

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**Comparación entre técnicas de modelado y análisis computacional de
edificios de tipo muro**

Trabajo de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

Sergio Gabriel Álvarez González

Director de Proyecto de Graduación:

Julian Trejos Villalobos

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Hoja de Aprobación

Comité Asesor:



Ing. Julian Trejos Villalobos

Director del proyecto



Ing. Andrea Ramírez Villalba

Asesora



Ing. Fabricio Chavarría Salas

Asesor

Estudiante:



Sergio Gabriel Álvarez González

Fecha: 2018, Junio, 29

El suscrito, Sergio Gabriel Álvarez González, cédula 1-1538-0264, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **B20326**, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación "**Comparación entre técnicas de modelado y análisis computacional de edificios de tipo muro**" bajo la Dirección del **Ing. Julian Trejos Villalobos**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos Nº 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); "no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales". Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

DEDICATORIA

A Dios

*Por darme la fortaleza física y mental para haber
llegado a este punto de mi carrera profesional y
cumplir mis objetivos, así como su infinito amor.*

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y familiares

Por su apoyo, consejos, enseñanzas y valores inculcados que hacen hoy la persona que soy, pero más que nada por el amor que me tienen.

A mi director de proyecto, el Ing. Julian Trejos Villalobos

Por la dedicación, conocimiento y guía que me brindó para llevar a cabo la realización de este trabajo.

A mis asesores, la Ing. Andrea Ramírez Villalba y el Ing. Fabricio Chavarría Salas

Por la disposición, orientación y aportes brindados durante la elaboración de este trabajo.

Al Ing. Andrés González Ureña

Por proponerme realizar dicha investigación y asesorarme en la etapa inicial de esta.

A mis amigos y compañeros

Por la amistad y apoyo brindado a lo largo de este camino.

CONTENIDO

1. Introducción	1
1.1. Justificación	1
1.1.1. Problema específico	1
1.1.2. Importancia	2
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivo general.....	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Antecedentes teóricos y prácticos del problema.....	3
1.4. Alcance	4
1.5. Limitaciones	5
1.6. Metodología.....	6
1.6.1. Investigación y revisión bibliográfica	7
1.6.2. Modelado y análisis	7
1.6.3. Producto final.....	7
2. Marco teórico.....	8
2.1. Muro	8
2.2. Edificios de tipo muro.....	9
2.3. Principios básicos de análisis estructural	10
2.3.1. Análisis de elementos por la teoría de Euler-Bernoulli.....	10
2.3.2. Análisis de elementos por la teoría de elementos finitos	13
2.3.3. Método de rigidez directo.....	17
2.4. Consideraciones en el modelado de edificios tipo muro	25
2.4.1. Modelado de muros con elementos tipo barra.....	26
2.4.2. Modelado de muros con elementos tipo área	27
2.5. Parámetros de respuesta estructural	28

3.	Elaboración de modelos.....	33
3.1.	Consideraciones generales.....	34
3.1.1.	Materiales.....	34
3.1.2.	Agrietamiento	34
3.1.3.	Cargas permanentes y temporales.....	35
3.1.4.	Zona sísmica y sitios de cimentación.....	35
3.1.5.	Coeficiente sísmico	37
3.1.6.	Masa del edificio considerada en el análisis por sismo	38
3.1.7.	Modos de oscilación.....	38
3.1.8.	Elementos estructurales.....	38
3.1.9.	Discretizado de elementos	39
3.2.	Técnicas de modelado aplicadas a un núcleo de muros de concreto.....	39
3.2.1.	Método de modelado de muros con elementos de tipo barra	40
3.2.2.	Método de modelado de muros con elementos de tipo área.....	46
3.2.3.	Análisis comparativo para los modelos del núcleo de concreto	49
3.3.	Modelos construidos.....	50
3.3.1.	Edificios ficticios	50
3.3.2.	Edificios reales	57
4.	Análisis comparativo.....	65
4.1.	Resultados de edificios ficticios	65
4.2.	Resultados de edificios reales.....	83
5.	Conclusiones y recomendaciones.....	101
5.1.	Conclusiones	101
5.2.	Recomendaciones para el modelado de edificios de tipo muro.....	104
5.3.	Recomendaciones generales del trabajo	104
5.	Referencias Bibliográficas.....	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Metodología utilizada en el desarrollo de la investigación.....	6
Figura 2. Análisis de elemento esbelto	11
Figura 3. Elemento de tipo barra y sus grados de libertad asociados	12
Figura 4. Discretización de una placa en elementos finitos.....	14
Figura 5. Elemento de tipo área con tres nodos y sus grados de libertad asociados	14
Figura 6. Elemento de tipo área con cuatro nodos y sus grados de libertad asociados	15
Figura 7. Elementos tipos cascarón, placa y membrana.....	16
Figura 8. Identificación de elementos y nodos en viga continua	17
Figura 9. Definición de coordenadas globales y locales.....	18
Figura 10. Identificación de grados de libertad	18
Figura 11. Elemento tipo barra y grados de libertad asociados al plano	20
Figura 12. Coeficientes de rigidez para un elemento de tipo barra analizado en el plano.....	21
Figura 13. Elemento tipo área con sus grados de libertad	24
Figura 14. Esquema de técnicas de modelado de edificios tipo muro	26
Figura 15. Modelo de muro con elementos de barra.....	27
Figura 16. Modelo de muro con elementos de área	28
Figura 17. Ejemplos de sistemas estructurales de un grado de libertad	29
Figura 18. Sistema de varios grados de libertad y sus modos de oscilación asociados.....	30
Figura 19. Esquema de un muro.....	32
Figura 20. Razón de deriva para estructura de dos niveles	33
Figura 21. Factor espectral dinámico (FED) para Zona III y sitio de cimentación S_3 para ductilidades de 1, 1.5, 2, 3, 4 y 6 y amortiguamiento del 5%	36
Figura 22. Vista en planta de un núcleo de muros de concreto	39
Figura 23. Propiedades del elemento de barra utilizado como muro introducidos en el programa ETABS ®	40
Figura 24. a) Vista general y b) Vista extruida de núcleo modelado con elementos de tipo barra de sección transversal regular	41
Figura 25. Modificadores asignados al brazo rígido.....	42
Figura 26. a) Vista general y b) Vista extruida de núcleo modelado con elementos tipo barra con sección transversal regular y con brazos infinitamente rígidos incorporados (en azul)....	43
Figura 27. Definición de elemento tipo barra con sección transversal de forma irregular	44

Figura 28. a) Vista general y b) Vista extruida de núcleo modelado con elementos tipo barra con sección transversal irregular y con brazos infinitamente rígidos incorporados (en azul)..	45
Figura 29. Definición de la sección de muro "Muro de concreto"	46
Figura 30. Secuencia de modelado de muros con elementos de tipo área	47
Figura 31. Nudos de unión entre muros sin discretizar	48
Figura 32. Nudos de unión entre muros discretizados	48
Figura 33. Vista en planta del Edificio A	50
Figura 34. Vista en planta del Edificio B	51
Figura 35. Vista en planta del Edificio C	51
Figura 36. Vista en planta del Edificio D	52
Figura 37. Vista en planta del Edificio E	52
Figura 38. Vista en planta del Edificio F.....	53
Figura 39. Vistas generales de las técnicas de modelado utilizadas (Edificio A).....	54
Figura 40. Vista en planta del Edificio A (elementos tipo barra de sección transversal irregular)	54
Figura 41. Vista en planta del Edificio B (elementos tipo barra de sección transversal irregular)	55
Figura 42. Vista en planta del Edificio C (elementos tipo barra de sección transversal irregular)	55
Figura 43. Vista en planta del Edificio D (elementos tipo barra de sección transversal irregular)	56
Figura 44. Vista en planta del Edificio E (elementos tipo barra de sección transversal irregular)	56
Figura 45. Vista en planta del Edificio F (elementos tipo barra de sección transversal irregular)	57
Figura 46. Vista en planta del Edificio G	58
Figura 47. Vista en planta del Edificio H	58
Figura 48. Vista en planta del Edificio I	59
Figura 49. Vista en planta del Edificio J	59
Figura 50. Vista en planta del Edificio K	60
Figura 51. Vista en planta del Edificio L.....	60
Figura 52. Vistas generales de las técnicas utilizadas (Edificio G)	61

Figura 53. Vista en planta del Edificio G (elementos tipo barra de sección transversal irregular)	62
Figura 54. Vista en planta del Edificio H (elementos tipo barra de sección transversal irregular)	62
Figura 55. Vista en planta del Edificio I (elementos tipo barra de sección transversal irregular)	63
Figura 56. Vista en planta del Edificio J (elementos tipo barra de sección transversal irregular)	63
Figura 57. Vista en planta del Edificio K (elementos tipo barra de sección transversal irregular)	64
Figura 58. Vista en planta del Edificio L (elementos tipo barra de sección transversal irregular)	64
Figura 59. Diferencias porcentuales para períodos principales en la dirección "X" (modelos con geometría ficticia)	67
Figura 60. Diferencias porcentuales para períodos en la dirección "Y" (modelos con geometría ficticia)	68
Figura 61. Factor espectral dinámico para Edificio A (5 niveles) en la dirección "Y"	70
Figura 62. Factor espectral dinámico para Edificio B (10 niveles) en la dirección "Y"	71
Figura 63. Factor espectral dinámico para Edificio C (15 niveles) en la dirección "Y"	71
Figura 64. Factor espectral dinámico para Edificio D (20 niveles) en la dirección "Y"	72
Figura 65. Factor espectral dinámico para Edificio E (25 niveles) en la dirección "Y"	72
Figura 66. Factor espectral dinámico para Edificio F (30 niveles) en la dirección "Y"	73
Figura 67. Diferencias porcentuales para flexión "My" (modelos de geometría ficticia)	77
Figura 68. Diferencias porcentuales para cortante "Vx" (modelos de geometría ficticia)	78
Figura 69. Deformada en X para Edificio A (5 niveles)	79
Figura 70. Deformada en X para Edificio B (10 niveles)	79
Figura 71. Deformada en X para Edificio C (15 niveles)	80
Figura 72. Deformada en X para Edificio D (20 niveles)	80
Figura 73. Deformada en X para Edificio E (25 niveles)	81
Figura 74. Deformada en X para Edificio F (30 niveles)	81
Figura 75. Diferencias porcentuales para períodos en la dirección "X" (modelos de geometría real)	85

Figura 76. Diferencias porcentuales para períodos en la dirección "Y" (modelos de geometría real).....	85
Figura 77. Factor espectral dinámico para Edificio G (5 niveles) en la dirección "X"	87
Figura 78. Factor espectral dinámico para Edificio H (10 niveles) en la dirección "X".....	88
Figura 79. Factor espectral dinámico para Edificio I (15 niveles) en la dirección "X".....	88
Figura 80. Factor espectral dinámico para Edificio J (20 niveles) en la dirección "Y"	89
Figura 81. Factor espectral dinámico para Edificio K (25 niveles) en la dirección "X"	89
Figura 82. Factor espectral dinámico para Edificio L (30 niveles) en la dirección "Y"	90
Figura 83. Diferencias porcentuales para cortante "Vx" (modelos de geometría real).....	94
Figura 84. Diferencias porcentuales para flexión "Mx" (modelos de geometría real).....	94
Figura 85. Diferencias porcentuales para cortante "Vy" (modelos de geometría real).....	95
Figura 86. Diferencias porcentuales para flexión "My" (modelos de geometría real).....	95
Figura 87. Deformada en X para Edificio G (5 niveles).....	96
Figura 88. Deformada en X para Edificio H (10 niveles).....	97
Figura 89. Deformada en X para Edificio I (15 niveles).....	97
Figura 90. Deformada en X para Edificio J (20 niveles).....	98
Figura 91. Deformada en X para Edificio K (25 niveles)	98
Figura 92. Deformada en X para Edificio L (30 niveles)	99

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Cuadro comparativo de elementos tipo barra contra elementos tipo área	25
Cuadro 2. Propiedades del concreto	34
Cuadro 3. Cargas permanentes de elementos no estructurales	35
Cuadro 4. Diferencias en masas participativas para los modelos del núcleo de concreto.....	49
Cuadro 5. Diferencias en períodos para los modelos del núcleo de concreto.....	49
Cuadro 6. Diferencias en reacciones de la base para los modelos del núcleo de concreto.....	49
Cuadro 7. Cantidad de niveles para cada modelo de edificio ficticio.....	50
Cuadro 8. Cantidad de niveles para cada modelo de edificio real.....	57
Cuadro 9. Períodos para modelos de elementos tipo barra rectangular (ficticios).....	65
Cuadro 10. Períodos para modelos de elementos tipo barra irregular (ficticios)	66
Cuadro 11. Masa participativa para modelos de elementos tipo barra rectangular (ficticios) .	68
Cuadro 12. Masa participativa para modelos de elementos tipo barra irregular (ficticios)	69
Cuadro 13. FED para modelos de elementos tipo barra rectangular (ficticios)	74
Cuadro 14. FED para modelos de elementos tipo barra irregular (ficticios).....	74
Cuadro 15. Cortantes basales para modelos de elementos tipo barra rectangular (ficticios)..	75
Cuadro 16. Momentos para basales modelos de elementos tipo barra rectangular (ficticios)	75
Cuadro 17. Cortantes basales para modelos de elementos tipo barra irregular (ficticios).....	76
Cuadro 18. Momentos basales para modelos de elementos tipo barra irregular (ficticios).....	76
Cuadro 19. Derivas para modelos de elementos tipo barra regular (ficticios).....	82
Cuadro 20. Derivas para modelos de elementos tipo barra irregular (ficticios).....	82
Cuadro 21. Períodos para modelos de elementos tipo barra rectangular (reales)	83
Cuadro 22. Períodos para modelos de elementos tipo barra irregular (reales)	84
Cuadro 23. Masa participativa para modelos de elementos tipo barra rectangular (reales) ...	86
Cuadro 24. Masa participativa para modelos de elementos tipo barra irregular (reales)	86
Cuadro 25. FED para modelos de elementos tipo barra rectangular (reales).....	91
Cuadro 26. FED para modelos de elementos tipo barra irregular (reales).....	91
Cuadro 27. Cortantes basales para modelos de elementos tipo barra rectangular (reales)....	91
Cuadro 28. Momentos basales para modelos con elementos tipo barra rectangular (reales) .	92
Cuadro 29. Cortantes basales para modelos de elementos tipo barra irregular (reales)	92
Cuadro 30. Momentos basales para modelos de elementos tipo barra irregular (reales).....	93
Cuadro 31. Derivas para modelos con elementos de tipo barra rectangular (reales)	99

Cuadro 32. Derivas para modelos con elementos de tipo irregular (reales)	100
--	-----

Álvarez González, Sergio Gabriel

Comparación entre técnicas de modelado computacional de edificios de tipo muro

Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José C.R:

S.G. Álvarez G., 2018

xiv, 106h, [0]; ils. col. - 17 refs.

