Y para modelo irregular

			ZASM	
			δx	δy
MODELO IRREGULAR	EMPOTRADO	<i>Sismo X</i>	0.842%	0.041%
		<i>Sismo Y</i>	0.058%	0.925%
	VDA MÍNIMAS	<i>Sismo X</i>	0.884%	0.078%
		<i>Sismo Y</i>	0.080%	0.963%

- Derivas máximas totales por nodo. Modelos regulares

		ZASB		ZASM		ZASA	
		δt	$\Delta\%$	δt	$\Delta\%$	δt	$\Delta\%$
4 PISOS	EMPOTRADO	0.768%	0.198%	0.937%	0.022%	0.974%	0.139%
	VDA MÍNIMAS	0.966%		0.959%		1.113%	
	VDA ÓPTIMAS	0.783%		0.948%		0.992%	
8 PISOS	EMPOTRADO	1.000%	0.041%	0.911%	0.004%	0.996%	0.002%
	VDA MÍNIMAS	1.041%		0.907%		0.998%	
	VDA ÓPTIMAS	1.000%		-		-	

- Derivas máximas totales por nod. Modelo irregular

		ZASM	
		δt	$\Delta\%$
MODELO IRREGULAR	EMPOTRADO	0.922%	0.039%
	VDA MÍNIMAS	0.961%	

ANEXO D. MODOS DE VIBRACIÓN Y MOMENTOS DE VOLCAMIENTO

- Modos de vibración de la estructura de 4 pisos

	# MODO	EMPOT	VDA MÍN	VDA ÓPT	TIPO DE MOV
		T [seg]	T [seg]	T [seg]	
ZASB 4P	1	0.7211	0.814	0.777	TRASL Y
	2	0.7006	0.7936	0.7466	TRASL X
	3	0.6105	0.7116	0.6569	ROTAC Z
ZASM 4P	1	0.5749	0.6342	0.605	TRASL Y
	2	0.5513	0.6049	0.576	TRASL X
	3	0.4798	0.5422	0.5039	ROTAC Z
ZASA 4P	1	0.531	0.5836	0.5391	TRASL Y
	2	0.5037	0.5501	0.5109	TRASL X
	3	0.4413	0.4938	0.4472	ROTAC Z
Model Irregular ZASM 4P	1	0.5683	0.6295	-	TRASL Y
	2	0.5523	0.6108	-	TRASL X
	3	0.4819	0.5524	-	ROTAC Z

- Modos de vibración de la estructura de 8 pisos

	# MODO	EMPOT	VDA MÍN	VDA ÓPT	TIPO DE MOV
		T [seg]	T [seg]	T [seg]	
ZASB 8P	1	1.1445	1.2134	1.1867	TRASL Y
	2	1.0658	1.1278	1.1076	TRASL X
	3	0.9094	0.9696	0.9468	ROTAC Z
ZASM 8P	1	0.7705	0.7956	-	TRASL Y
	2	0.7132	0.7482	-	TRASL X
	3	0.6184	0.6527	-	ROTAC Z
ZASA 8P	1	0.7296	0.7498	-	TRASL Y
	2	0.7041	0.7222	-	TRASL X
	3	0.6032	0.6218	-	ROTAC Z

- Momentos de volcamiento estructura regular

			ZASB	ZASM	ZASA
			Mv [kN.m]	Mv [kN.m]	Mv [kN.m]
4 PISOS	EMPOTRADO	<i>Sismo X</i>	7178.16	13529.426	18119.944
		<i>Sismo Y</i>	6962.228	14499.441	18077.184
	VDA MÍNIMAS	<i>Sismo X</i>	6506.262	12660.592	18620.487
		<i>Sismo Y</i>	6334.645	13510.15	18610.166
	VDA ÓPTIMAS	<i>Sismo X</i>	6848.135	13138.358	18216.167
		<i>Sismo Y</i>	6584.724	14003.341	18180.208
8 PISOS	EMPOTRADO	<i>Sismo X</i>	29502.631	62740.863	79118.22
		<i>Sismo Y</i>	31205.704	68132.891	85357.465
	VDA MÍNIMAS	<i>Sismo X</i>	28487.406	60943.433	77957.337
		<i>Sismo Y</i>	30091.704	66834.757	83983.915
	VDA ÓPTIMAS	<i>Sismo X</i>	28832.837	-	-
		<i>Sismo Y</i>	30541.378	-	-

- Momentos de volcamiento estructura irregular

			ZASM	
			Mvx [kN.m]	Mvy [kN.m]
MODELO IRREGULAR	EMPOTRADO	<i>Sismo X</i>	194.88	11565.377
		<i>Sismo Y</i>	12662.167	215.859
	VDA MÍNIMAS	<i>Sismo X</i>	82.908	10726.33
		<i>Sismo Y</i>	11758.453	91.88

ANEXO E. CORTE SÍSMICO

- Cortante sísmico estructura regular

			ZASB	ZASM	ZASA
			Vs [kN]	Vs [kN]	Vs [kN]
4 PISOS	EMPOTRADO	<i>Sismo X</i>	1096.03	2037.53	2700.21
		<i>Sismo Y</i>	1062.1	2182.54	2689.52
	VDA MÍNIMAS	<i>Sismo X</i>	1026.63	1951.83	2832.56
		<i>Sismo Y</i>	997.47	2082.81	2829.24
	VDA ÓPTIMAS	<i>Sismo X</i>	1064.85	2002.33	2724.53
		<i>Sismo Y</i>	1025.58	2136.19	2715.3
8 PISOS	EMPOTRADO	<i>Sismo X</i>	2339.1	4960.43	6162.4
		<i>Sismo Y</i>	2487.11	5426.63	6655.64
	VDA MÍNIMAS	<i>Sismo X</i>	2303.2	4904.5	6135.35
		<i>Sismo Y</i>	2445.84	5388.47	6620.29
	VDA ÓPTIMAS	<i>Sismo X</i>	2318.4	-	-
		<i>Sismo Y</i>	2466.22	-	-

- Cortante sísmico estructura irregular

			ZASM	
			Vx [kN]	Vy [kN]
MODELO IRREGULAR	EMPOTRADO	<i>Sismo X</i>	1726.28	31.15
		<i>Sismo Y</i>	34.89	1888.82
	VDA MÍNIMAS	<i>Sismo X</i>	1644.08	13.35
		<i>Sismo Y</i>	14.95	1801.41