RESUMEN

En este trabajo se compara la aplicación de diferentes técnicas de modelado computacional de edificios de tipo muro. La metodología seguida para la realización del proyecto fue de carácter descriptivo; de esta manera en el primer y segundo capítulo se abordan los conceptos básicos que giran en torno a los principales métodos de modelado de muros, así como las particularidades que poseen los elementos bajo los cuales se sustenta cada una de estas técnicas. En el tercer capítulo se utiliza el software de análisis estructural llamado *ETABS* con el fin de aplicar cada una de estas metodologías de modelado a distintos edificios.

En el cuarto capítulo se efectúa un análisis dinámico de cada uno de estos modelos, con lo cual se crea una matriz de resultados que permite comparar y discutir las diferentes respuestas estructurales que se pueden obtener para un mismo edificio cuando se utilizan distintas técnicas de modelado.

Finalmente, el quinto capítulo se compone de las conclusiones que surgen a raíz de esta investigación así como de una serie de recomendaciones que permitirán orientar al lector en el modelado de edificios de tipo muro a través de las diferentes técnicas estudiadas en este trabajo.

S.G.A.G.

MODELAJE DE MUROS, ANÁLISIS DE EDIFICIOS, TÉCNICAS DE MODELADO, INGENIERÍA ESTRUCTURAL

Ing. Julian Trejos Villalobos

Escuela de Ingeniería Civil

1.Introducción

1.1. Justificación

1.1.1. Problema específico

La constante actividad sísmica en Costa Rica hace que el país tenga la necesidad de proveer estructuras capaces de soportar las demandas o solicitaciones generadas por tales eventos, garantizando la integridad de las edificaciones aún después de aplicadas dichas fuerzas. Esto propicia que exista cierta gama de posibilidades de sistemas estructurales y sismorresistentes para el diseño de edificios, uno de estos sistemas lo constituyen los muros, los cuales son ampliamente utilizados en el país.

Al momento de diseñar y analizar todo tipo de edificaciones es común emplear programas computacionales con el fin de determinar algunos parámetros referentes al comportamiento de las estructuras ante las posibles cargas a las cuales estarán sometidas. Gran parte de estos programas especializados en ingeniería estructural y sísmica utilizan el método del elemento finito (o MEF por sus siglas en español) para el análisis de dichas estructuras. Este es un método numérico de uso frecuente para la solución de problemas ingenieriles de gran complejidad tanto en el rango lineal como en el no-lineal, el cual permite conocer los desplazamientos y esfuerzos internos en elementos sólidos, lineales y de tipo área o "casarón", como lo son los muros y losas de entrecapado.

Por otro lado, también es posible utilizar elementos tipo barra para determinar las deformaciones y esfuerzos en los elementos de una estructura. La teoría desarrollada para elementos tipo barra se ajusta adecuadamente al comportamiento de elementos esbeltos, como columnas y vigas, aunque también es posible modelar muros mediante dicho concepto de modelado, esto trae consigo variaciones en cuanto a los modos de oscilación, períodos, masas participativas, y derivas que pueden incidir posteriormente en la etapa de diseño.

1.1.2. Importancia

A raíz de las diferencias que pueden existir en la respuesta estructural de un edificio de tipo muro dado el uso de diversas técnicas de modelado, surge la necesidad de conocer las implicaciones de la utilización de las metodologías más habituales, en los resultados que se obtienen a partir de un análisis de elemento finito efectuado en un programa computacional especializado.

Pese a ser un tema ampliamente discutido en el ámbito de la ingeniería estructural, previo a la realización de esta investigación, en Costa Rica no se había estudiado académicamente si las diferencias que se pueden obtener a través de cada una de estas técnicas de modelado son lo suficientemente significativas a nivel de resultados prácticos, de forma que se obtengan diseños con diferencias apreciables al aplicar las diferentes formas de modelado estudiadas.

De esta manera, el presente trabajo culmina con una serie de observaciones y recomendaciones que servirán de base para que profesionales involucrados en el área, posean criterios técnicos y prácticos que les permitan efectuar un modelado apropiado de muros en edificaciones.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Evaluar y comparar técnicas de modelado computacional de edificios de tipo muro.

1.2.2. Objetivos específicos

- Sintetizar las técnicas de modelado estructural para diseño de edificios tipo muro de uso común en el país.
- Aplicar las técnicas de modelado de muros más habituales a edificios reales y ficticios en el programa computacional de análisis de estructural *ETABS*.
- Comparar la respuesta estructural de edificios modelados con elementos de tipo barra con la de edificios modelados con elementos de tipo área.
- Determinar con base en criterios técnicos y prácticos, las ventajas y desventajas de los diferentes métodos de modelado estructural de edificios de tipo muro para la obtención de períodos, fuerzas y desplazamientos.

1.3. Antecedentes teóricos y prácticos del problema

En la revista Engineering and Technology se publica un artículo titulado "Análisis de muros de corte utilizando el método de barra: comparación del método de elementos tipo área y la analogía de la columna". En dicho artículo se habla de que en la actualidad, los modelos construidos a través de elementos tipo área son más comunes que los de elementos tipo barra, sin embargo la analogía de la columna o modelado a través de elementos tipo barra provee una técnica de modelado que permite obtener desplazamientos de manera precisa y simple en muros analizados en su plano. Por otro lado, se estudian dos casos de la analogía de la columna, uno en el cual se vincula los elementos tipo barra a través de brazos articulados y un segundo que incorpora brazos rígidos, siendo este último el modelo que arroja resultados más precisos en cuanto al cálculo de desplazamientos. Además se menciona que los momentos flexores en la base, obtenidos a través de los modelos de elementos tipo barra puede generar diferencias de -2,2 % en comparación con modelos de elemento tipo área para muros con relación de aspecto h/L igual a la unidad (Ali & Hassan, 2011).

Un informe denominado, "Desafíos en el modelado analítico de edificios de muros de corte de varios pisos" presentado en la Conferencia Técnica Anual del 2015, realizada por la Sociedad de Ingeniería Sísmica de Nueva Zelanda, se plantea la importancia de los muros como sistema soportante de carga laterales. Además se menciona que el desarrollo reciente ha llevado hacia un diseño basado en el desempeño, para el cual los ingenieros realizan un análisis estático y dinámico empleando distintas técnicas de modelado para edificios de tipo muro (Sedgh & A, 2015).

En un boletín publicado por la Escuela de Ingeniería Civil del Instituto Politécnico de Iasi, en Rumania, titulado: "Errores en el Modelado Estructural Elástico de Muros de Corte de Concreto", se habla de que los analistas estructurales deben ser conscientes de las consecuencias que trae elegir distintas formas de modelado para estos sistemas, de modo que deben tomarse las consideraciones pertinentes para mantener el nivel de error lo más bajo posible, de esta manera es que se aborda el tema para discutir algunos de los errores en los cuales se incurre al momento de modelar y al mismo tiempo se cuantifica el impacto de estos en los resultados (Chelariu & Budescu, 2011).

En la 14va Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica llevada a cabo en Beijing, China en octubre del año 2008 se presentó un informe titulado: "Comparación entre diferentes enfoques prácticos para el modelado de muros de corte en análisis estructural de edificaciones", en el cual se muestran las diferencias numéricas entre modelar un edificio de cinco niveles a través de elementos tipo barra y tipo área. Se pone en evidencia la sensibilidad del modelado por medio de elementos tipo área ante la variación del grado de discretización de la malla, así como los efectos considerables en cuanto al tamaño del elemento en sí mismo. En el caso de los modelos por medio de elementos de tipo barra, se muestran diferencias del 5 % al 15 % al modificar propiedades referentes a su rigidez, mientras que si aumenta el grado de discretización se pueden llegar a observar diferencias de 5% al 10% (Tan & Kubin, 2008).

En el trabajo final de graduación: "Análisis Estructural por el Método Matricial. Conceptos y Aplicaciones" realizado por Alfredo Chocano D. se muestran herramientas y métodos para analizar sistemas estructurales compuestos por diversos elementos, tomando en cuenta los efectos deformantes presentes, tales como la flexión y torsión así como los efectos debidos a las fuerzas cortantes y axiales internas. Además se tratan algunos aspectos en cuanto al modelado de muros (Chocano, 2003).

En el libro "Conceptos y Aplicaciones del Análisis del Elemento Finito" de los autores Robert D. Cook, David S. Malkus y Michael E. Plesha se explican los conceptos en los cuales se basa el método del elemento finito, además se muestran las aplicaciones prácticas de este en el análisis de estructuras. Algunos de los temas a tratar en este libro son, por ejemplo: método de la rigidez, desplazamientos en estructuras, transformación de coordenadas, formulación isoparamétrica, interpolación en elementos finitos. También se discuten aspectos relacionados con el modelado y análisis por medio del método en cuestión (Cook, Malkus, & Plesha, 1988).

1.4. Alcance

- La investigación se enfocó en edificaciones de concreto reforzado cuyo sistema sismorresistente está compuesto únicamente por muros.
- Se analizaron un total de 12 edificaciones con distribuciones de muros en planta distintas, siendo la primera mitad estructuras ficticias y la segunda edificios reales ubicados en Costa Rica.
- Se consideraron estructuras que van desde los 5 hasta los 30 niveles y con alturas de piso de 3 m.

- Para cada estructura se emplearon tres diferentes metodologías de modelado de muros: i) Modelado a través de elementos tipo barra con sección transversal de forma rectangular, ii) Modelado a través de elementos tipo barra con sección transversal de forma irregular y iii) Modelado a través de elementos tipo área.
- Se modelaron estructuras que según el Código Sísmico de Costa Rica 2010 poseen tanto regularidad en planta como en altura.
- Para efectos de la cuantificación de la demanda sísmica en las estructuras se hizo uso del Código Sísmico de Costa Rica 2010.
- No se incluyó la componente vertical del sismo en el modelado y análisis de las estructuras.
- Los resultados obtenidos están sujetos al contexto analizado, es decir estructuras en el rango elástico y sin considerar la sobrerresistencia producida por factores como la redundancia, proceso constructivo, entre otros.
- Se omitió el modelado de techos, escaleras, buques de ventanas y puertas y otros elementos que pudiera generar distorsiones en los resultados buscados.
- Se utilizó como herramienta de análisis el programa computacional *ETABS* de la compañía Computers and Structures, Inc.

1.5. Limitaciones

- El tamaño de malla y cantidad de nodos utilizado en el modelado de las distintas estructuras estuvo sujeto a la capacidad de procesamiento del equipo de cómputo del laboratorio del Programa de Educación Continua (PEC) de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica.
- La calidad de los modelos realizados para las estructuras reales estuvo sujeta a la disponibilidad de planos estructurales de tales edificaciones.
- No se tuvo control de los procesos de análisis y resultados brindados por *ETABS* dado que no se tenía acceso al código del programa.
- No se puede asegurar que el modelado a través de elementos tipo área es el adecuado dado que no se realizó esta comprobación, sin embargo se partió de este hecho por las limitaciones que posee el uso de la teoría de Euler-Bernoulli en elementos chatos.

1.6. Metodología

El esquema de la metodología seguida para la elaboración del proyecto se muestra en la Figura 1, en esta se observa que la investigación se divide en tres etapas principales: 1) Investigación y revisión bibliográfica, 2) Modelado y análisis, y 3) Producto final.

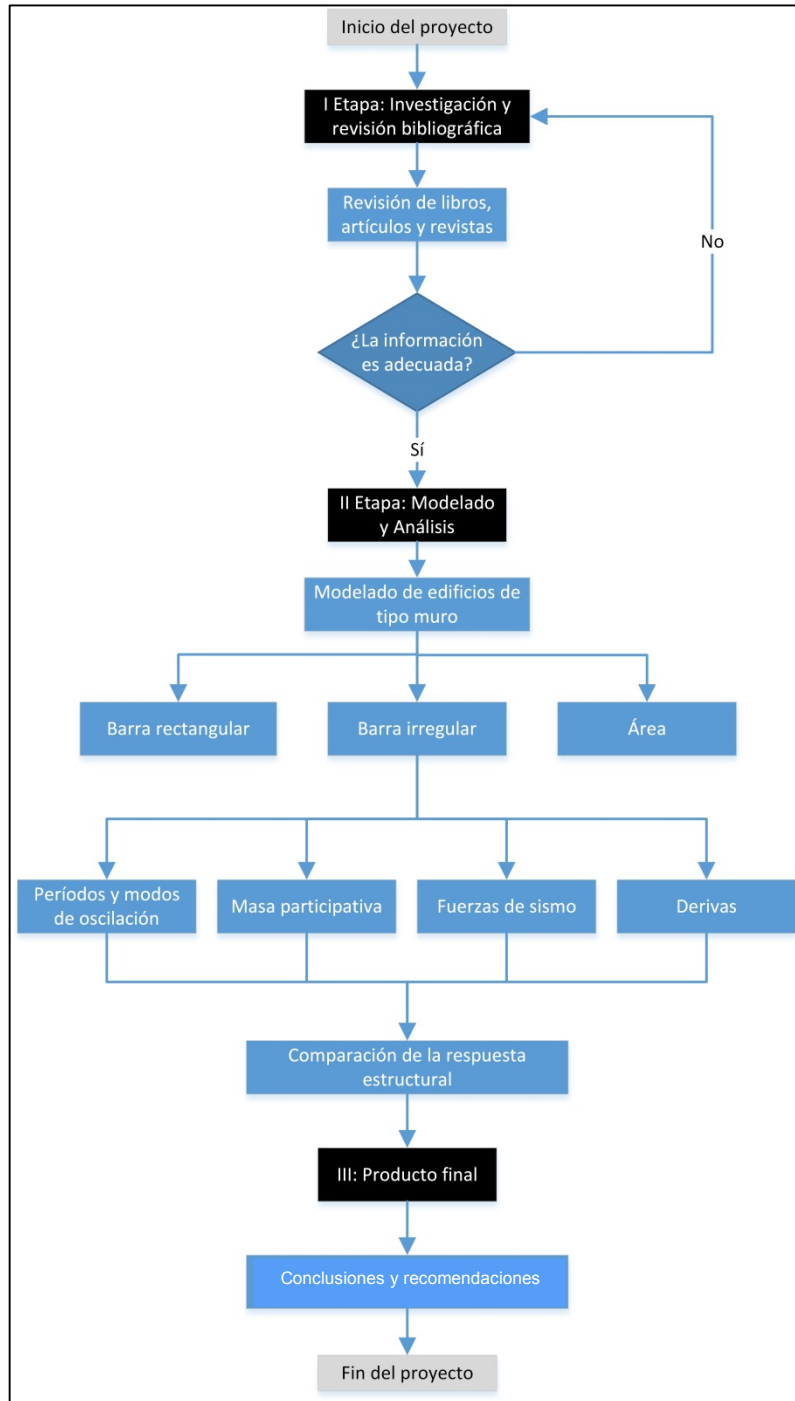


Figura 1. Metodología utilizada en el desarrollo de la investigación

1.6.1. Investigación y revisión bibliográfica

En esta etapa se recopiló información correspondiente al modelado estructural de edificios de tipo muro a través de elementos de tipo área y barra. Se extrajo información procedente de libros, revistas y artículos académicos de relevancia para la investigación. Además fue necesario consultar el manual del software *ETABS* para conocer aspectos básicos en torno al modelado de estructuras.

Adicionalmente se buscó apoyo por parte de los miembros del comité asesor del trabajo para poder realizar un modelado adecuado de las estructuras y ejecutar correctamente cada una de las metodologías estudiadas.

1.6.2. Modelado y análisis

Se modelaron edificios ficticios con distribuciones en planta simples así como edificios reales con distribuciones de muros mucho más complejas. Para cada una de las estructuras se modelaron los muros a través de tres diferentes técnicas: i) Modelado con elementos de tipo área, ii) Modelado con de elementos de tipo barra y iii) Modelado con elementos de tipo irregular (variante de la técnica anterior).

Seguidamente se compararon las respuestas estructurales obtenidas a través de cada una de las metodologías de modelado empleadas, con el fin de conocer la incidencia de una técnica u otra en los resultados. Para la obtención de estos datos se hizo uso del programa computacional *ETABS* del cual la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica posee licencia en el laboratorio del Programa de Educación Continua (PEC).

1.6.3. Producto final

A través de la información recopilada en la primera fase y los modelos ejecutados en la segunda etapa se redactaron una serie de conclusiones y recomendaciones referentes a las técnicas de modelado estudiadas y las implicaciones del uso de estas para la obtención de la respuesta estructural de edificios de tipo muro.

2.Marco teórico

2.1. Muro

El Código Sísmico de Costa Rica 2010 define un muro como un componente estructural ubicado por lo general en el plano vertical y que posee por lo menos una de sus dimensiones horizontales significativamente corta en relación a las alturas entre los niveles en los cuales está localizado. Este se encarga de resistir cargas gravitacionales o sísmicas y es considerado como un elemento muy eficaz para disminuir los desplazamientos laterales.

Los muros se pueden clasificar según su forma o comportamiento, esta última clasificación es más importante a nivel del análisis y subdivide a los muros con comportamiento cortante-cortante y momento-cortante. Esta clasificación se define en las secciones 8.6.2 y 8.6.3 del CSCR-2010 y se realiza con base en las demandas de momento y cortante presentes en el elemento. En dichas secciones se establece que si la razón (Ecuación 1) es mayor o igual que dos se considera que el comportamiento del muro es momento-cortante, y en caso contrario se analiza como cortante-cortante. Esta definición está relacionada directamente con la forma en que el muro se deforma ante cargas laterales. El comportamiento tipo momento-cortante considera que se desarrollarán deformaciones por flexión siguiendo patrones semejantes a los esperados en vigas o columnas (elementos esbeltos tipo barra), mientras que el comportamiento cortante-cortante se presenta en elementos chatos donde las deformaciones por esfuerzos cortantes son significativas. Para este último caso el modelado mediante elemento finito es el recomendado para estimar la respuesta mecánica del muro.

$$\frac{M}{V \cdot l_w} \quad (1)$$

Donde:

- M: Momento.
- V: Fuerza cortante.
- L_w : Longitud del muro o del segmento de muro considerado en la dirección de la fuerza cortante.

2.2. Edificios de tipo muro

Se define un sistema estructural como aquel sistema conformado por todos los elementos y componentes encargados de garantizar la estabilidad y firmeza de la estructura ante las diferentes acciones generadas por el entorno. Los sistemas sismorresistentes son los diversos subsistemas del sistema estructural que componen la edificación y cuyo objetivo es resistir las fuerzas sísmicas. Estos deben ser capaces de transmitir dichas fuerzas hasta el medio soportante asegurando la estabilidad e integridad de los diferentes elementos así como de la estructura misma (CSCR-2010).

Los edificios conformados por sistemas estructurales de tipo muro se definen en el Código Sísmico de Costa Rica 2010 como:

Aquellas edificaciones que resisten las fuerzas sísmicas por medio de sistemas sismorresistentes constituidos por: a) marcos arriostrados de concreto reforzado, acero o madera, b) muros de concreto, mampostería reforzada, acero o madera, o c) la combinación de sistemas sismorresistentes descritos en a) y b) comportándose de manera independiente o combinada, vinculados o no por medio de un sistema horizontal o entrepiso de concreto reforzado, acero u otros, en cada nivel. (p.4/5)

Edificaciones con tales sistemas son muy comunes en el territorio nacional, especialmente los edificios de apartamentos, de ahí surge la importancia de estudiar aspectos que giran en torno al modelado de estos. En las siguientes secciones se explica la forma en que se ejecutan las técnicas más utilizadas para el modelado de muros así como algunos aspectos de relevancia en la aplicación de cada una de ellas. Además se describe de manera general los métodos utilizados por los programas computacionales para el análisis de edificios de tipo muro y estructuras en general.

2.3. Principios básicos de análisis estructural

Dado que en la práctica del modelado de muros se utilizan tanto elementos tipo barra como elementos tipo área, entonces resulta importante comprender a nivel conceptual las teorías que explican el comportamiento respectivo de cada uno de estos elementos, así como las consideraciones o supuestos que se trasladan al modelado según el tipo de elemento utilizado. El comportamiento de los elementos tipo barra se ve explicado a través de la teoría de Euler-Bernoulli, mientras que en el caso de los elementos tipo área se hace uso de la teoría de elementos finitos.

Por otro lado, existen diversos métodos de análisis para la solución de sistemas estructurales, entre ellos se encuentran el método de flexibilidad y el método de rigidez (o de los desplazamientos), el cual a su vez se subdivide en método de rigidez semiautomático y método de rigidez directo (o automático), este último toma mayor importancia para efectos de esta investigación, dado que es el método utilizado por el software *ETABS* en sus algoritmos de análisis de estructuras, por lo que en secciones posteriores se estudiará dicho método.

2.3.1. Análisis de elementos por la teoría de Euler-Bernoulli

La teoría de Euler-Bernoulli permite el cálculo de esfuerzos y deformaciones en elementos esbeltos o tipo barra, esta teoría fue introducida por el matemático suizo Jacob Bernoulli (1645-1705) y posteriormente continuada por Leonard Euler (1707-1783), también matemático suizo. En general un elemento se considera esbelto cuando el efecto de la flexión interna rige sobre los efectos producidos por las fuerzas cortantes y axiales internas, para el caso específico de elementos rectos con secciones transversales constantes, la flexión rige cuando la razón de altura "h" de la sección transversal y la longitud libre "L" del elemento posee valores menores a 1/10 (Popov, 2000).

El desarrollo de esta teoría se puede estudiar a través del modelo mostrado en la Figura 2, en esta se muestra una viga simplemente apoyada con un sistema de coordenadas (x, y, z) y carga transversal a su eje longitudinal.

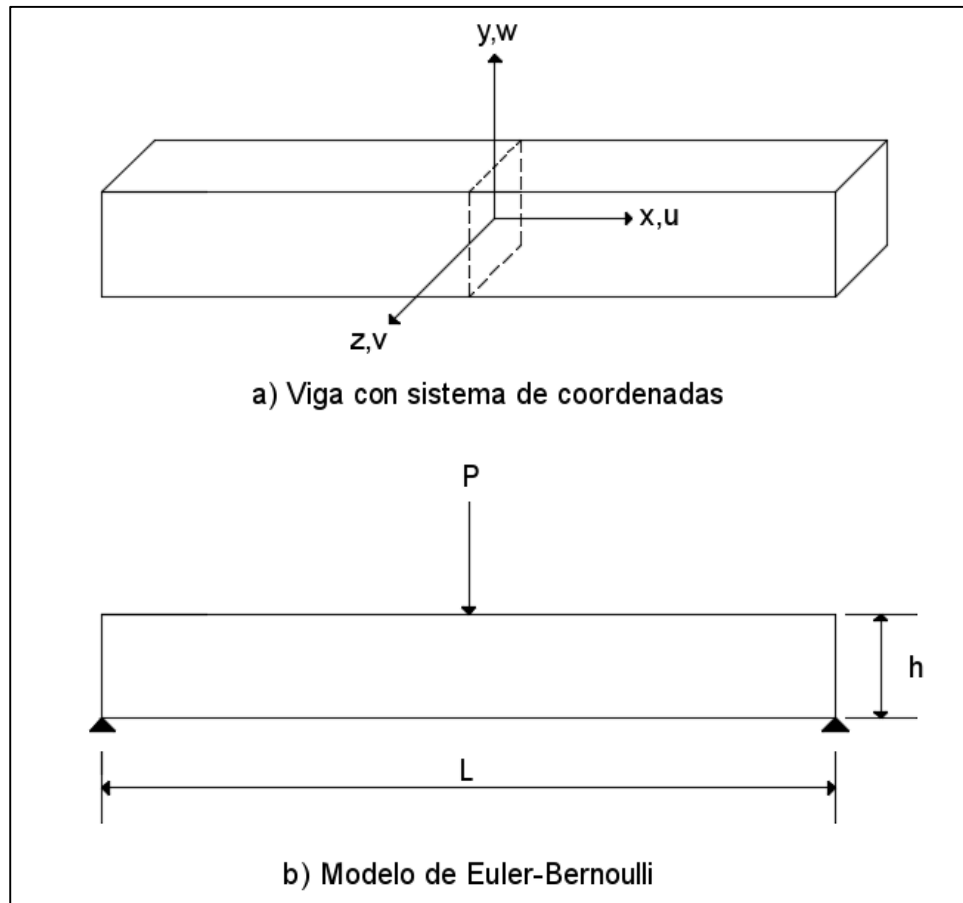


Figura 2. Análisis de elemento esbelto

La hipótesis fundamental de esta teoría consiste en que las deformaciones que sufre la viga están regidas por el efecto de la flexión, por lo que desprecia los efectos de la fuerza cortante. Más concretamente, los supuestos básicos sobre los que se sustenta este modelo son los siguientes:

- Las secciones planas normales al eje longitudinal del elemento permanecen planas después de que este es sometido a flexión.
- El material de la viga es elástico lineal, con módulo de Young "E" y coeficiente de Poisson "ν" despreciable.
- En cada punto el desplazamiento vertical sólo depende de x : $w(x, y) = f(x)$.
- Los puntos de la fibra neutra sólo sufren desplazamiento vertical y giro: $u(x, 0) = 0$.

De esta manera, con ayuda de tales supuestos es posible formular hipótesis cinemáticas que permitan el cálculo de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en elementos esbeltos sometidos a cargas transversales a su eje longitudinal. Por otro lado, los muros corresponden a elementos cuyas relaciones h/L son típicamente mayores a $1/2$, por lo tanto se comportan como elementos chatos, para los cuales las deformaciones por cortante son significativas (Chocano, 2003), de ahí la importancia de conocer las implicaciones de trasladar las consideraciones realizadas por la teoría de Euler-Bernoulli para elementos esbeltos al modelado de muros.

A nivel de modelado los elementos tipo barra consisten en líneas rectas que se conectan a través de articulaciones ubicadas en sus extremos, las cuales poseen seis grados de libertad cada una, tres asociados a la traslación en sus tres ejes perpendiculares, así como otros tres referidos a la rotación alrededor de estos mismos ejes, lo que le otorga un total de doce grados de libertad (ver Figura 3). Cada elemento tipo barra posee su propio sistema de coordenadas locales con el fin de definir cargas y propiedades de la sección, así como para interpretación de resultados.

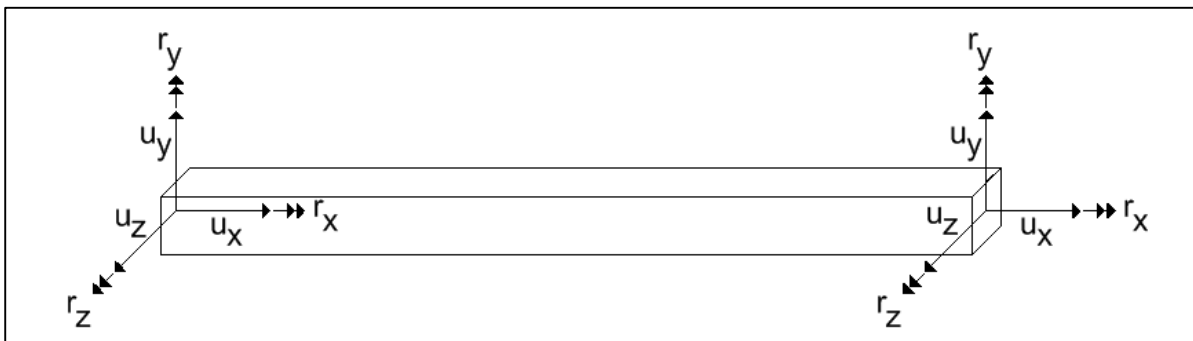


Figura 3. Elemento de tipo barra y sus grados de libertad asociados

Los elementos de tipo barra pueden ser o no prismáticos, donde para estos últimos es posible dividir el elemento en cualquier número de segmentos para los cuales se pueden variar las propiedades de cada uno, ya sea de manera lineal, parabólica o cúbica. Cada elemento de tipo barra puede ser sometido a cargas gravitacionales, múltiples cargas concentradas, múltiples cargas distribuidas, esfuerzos y deformación así como cambios de temperatura (Computers and Structures Inc., 2015).

Algunas de las aplicaciones que poseen estos elementos en el modelado de estructuras se mencionan a continuación:

- Marcos tridimensionales
- Cerchas tridimensionales
- Marcos en el plano
- Cerchas en el plano
- Sistemas de muro (aplicación específica estudiada en este trabajo)

2.3.2. Análisis de elementos por la teoría de elementos finitos

El Método del Elemento Finito (MEF, por sus siglas en español) posee su forma conceptual desde épocas que datan del establecimiento de las bases del cálculo diferencial e integral, sin embargo su desarrollo moderno y la primera aplicación específica a la ingeniería estructural se remonta a los años 40, con los trabajos de Hrennikoff y McHenry en el cálculo de esfuerzos de vigas con secciones transversales continuas (Jiménez, 2004).

En la actualidad, el MEF es ampliamente utilizado para la solución de problemas de ingeniería que involucran geometrías y cargas complejas. La teoría del elemento finito aplica para el caso específico de elementos chatos como muros, donde la razón h/L es típicamente mayor a $1/2$ y la teoría de Euler-Bernoulli no reproduce adecuadamente el comportamiento presentado por el elemento.

La base de este método consiste en dividir un cuerpo continuo en un número finito de elementos tipo área (ver Figura 4), donde el punto de unión entre estos se les llama nodos. Cada nodo tiene grados de libertad asociados que le permiten desplazarse respecto otro, es decir que existen desplazamientos de puntos dentro de cada elemento que requieren ser representados en términos de los desplazamientos nodales, para lo cual se utiliza el concepto de funciones de forma, las cuales corresponden a funciones que permiten realizar dichas interpolaciones. Seguidamente y a través de ecuaciones algebraicas es posible encontrar la matriz de deformaciones del elemento, a la cual aplicando un enfoque de energía potencial y métodos de integración numérica se logra construir la solución del cuerpo. Es decir que este método, en vez de buscar funciones para el campo de desplazamientos de todo el cuerpo, busca la solución de cada nodo e interpola los resultados entre estos para construir la solución completa del cuerpo analizado (Chandrupatla & Belegundu, 2011). Dado que el MEF supone

un método donde se requiere discretizar, las soluciones son aproximadas y dependen directamente de la cantidad de elementos utilizados para discretizar el cuerpo (Jiménez, 2004).

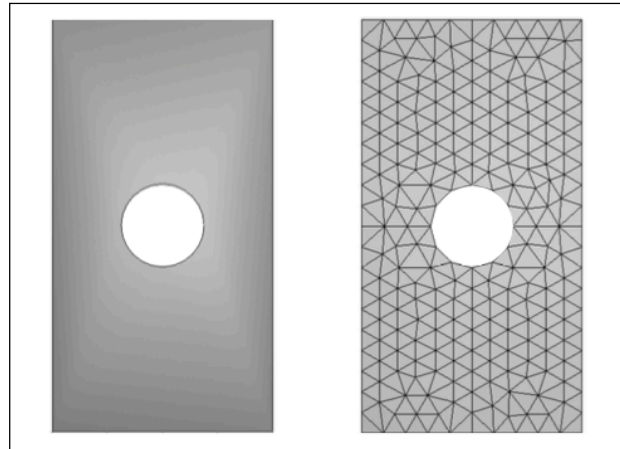


Figura 4. Discretización de una placa en elementos finitos

Fuente: CSI, 2015

Los elementos tipo área pueden estar compuestos de tres o cuatro nodos, cada nodo posee seis grados de libertad, tres asociados a la traslación en sus ejes perpendiculares, así como otros tres grados de libertad correspondientes a la rotación alrededor de dichos ejes, por lo tanto, los elementos tipo área de tres nodos tienen dieciocho grados de libertad, mientras que los elementos de cuatro nodos poseen un total de veinticuatro (ver Figuras 5 y 6).

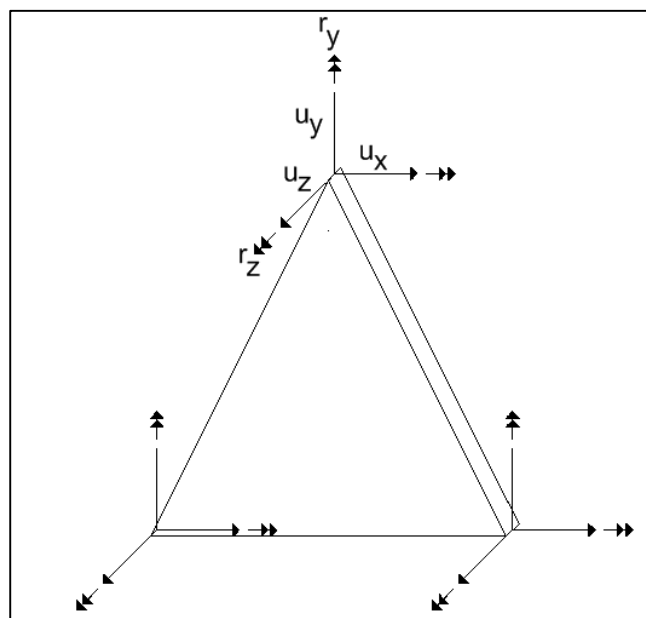


Figura 5. Elemento de tipo área con tres nodos y sus grados de libertad asociados

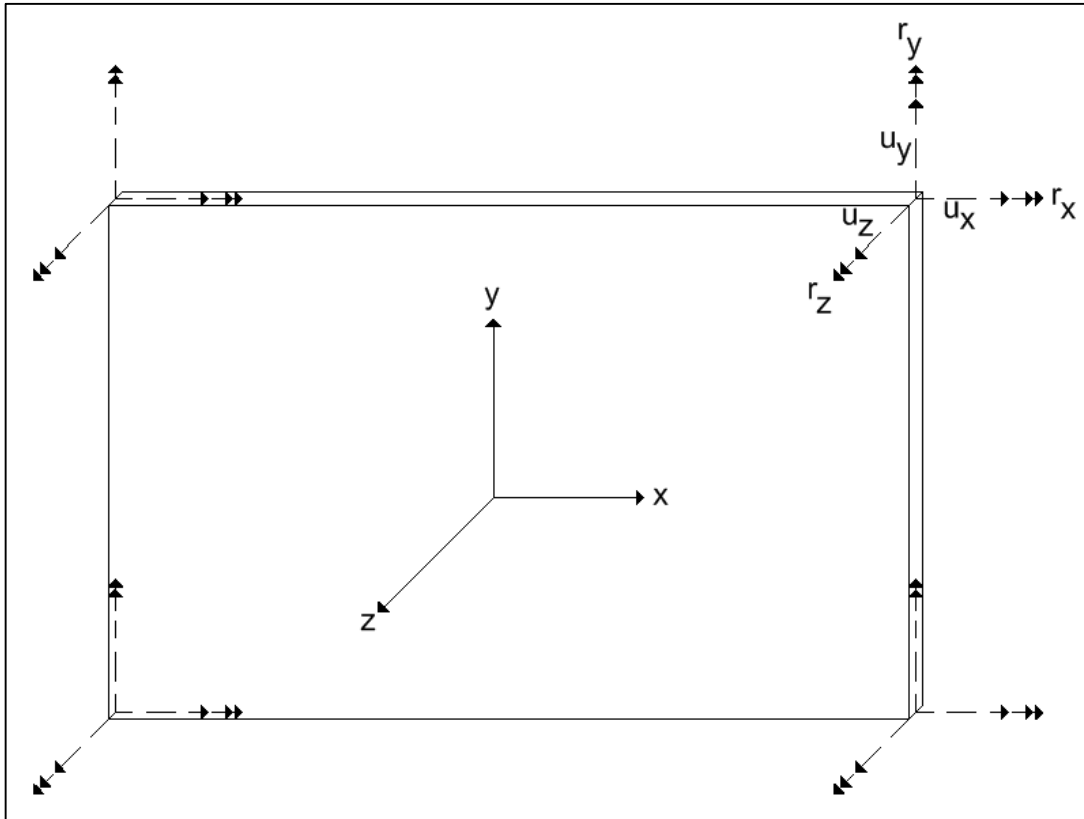


Figura 6. Elemento de tipo área con cuatro nodos y sus grados de libertad asociados

Por otro lado, los elementos de tipo área pueden poseer distintos comportamientos dependiendo de los grados de libertad que se le restrinjan:

- Elemento de tipo cascarón

Los elementos tipo cascarón incluyen la rigidez rotacional y traslacional tanto en el plano como fuera de este. Por lo tanto son elementos capaces de resistir fuerzas perpendiculares al plano como en la misma dirección de este.

- Elemento de tipo placa

El comportamiento de una placa es bidireccional por lo cual se incluye tanto la rigidez rotacional fuera del plano como la rigidez traslacional en la dirección normal al plano del elemento. Es decir, se utiliza para modelar elementos con cargas perpendiculares a su superficie.

- Elemento de tipo membrana

Por otro lado, el comportamiento de un elemento de tipo membrana utiliza una formulación isoparamétrica en la que se incluye el componente de rigidez de traslación en el plano y rotación en la dirección perpendicular al plano del elemento, por lo tanto es un elemento utilizado únicamente para soportar cargas en la dirección del plano.

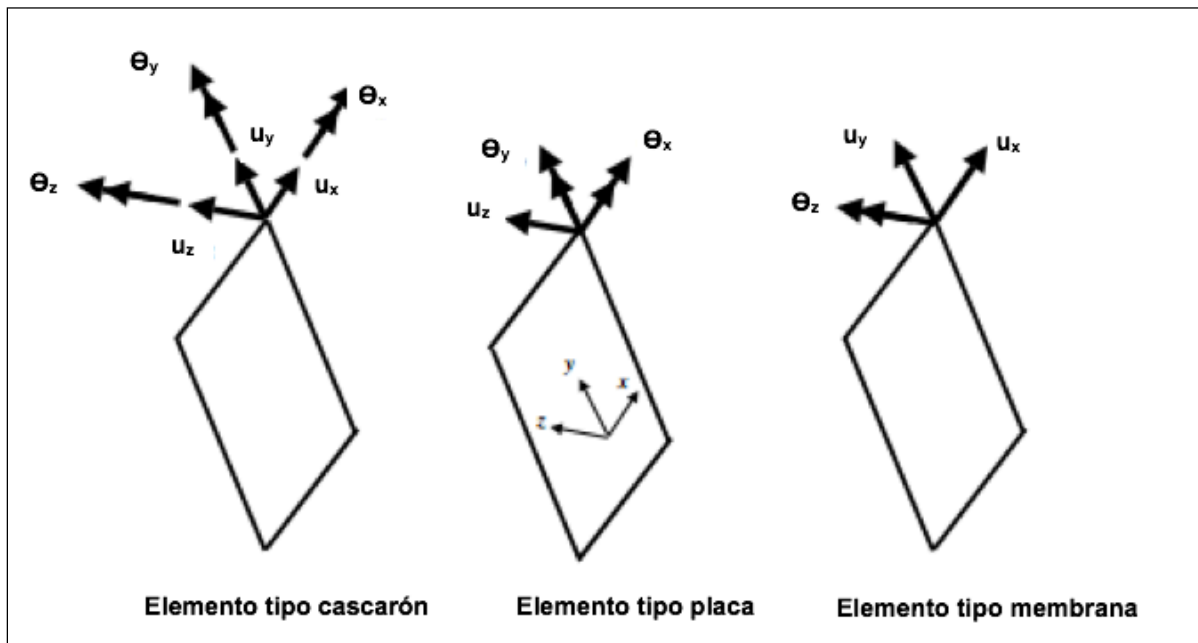


Figura 7. Elementos tipos cascarón, placa y membrana

Fuente: Wilson, 2002

Las estructuras que pueden ser modeladas a través de elementos de tipo área son:

- Sistemas de piso
- Sistemas de muro
- Tableros de puentes
- Estructuras tridimensionales curvas

2.3.3. Método de rigidez directo

El método de rigidez directo (o de los desplazamientos) conforma un método de análisis que permite analizar estructuras estáticamente determinadas e indeterminadas a través del mismo procedimiento. Además, permite obtener tanto los desplazamientos como las fuerzas de forma directa. Por otro lado, la capacidad de procesamiento que poseen las computadoras, permite que estas ejecuten con facilidad las operaciones matriciales requeridas en el procedimiento de análisis, por lo que se convierte en un método muy eficiente a nivel computacional (Hibbeler, 2012).

De manera general, para llevar a cabo este método se requiere subdividir la estructura en un conjunto de elementos discretos y finitos e identificar sus respectivos nodos. Seguidamente y tomando en cuenta las propiedades mecánicas y geométricas de los elementos, se establecen relaciones de fuerza-desplazamiento para cada elemento, las cuales con ayuda de las ecuaciones de equilibrio sirven para dar paso a la construcción de la matriz de rigidez "k" de la estructura, con la cual es posible determinar los desplazamientos desconocidos en los nodos y consecuentemente las fuerzas internas y las reacciones de estructuras hiperestáticas.

Para ejemplificar el procedimiento que exige este método, se mostrarán los pasos seguidos en el análisis de una viga continua con apoyos y cargas intermedias (ver Figura 8):

1. Identificación de elementos y nodos: Se subdivide la viga en conjunto de elementos discretos y se procede a identificar sus nodos. En general un elemento se puede extender entre puntos de apoyo y cargas concentradas, puntos donde desee conocerse las cargas internas o desplazamientos y puntos donde la sección transversal o módulo de elasticidad del elemento varíen. En la Figura 8 se muestra la identificación de nodos (numeración en círculos) y elementos (numeración en cuadros) para la viga del ejemplo.

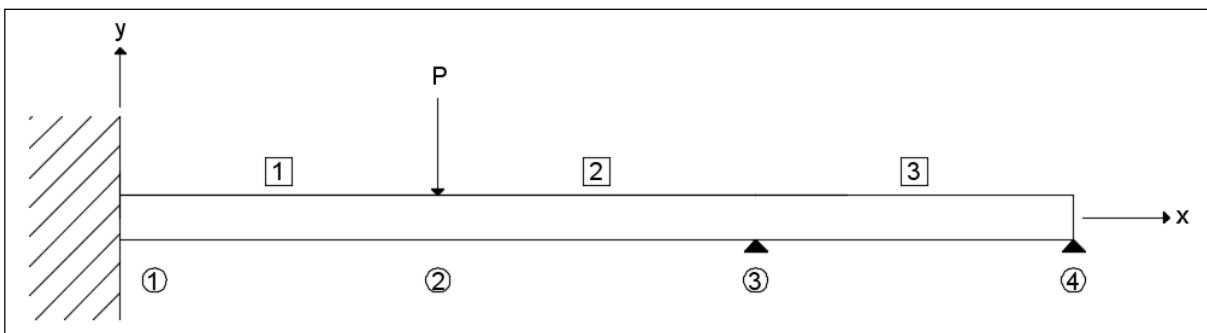


Figura 8. Identificación de elementos y nodos en viga continua

2. Definición de coordenadas globales y locales: Se define un sistema de coordenadas globales X-Y para la viga de la Figura 9, así como un sistema de coordenadas locales para cada uno de los elementos identificados, en particular, la Figura 9 muestra la definición del sistema de coordenadas locales para el elemento "2" de la viga continua, observe que en este caso se define un sistema de coordenadas x' y y' .

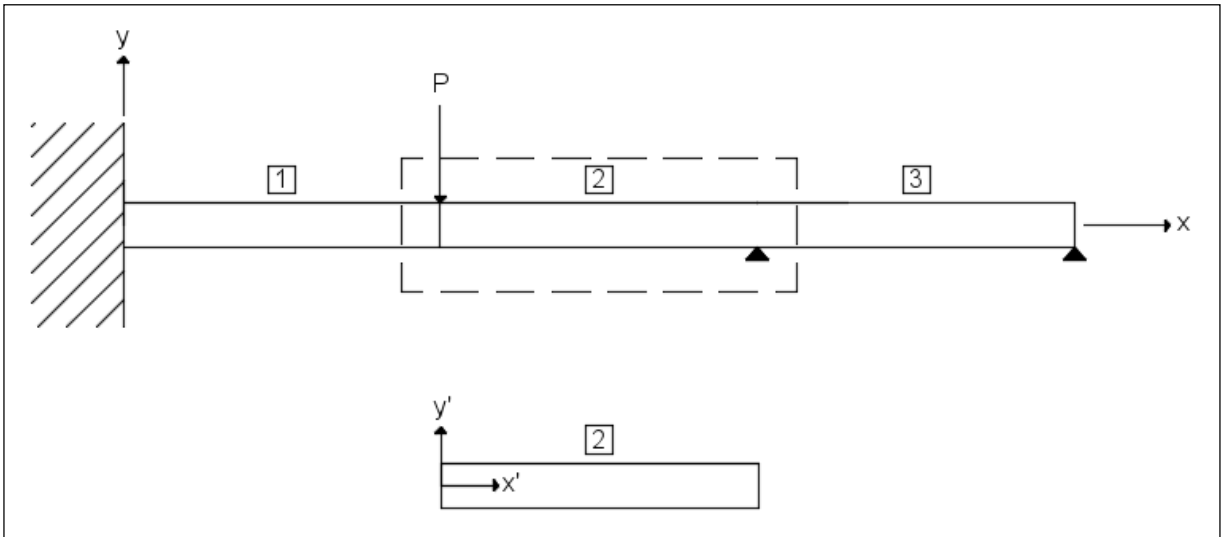


Figura 9. Definición de coordenadas globales y locales

3. Indeterminación cinemática: Se procede a determinar los grados de libertad en cada uno de los nodos de la viga. En el caso de que se consideren los efectos de la fuerza axial, cortante y flexión en el plano, se tienen tres grados de libertad por nodo, tal como se aprecia en la Figura 10.

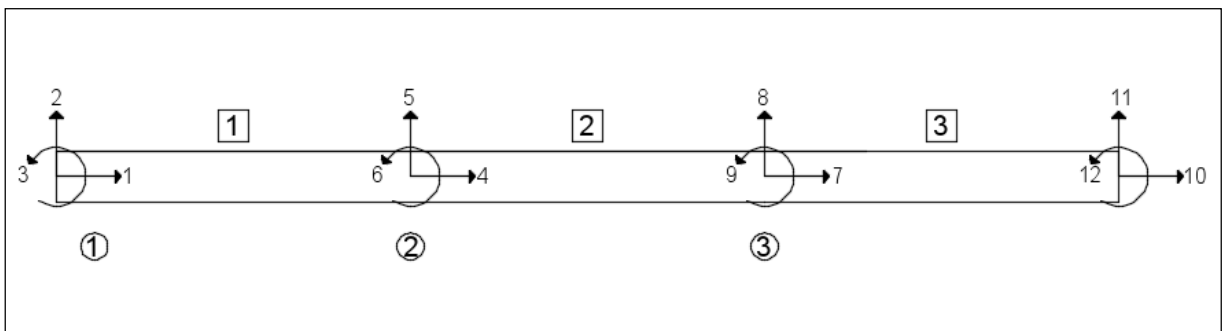


Figura 10. Identificación de grados de libertad

4. Formulación de la matriz de rigidez: Si se considera un elemento arbitrario de la viga y se le impone un desplazamiento unitario en alguno de sus grados de libertad "j", se requiere de un conjunto de fuerzas resultantes que produzcan dicho desplazamiento y a la vez mantengan en cero el desplazamiento en los grados de libertad restantes, dichos valores se identifican como "k_{ij}", donde el sub-índice "i" indica la fuerza producida en el i-ésimo grado de libertad que está asociada al desplazamiento unitario de "j". Si se repite este procedimiento para los grados de libertad restantes y además se superponen los resultados, es posible ensamblar la matriz de rigidez [K] de la viga, la cual relaciona las fuerzas y los desplazamientos, garantizando la compatibilidad de deformaciones y el equilibrio de fuerzas (Ecuación 2):

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & \cdots & k_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{i1} & \cdots & k_{ij} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \vdots \\ \Delta_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde:

- [P]: Vector de fuerzas.
- [k]: Matriz de rigidez.
- [Δ]: Vector de desplazamientos.

Como puede observarse, la relación que existe entre cada fuerza y desplazamiento se explica a través de la Ley de Hooke, donde el factor de proporcionalidad "k_{ij}" se conoce como coeficiente de rigidez, el cual se mostrará posteriormente para el caso específico de elementos tipo barra.

• **Matriz de rigidez de un elemento tipo barra**

Consideremos un elemento tipo barra con sección constante, longitud "L", área transversal "A", módulo de sección "E" y segundo momento de área "I". Como ya se observó anteriormente, un primer paso del método de rigidez supone identificar los nodos y los grados de libertad del elemento (ver Figura 11). Cabe mencionar que el "segundo momento de área" con frecuencia es denominado como "inercia", pese a que ambas definiciones son distintas, por facilidad se utiliza este segundo término a lo largo del documento, dado su uso habitual en la práctica y códigos de diseño.

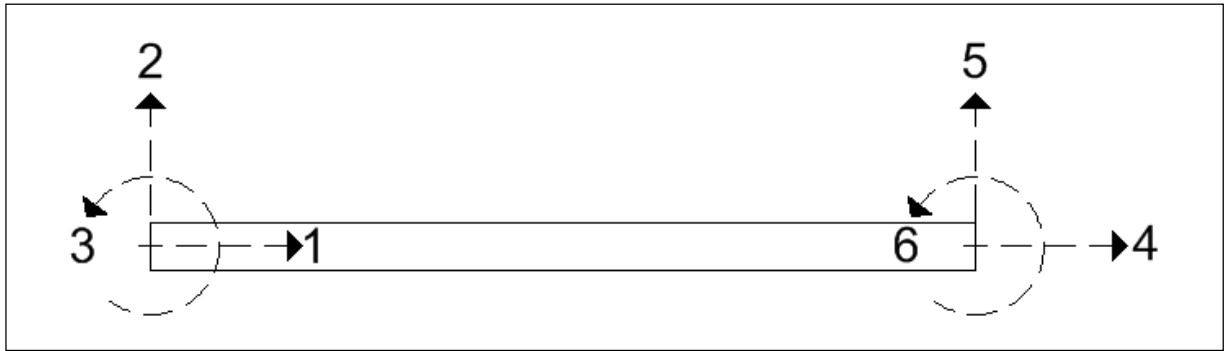


Figura 11. Elemento tipo barra y grados de libertad asociados al plano

Una vez identificados los grados de libertad se procede a construir la matriz de rigidez del elemento. Para ejemplificar dicho procedimiento se impone un desplazamiento unitario al grado de libertad "1" (ver Figura 12), en la cual se observa que para lograr el estado deformado en el cual el grado de libertad "4" se mantiene fijo mientras el grado de libertad "1" se desplaza se requieren de fuerzas que provean el equilibrio estático del elemento. Dichas fuerzas pueden ser calculadas analíticamente a través de relaciones constitutivas, por ejemplo, en este caso la magnitud de dichas fuerzas pueden ser calculadas de la siguiente manera:

$$F = k \cdot \Delta = \frac{EA}{L} \cdot 1 \quad (3)$$

Tales fuerzas poseen las posiciones k_{11} y k_{41} en la matriz de rigidez. Es decir, la posición k_{41} indica la fuerza producida en el grado de libertad "4" cuando se realiza un desplazamiento del grado de libertad "1". Finalmente se repite este procedimiento para los grados de libertad restantes (ver Figura 12) y se procede a construir la matriz de rigidez del elemento barra (Ecuación 4):

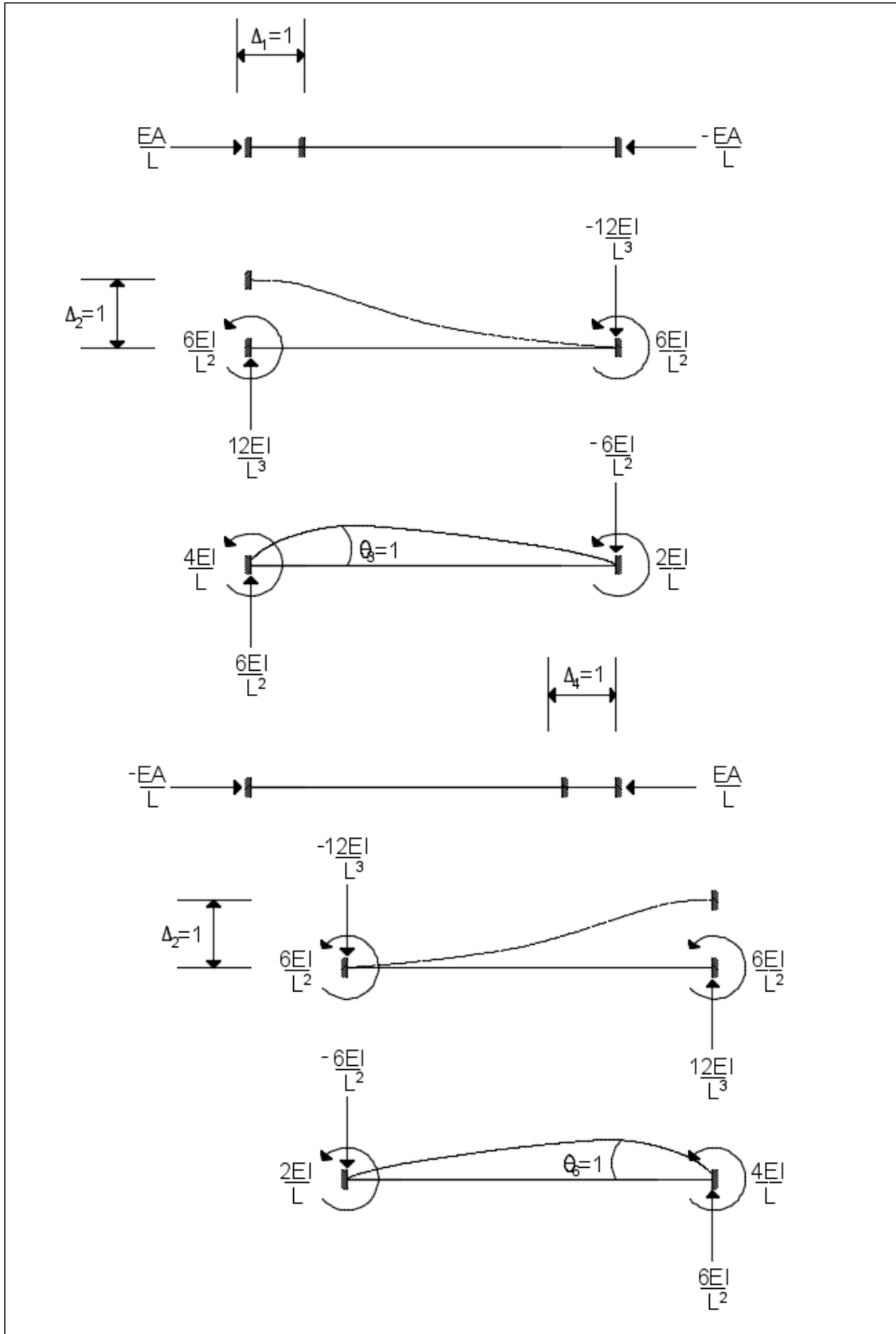


Figura 12. Coeficientes de rigidez para un elemento de tipo barra analizado en el plano

$$[K] = \begin{bmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & -\frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & \frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Hasta este punto se ha analizado este elemento a través de la teoría de Euler-Bernoulli, por lo cual se ha despreciado la contribución de la deformación por cortante en la matriz de rigidez. Una formulación más real incorpora el factor “ β ” que brinda el aporte de la deformación por cortante, dicho factor es directamente proporcional al cuadrado de la esbeltez del elemento (Chocano, 2003), el cual es un aspecto importante a nivel conceptual en el modelado de muros a través de elementos tipo barra, debido a que los muros son elementos chatos y por lo tanto las deformaciones por cortante son considerables. Es decir, si se utilizan elementos tipo barra en el modelado de muros, las deformaciones por cortante se aproximan a través del factor “ β ” (Ecuación 5):

$$\beta = \frac{12(1 + \nu)}{k} \left(\frac{r}{L}\right)^2 \quad (5)$$

Donde:

- ν : Módulo de Poisson.
- k : Rigidez.
- r : Radio de giro.
- L : Longitud.

Finalmente la matriz de rigidez que incluye estos efectos se muestra en la Ecuación 6:

$$[K] = \begin{bmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & -\frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3(1+2\beta)} & \frac{6EI}{L^2(1+2\beta)} & 0 & \frac{-12EI}{L^3(1+2\beta)} & \frac{6EI}{L^2(1+2\beta)} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2(1+2\beta)} & \frac{4EI}{L} \left(\frac{2+\beta}{1+2\beta} \right) & 0 & \frac{-6EI}{L^2(1+2\beta)} & \frac{2EI}{L} \left(\frac{2+\beta}{1+2\beta} \right) \\ -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & \frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-12EI}{L^3(1+2\beta)} & \frac{-6EI}{L^2(1+2\beta)} & 0 & \frac{12EI}{L^3(1+2\beta)} & \frac{6EI}{L^2(1+2\beta)} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2(1+2\beta)} & \frac{2EI}{L} \left(\frac{2+\beta}{1+2\beta} \right) & 0 & \frac{-6EI}{L^2(1+2\beta)} & \frac{4EI}{L} \left(\frac{2+\beta}{1+2\beta} \right) \end{bmatrix} \quad (6)$$

- **Matriz de rigidez de un elemento tipo área**

Como ya se mostró, es posible obtener la matriz de rigidez para un elemento tipo barra de manera analítica, sin embargo en el caso de un elemento tipo área el procedimiento resulta más complejo. El procedimiento general del MEF propone en primera instancia, la definición de funciones de forma que permitan interpolar entre los grados de libertad del elemento. Seguidamente, a través de dichas funciones y la utilización de relaciones algebraicas y métodos de integración numérica es posible obtener la matriz de rigidez del elemento (Chandrupatla & Belegundu, 2011).

Para un elemento tipo área con cuatros nodos y seis grados de libertad por cada uno, se tiene que por cada nodo existen dos grados de libertad asociados a deformaciones planares (u, v) y tres grados de libertad (w, θ_u, θ_v) asociados a la deformación por flexión (ver Figura 13). Un último grado de libertad θ_z se omite del análisis dado que representa torsión planar.

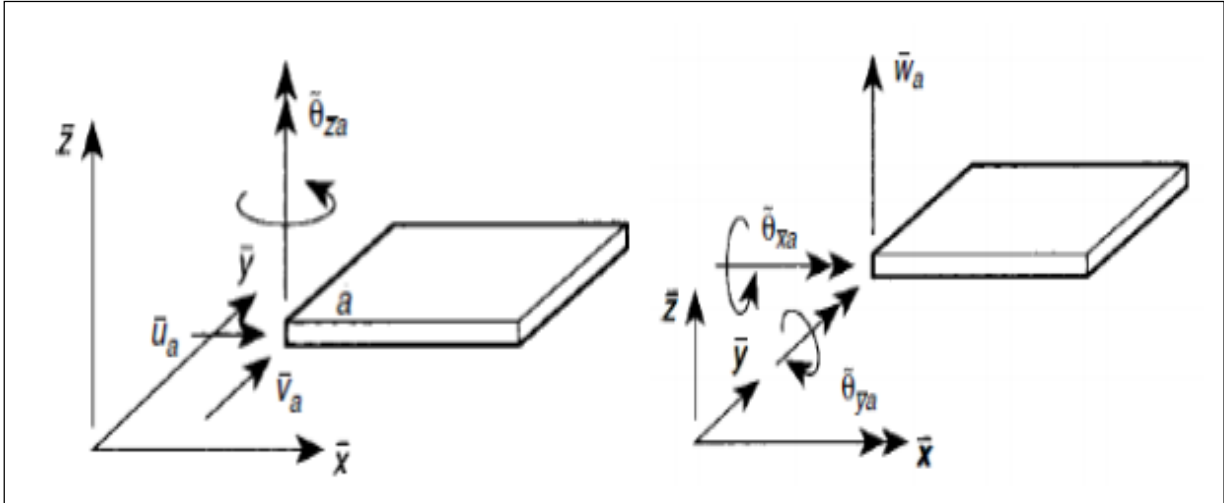


Figura 13. Elemento tipo área con sus grados de libertad

Fuente: Butterworth, 2003

Siguiendo el procedimiento descrito por el MEF, es posible obtener una matriz de rigidez para elementos tipo área con la siguiente forma:

$$[K] = \begin{bmatrix} k_{11}^m & 0 & 0 & k_{12}^m & 0 & 0 & k_{31}^m & 0 & 0 & k_{41}^m & 0 & 0 \\ 0 & k_{11}^b & 0 & 0 & k_{12}^b & 0 & 0 & k_{31}^b & 0 & 0 & k_{41}^b & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{21}^m & 0 & 0 & k_{22}^m & 0 & 0 & k_{32}^m & 0 & 0 & k_{42}^m & 0 & 0 \\ 0 & k_{21}^b & 0 & 0 & k_{22}^b & 0 & 0 & k_{32}^b & 0 & 0 & k_{42}^b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{31}^m & 0 & 0 & k_{23}^m & 0 & 0 & k_{33}^m & 0 & 0 & k_{43}^m & 0 & 0 \\ 0 & k_{31}^b & 0 & 0 & k_{23}^b & 0 & 0 & k_{33}^b & 0 & 0 & k_{43}^b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ k_{41}^m & 0 & 0 & k_{24}^m & 0 & 0 & k_{34}^m & 0 & 0 & k_{44}^m & 0 & 0 \\ 0 & k_{41}^b & 0 & 0 & k_{24}^b & 0 & 0 & k_{34}^b & 0 & 0 & k_{44}^b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

En esta matriz el elemento k_{ij}^m corresponde a la sub-matriz de 2x2 de elementos provenientes de la matriz de rigidez para la deformación planar, y k_{ij}^b corresponde a la sub-matriz de 3x3 de elementos provenientes de la matriz de rigidez para la flexión. Los índices identifican la interacción entre los nodos, es decir, el valor de k_{24}^m corresponde a la rigidez del nodo "2" respecto al nodo "4".

Finalmente, el Cuadro 1 muestra un resumen de las principales características de los tipos de elementos estudiados para el modelado de muros en esta investigación.

Cuadro 1. Cuadro comparativo de elementos tipo barra contra elementos tipo área

Elemento	Barra	Área
Características	<p>Utiliza la teoría de Euler-Bernoulli</p> <p>Facilidad para obtener la matriz de rigidez de manera analítica.</p> <p>Se ajusta al comportamiento de elementos esbeltos, por lo que las deformaciones por cortantes son aproximadas a través del factor β.</p>	<p>Utiliza la teoría del elemento finito.</p> <p>La matriz de rigidez no se puede obtener de manera analítica, el procedimiento es mucho más complejo.</p> <p>Se ajusta al comportamiento de elementos chatos, donde las deformaciones por cortante son significativas.</p>
Aplicaciones	<p>Marcos tridimensionales.</p> <p>Cerchas tridimensionales.</p> <p>Marcos en el plano.</p> <p>Cerchas en el plano.</p>	<p>Sistemas de piso.</p> <p>Sistemas de muro.</p> <p>Tableros de puentes.</p> <p>Estructuras tridimensionales curvas.</p>

2.4. Consideraciones en el modelado de edificios tipo muro

Como se ha venido estudiando, existen diversas técnicas para el modelado de edificios tipo muro, las cuales derivan principalmente en el uso de elementos de tipo barra o de tipo área. Ambas técnicas son utilizadas en el país por diseñadores estructurales, sin embargo académicamente no han sido objeto de estudio, por lo cual se desconoce formalmente las diferencias entre los resultados obtenidos a través de una metodología u otra.

En la Figura 14 se muestra un edificio real (a), el cual es posteriormente modelado a través de elementos de tipo barra que se encuentran vinculados por medio de uniones "infinitamente" rígidas (b), finalmente se muestra este mismo edificio pero modelo a partir de elementos de tipo área (c).

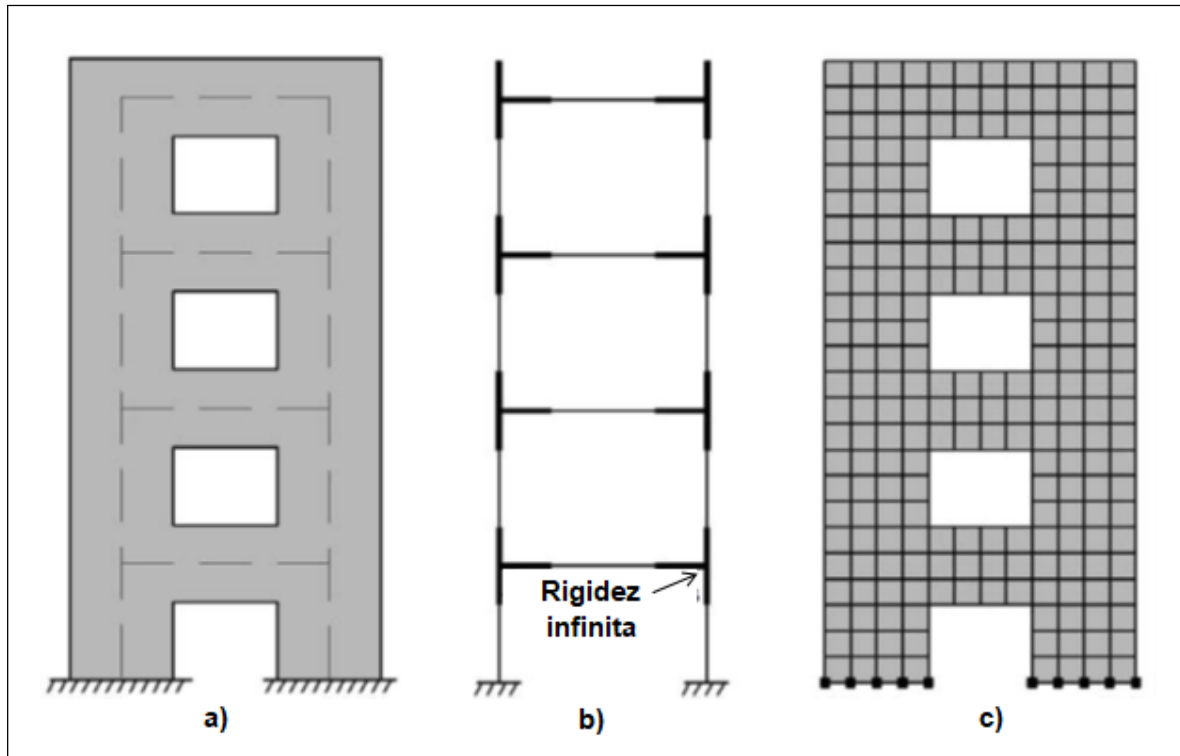


Figura 14. Esquema de técnicas de modelado de edificios tipo muro

Fuente: Chelariu, 2011

A continuación se explicará de manera general las características y consideraciones que poseen las técnicas de modelado estudiadas.

2.4.1. Modelado de muros con elementos tipo barra

En la Figura 15 se muestra un ejemplo de modelado de muros a través de elementos tipo barra, dicha técnica también es conocida como “analogía de la columna ancha” (WCA, por sus siglas en inglés), la cual fue desarrollada por Clough, MacLeod y Hosny y que se hizo particularmente popular por la simplicidad de esta en el modelado de edificios de este tipo.

Para modelar un muro a través de esta técnica se requiere de dos tipos de elementos, lo cual se dice de esta manera porque a pesar de que ambos consisten en elementos de tipo barra, la función que desempeñan cada uno es distinta. El primero de estos es denominado “MidPier”, y es el elemento de tipo barra al cual se le asignan todas las propiedades físicas y mecánicas del muro, es decir, aunque un muro en su entorno real comprende un área específica determinada, en esta técnica todas las características propias del muro se concentran en un único elemento lineal contenido entre dos nodos.

El segundo tipo de elementos son los "brazos rígidos", los cuales para efectos del modelo poseen inercia infinita. Esta inercia es asignada en función del elemento de mayor inercia de la estructura y un multiplicador (típicamente entre 1 000 y 10 000), el cual no puede ser excesivamente grande dado que el programa define matrices de rigidez en función de las propiedades de los elementos, por lo que un valor de gran magnitud podría provocar que las matrices no sean matemáticamente trabajables.

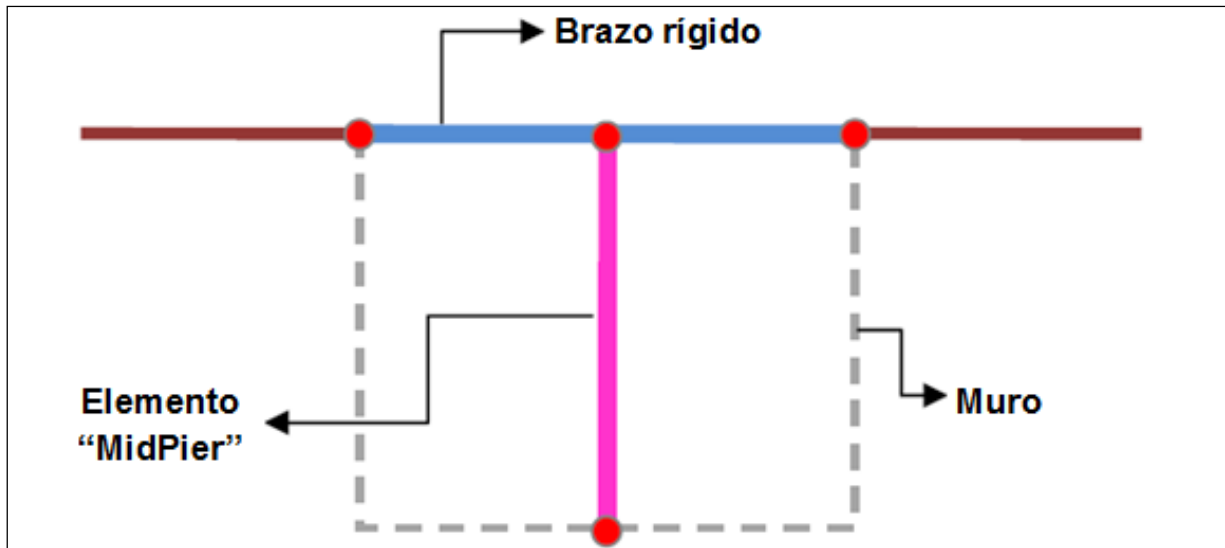


Figura 15. Modelo de muro con elementos de barra

Fuente: Kubin, 2008

2.4.2. Modelado de muros con elementos tipo área

En la Figura 16 se muestra un modelo de un muro utilizando elementos de tipo área. En este caso la elaboración del modelo es bastante sencilla, ya que basta con definir un elemento de tipo área en el espacio físico destinado al muro, además como ya se mencionó el proceso de análisis de este tipo de elementos requiere realizar una discretización en elementos finitos. Es claro que a diferencia del modelado con elemento tipo área, en este caso las propiedades físicas y mecánicas del muro no están concentradas a lo largo de un único elemento lineal, sino a través de una malla compuesta por una cantidad finita de elementos vinculados entre sus nodos.

En el caso del modelo mostrado en la Figura 16, se observa un tamaño de malla de 4x5, donde el primer número representa la cantidad de filas y el segundo las columnas, es decir, el muro se subdividió en 20 elementos que están interconectados a través de sus nodos, siendo este

uno de los aspectos más importantes a estudiar en este tipo de modelos, ya que la exactitud de los resultados depende directamente del grado de discretización empleado. Aunque a tamaños más finos de malla los resultados se vuelven cada vez más precisos, el costo computacional en tiempo y recursos se puede elevar sustancialmente, lo cual en muchos casos no es práctico considerando las magnitudes de los resultados manejados en la práctica de la ingeniería civil.

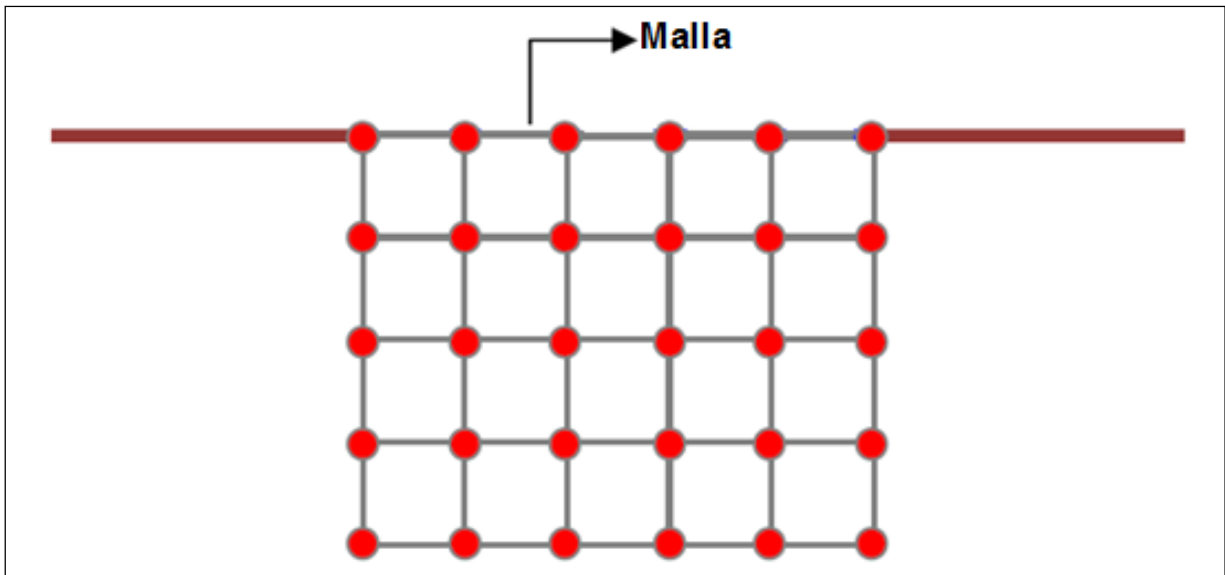


Figura 16. Modelo de muro con elementos de área

Fuente: Kubin, 2008

2.5. Parámetros de respuesta estructural

Durante la actividad sísmica, la demanda producida en las estructuras se puede idealizar como fuerzas laterales equivalentes que son resistidas a través de los diferentes sistemas sismorresistentes que componen las edificaciones, las cuales responden ante estos eventos.

Dichas respuestas pueden presentar diferencias de acuerdo a la técnica de modelado que se utilice, por lo cual resulta importante conocer si tales variaciones son significativas. A continuación se definen las respuestas estructurales estudiadas en esta investigación.

- **Modos de oscilación y períodos**

La oscilación corresponde a la perturbación de un medio o sistema en el tiempo, en el caso de que esta alteración se repita se habla de oscilación periódica, movimiento para el cual el período

se define como el tiempo que le toma al sistema cubrir un ciclo de oscilación. Por otro lado, los diferentes modos de oscilación que puede poseer una estructura está directamente asociado a la cantidad de grados de libertad que esta posee.

Algunas estructuras pueden idealizarse como sistemas de un grado de libertad, esto quiere decir que en este tipo de estructuras sólo es posible un tipo de movimiento y por lo tanto la posición del sistema puede ser determinara en cualquier instante a través de una sola coordenada. En general, esta idealización puede realizarse en sistemas que poseen masas concentradas soportadas por estructuras de masa despreciable y rigidez lateral "k", tal es el caso de columnas que soportan losas rígidas o tanques de agua (ver Figura 17).

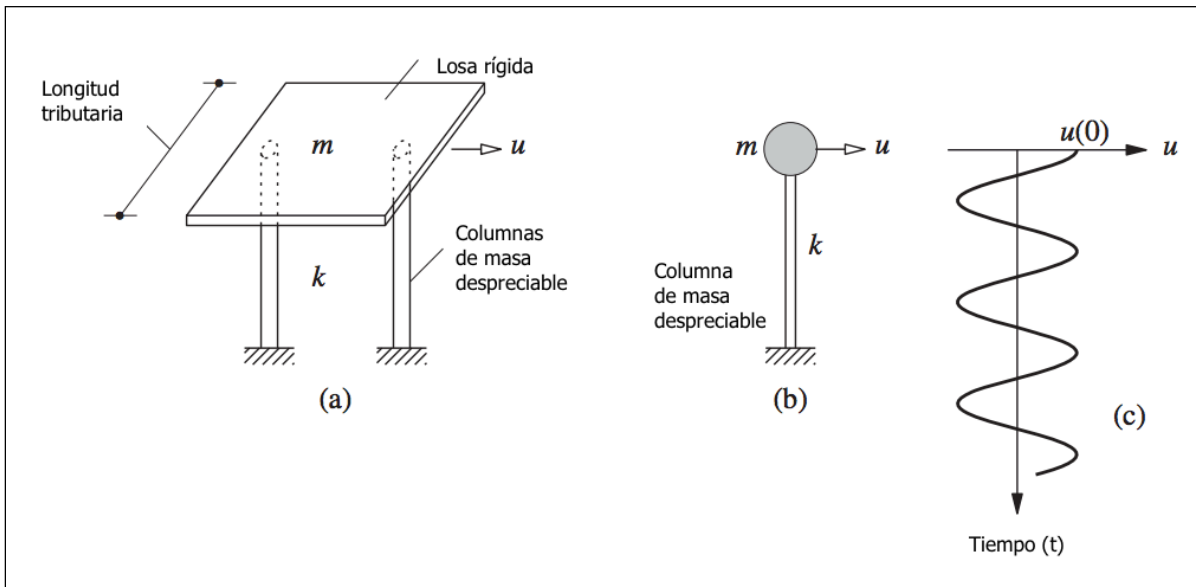


Figura 17. Ejemplos de sistemas estructurales de un grado de libertad

Fuente: Chopra, 2011

Para sistemas de un grado de libertad, el período se puede obtener en función de la masa y la rigidez de la estructura, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k}} \quad (8)$$

Donde:

- M: Masa de la estructura.
- k: Rigidez de la estructura.

Sin embargo, los edificios de más de un nivel corresponden a sistemas de varios grados de libertad, por lo cual presentan diferentes modos de oscilación que se excitan simultáneamente con la aceleración sísmica (ver Figura 18), lo que a su vez se traduce en diferentes fuerzas inerciales soportadas por la estructura. Esto supone un problema de análisis modal que requiere de ecuaciones dinámicas para encontrar las diferentes frecuencias asociadas a los modos de vibrar de la estructura. En general los períodos de sistemas de varios grados de libertad como edificios se calculan de la siguiente manera:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_i} \quad (9)$$

Donde:

- ω_i : Frecuencia asociada al i-ésimo modo de oscilación de la estructura.

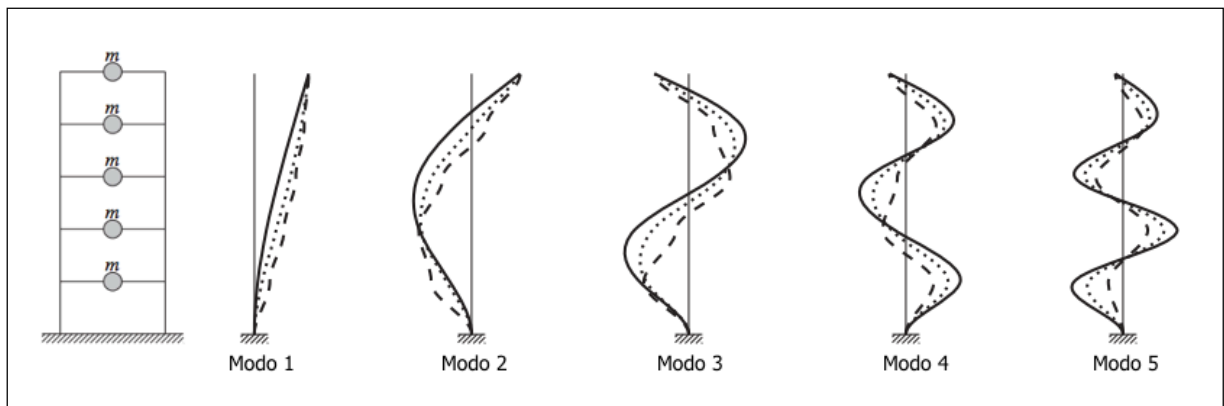


Figura 18. Sistema de varios grados de libertad y sus modos de oscilación asociados

Fuente: Chopra, 2011

- **Masa participativa**

Esta hace referencia a la masa que es efectiva durante la acción de un sismo, es decir, aquella masa que es acelerada por un modo de oscilación en particular y que genera fuerzas en la estructura.

- **Rigidez**

Corresponde a una medida de la capacidad de los materiales y estructuras a deformarse ante una carga aplicada. Para elementos estructurales la rigidez depende tanto de la inercia de su sección transversal como de las propiedades mecánicas del material que lo compone. Por ejemplo, la rigidez lateral de un elemento tipo barra empotrada en sus extremos y con un

desplazamiento perpendicular a uno de sus extremos, se puede calcular con base en la siguiente ecuación:

$$k = \frac{12EI}{h^3} \quad (10)$$

Donde:

- E: Módulo de elasticidad del material.
- I: Inercia de la sección en la dirección de análisis.
- h: Altura de muro.

Esto implica que a medida que aumenta la altura de un elemento su rigidez se ve sustancialmente reducida, es por este motivo que a mayor altura los períodos de una estructura incrementan considerablemente, según se denota en la Ecuación 8.

Por otro lado, la inercia de una sección se relaciona únicamente con dimensiones geométricas, por lo cual puede ser fácilmente calculada para geometrías poco complejas. Por ejemplo, en la Figura 19 se observa un muro con sus respectivas dimensiones, la inercia de este elemento con respecto al eje "y" se puede ser obtenida a través de la siguiente ecuación:

$$I_y = \frac{t^3 \cdot L_w}{12} \quad (11)$$

Donde:

- t: Espesor de muro
- L_w : Ancho de muro

Adicionalmente la inercia con respecto al eje "z" corresponde a:

$$I_z = \frac{L_w^3 \cdot t}{12} \quad (12)$$

Esto provoca que la rigidez de un elemento sea dependiente de la dirección en la cual se analiza. Si se observan las ecuaciones 11 y 12 en conjunto con el muro mostrado a través de la Figura 19 se podría esperar que su rigidez lateral en la dirección "y" fuera mayor que en la dirección "z".

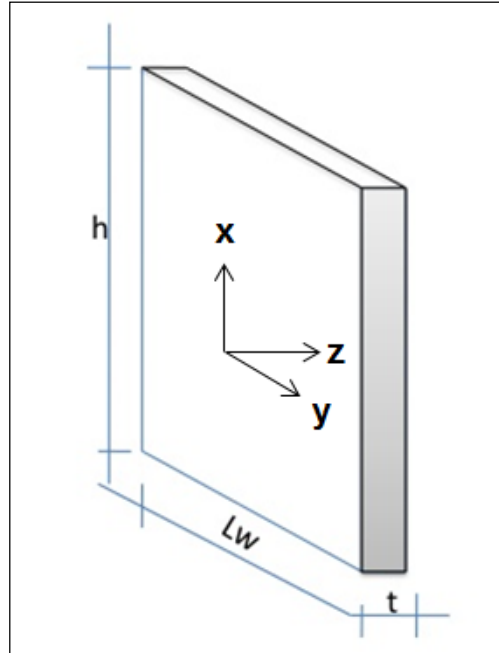


Figura 19. Esquema de un muro

- **Desplazamiento**

Durante la acción del sismo, las estructuras se ven sometidas a movimientos del terreno que provocan que esta se vea desplazada de su posición original. Para esta investigación dichos desplazamientos estarán referenciados al centro de masa de la estructura (CM), el cual corresponde al centro geométrico donde se localiza la resultante de las fuerzas gravitacionales.

- **Razón de deriva**

En un edificio de varios pisos, la razón de deriva es el desplazamiento relativo que existe entre dos pisos adyacentes dividido por la altura comprendida entre ambos.

Su expresión corresponde a:

$$\Delta_i = \frac{\delta_i - \delta_{i-1}}{H_i} \quad (13)$$

Donde:

- δ_i : Desplazamiento del nivel i
- δ_{i-1} : Desplazamiento del nivel adyacente inferior
- H_i : Altura comprendida entre ambos pisos

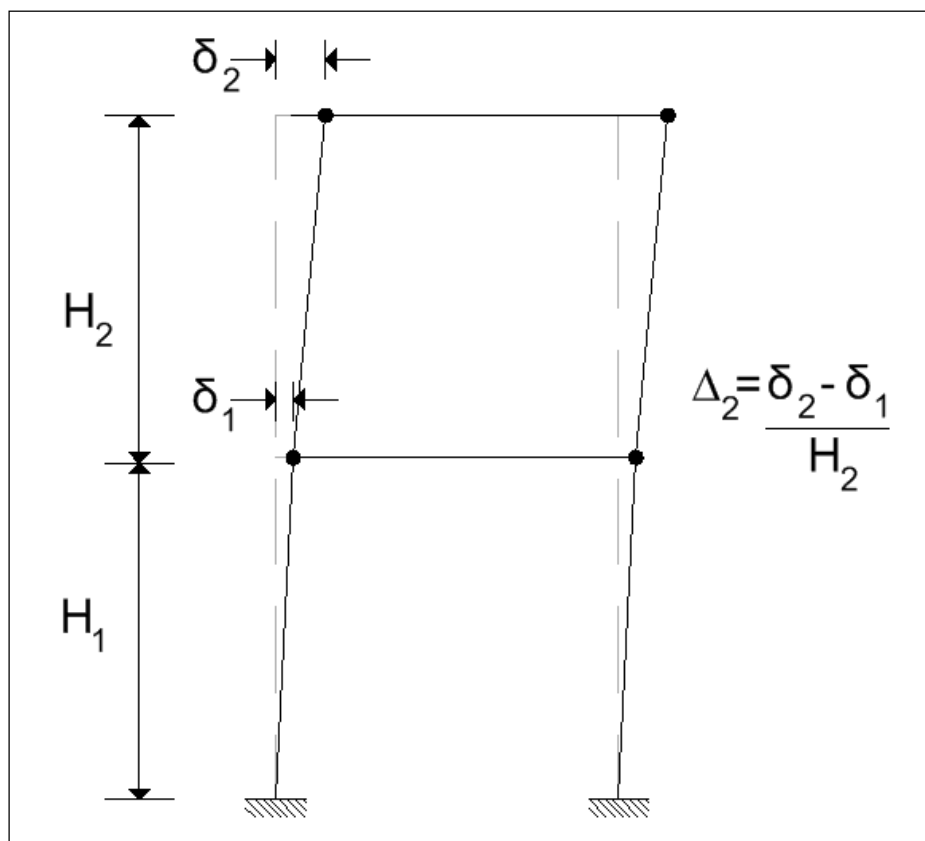


Figura 20. Razón de deriva para estructura de dos niveles

Resulta importante mencionar que las razones de deriva que se obtienen a través del modelado en el programa computacional *ETABS*, corresponden a valores en el rango elástico.

3.Elaboración de modelos

En este capítulo se detallan los aspectos y consideraciones realizadas durante la etapa de modelado. Para el desarrollo de esta investigación se modeló un total de doce edificios, de los cuales seis de estos poseen distribuciones en planta "ficticias", mientras que los seis restantes corresponden a distribuciones de muros de edificaciones reales. Con el fin de evitar distorsiones en los resultados, se analizaron estructuras con regularidad tanto en planta como en altura, además se omitió el modelado de techos, escaleras, buques de ventanas, puertas y otros elementos.

Para cada distribución en planta o edificio se elaboraron tres modelos independientes, uno construido a través de elementos de tipo área, otro basado en elementos de tipo barra con sección transversal regular y un tercero que incorpora una variante de este anterior, ya que

para este escenario se definen elementos de tipo barra cuyas secciones transversales poseen forma irregular, es decir, en este caso dichos elementos se pueden definir con secciones en forma de "L", "T" o incluso geometrías más complejas. Esta última metodología tiene como objetivo modelar un conjunto de muros a través de un único elemento de tipo barra, ya que se considera la inercia de la sección irregular contemplando la unión que tienen los muros en sus bordes verticales. El elemento de sección irregular así modelado, presenta una mayor inercia (y por tanto mayor rigidez) que un elemento conformado por secciones rectangulares unidas con vigas rígidas en su parte superior, tal y como se mostró en la Figura 15. Posteriormente se detallará un procedimiento general a seguir para la ejecución de cada una de estas técnicas.

Para esta etapa de la investigación se utilizó específicamente el programa computacional de análisis estructural denominado *ETABS* de la compañía Computers and Structures Inc., del cual la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica posee licencia y ha dado acceso para la realización de este trabajo.

3.1. Consideraciones generales

3.1.1. Materiales

El único material utilizado en el modelado de muros y entresijos de cada edificación fue el concreto reforzado, cuyas propiedades pueden observarse en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Propiedades del concreto

Densidad	2400 kg/m ³
Resistencia (f'_c)	21 MPa
Módulo de elasticidad	21459 MPa
Módulo de Poisson	0,2
Módulo de cortante	8941 MPa

3.1.2. Agrietamiento

Se consideraron secciones de muro sin agrietar, por lo que los momentos de inercia equivalente de cada elemento corresponden a la inercia bruta de cada sección. Esta consideración, aunque contradice lo indicado en el CSCR-10, no influye en las conclusiones de este trabajo, al obtenerse estas de una comparación relativa entre resultados obtenidos por varios métodos de modelaje.

3.1.3. Cargas permanentes y temporales

Las cargas correspondientes al peso propio de la estructura se calcularon automáticamente por el programa computacional *ETABS*, sin embargo es importante mencionar que para todos los modelos se consideraron espesores de muro y entrepiso de 20 cm, así como alturas de piso de 3 m.

El resto de cargas asignadas corresponden a cargas típicas de edificaciones cuyo uso es de apartamentos. Las cargas permanentes de elementos no estructurales pueden observarse en el Cuadro 3, mientras que la carga temporal establecida posee una magnitud de 200 kg/m^2 , el cual es un valor obtenido de la Tabla 6.1 del CSCR-2010 para estructura de uso habitacional. Cabe mencionar que en los modelos estas cargas se asignaron como cargas uniformemente distribuidas sobre los entrepisos.

Cuadro 3. Cargas permanentes de elementos no estructurales

Cargas permanentes por metro cuadrado	Peso (kg/m²)
Peso de los cerramientos livianos	50
Peso de los sistemas electromecánicos	15
Peso de acabados de piso de concreto	75
Nivelación de piso de concreto (3 cm)	70
Cielorraso de láminas de yeso ("gypsum")	15
<i>Total</i>	225

3.1.4. Zona sísmica y sitios de cimentación

Debido a que la zona sísmica y sitio de cimentación no son variables relevantes dentro del estudio, se estableció que todas las estructuras se encuentran en un sitio de cimentación tipo S_3 y dentro de la Zona III, la cual es la condición actual más frecuente de edificios de apartamentos como los analizados en este trabajo. Además, realizar esta simplificación permite trabajar todos los modelos en un mismo contexto, lo cual representa una ventaja debido a que fija estas variables para efectos de la investigación.

Según la Tabla 2.3 del CSCR 2010, la aceleración pico efectiva de diseño para un período de retorno de 475 años y las condiciones de sitios previamente definidas, corresponde a un 36% de la aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$); así mismo los factores espectrales dinámicos (FED) referentes a las condiciones del sitio establecidas pueden observarse en la Figura 21, de los cuales se utiliza el espectro ubicado en el rango elástico ($\mu=1$).

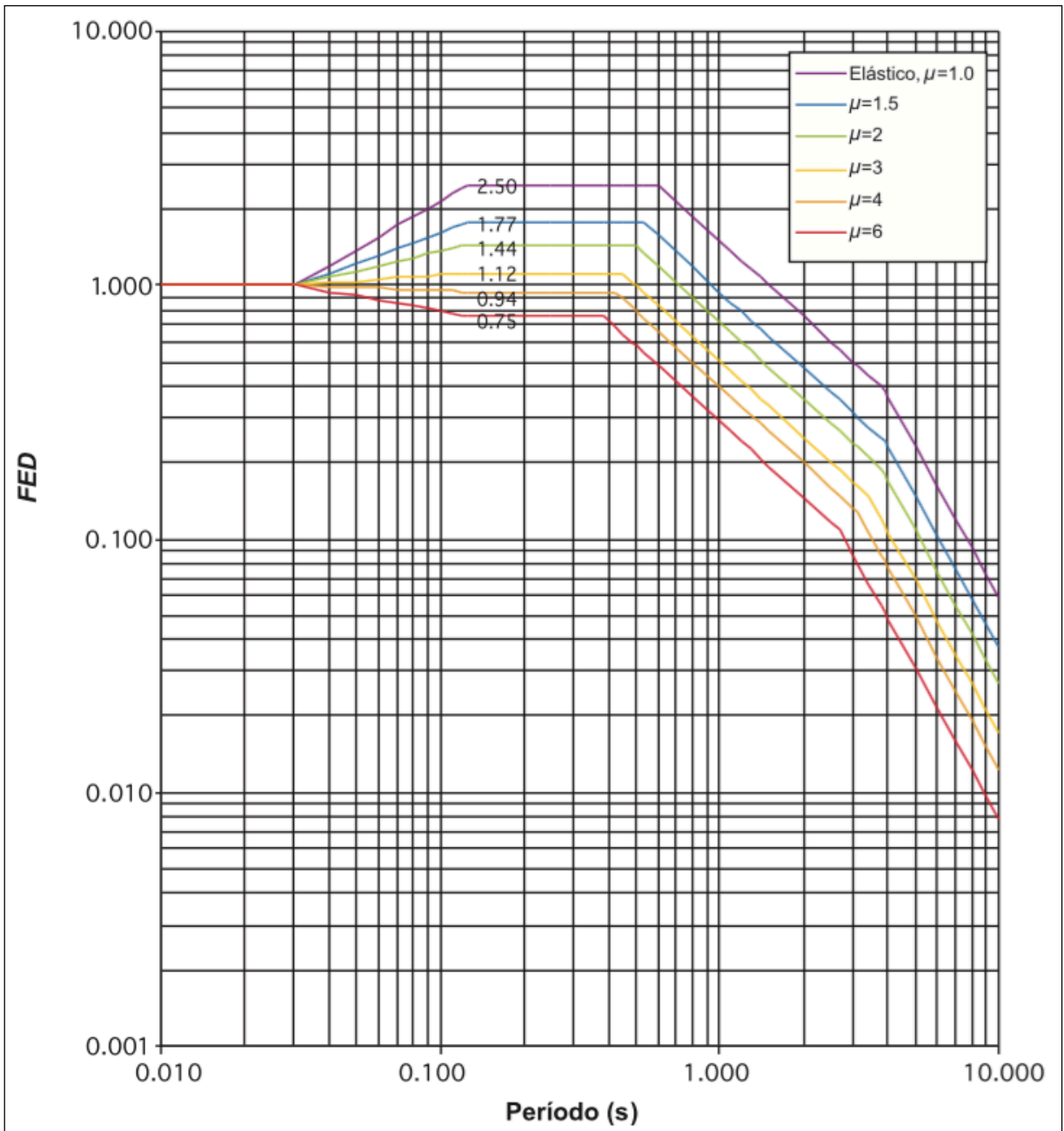


Figura 21. Factor espectral dinámico (FED) para Zona III y sitio de cimentación S_3 para ductilidades de 1, 1.5, 2, 3, 4 y 6 y amortiguamiento del 5%

Fuente: CSCR, 2010

3.1.5. Coeficiente sísmico

Tal como se definió en el alcance de la investigación, no se tomaron en cuenta aspectos de sobrerresistencia en la estructura, por lo que el denominador de la ecuación para el cálculo del coeficiente sísmico se tomó igual a la unidad. Debido al enfoque que posee esta investigación, el realizar dicha consideración no incide en la comparación relativa de los resultados arrojados por los diferentes modelos, el cual es un aspecto que también aplica para la definición de otras variables de entrada tales como cargas, aceleraciones, masa sísmica, componentes direccionales, etc.

Por otro lado, el factor de importancia se definió con una magnitud de "1", el cual corresponde a edificaciones de ocupación normal según la tabla 4.1 del CSCR-2010.

$$C = \frac{a_{ef} \cdot FED \cdot I}{SR} \quad (14)$$

Dónde:

- a_{ef} = aceleración pico efectiva de diseño en la base de la estructura.
- I = factor de importancia de la edificación (Tabla 4.1 CSCR-2010).
- FED = factor espectral dinámico.
- SR = factor de sobrerresistencia.

El CSCR-2010 especifica que las demandas sísmicas horizontales pueden tomarse como la suma vectorial de los efectos en una dirección más el 30% de este efecto en la otra dirección. Por lo tanto, tomando en cuenta este apartado y la definición del coeficiente sísmico, la aceleración que fue introducida en el programa cuando el sismo actúa en la dirección "X" tiene un valor de:

$$\frac{0,36 \cdot 1}{1} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot FED = 3,53 \text{ m/s}^2 \cdot FED \quad \text{para la dirección X}$$

$$3,53 \text{ m/s}^2 \cdot 30\% \cdot FED = 1,06 \text{ m/s}^2 \cdot FED \quad \text{para la dirección Y}$$

En el caso de la dirección "Y" se invierten los valores en cada dirección:

$1,06 \text{ m/s}^2 \cdot \text{FED}$ para la dirección X

$3,53 \text{ m/s}^2 \cdot \text{FED}$ para la dirección Y

3.1.6. Masa del edificio considerada en el análisis por sismo

Para el cálculo de la carga sísmica se consideró 100% de las cargas permanentes y 15% de las cargas temporales, lo cual está definido con base en la sección 6.1.3 de CSCR-2010.

3.1.7. Modos de oscilación

La cantidad de modos asignados en los modelos se hizo de manera que se pudiera obtener una masa efectiva oscilante acumulada del 95% de la masa total en cada dirección ortogonal.

3.1.8. Elementos estructurales

- **Entrepisos**

Los entrepisos se modelaron como elementos de tipo cascarón delgado, los cuales funcionan como losa en dos direcciones. Además, estos se consideraron como diafragmas rígidos en su plano y se les asignó un espesor de 20 cm. Adicionalmente, se recuerda que las cargas permanentes no estructurales y temporales se asignaron como cargas uniformemente distribuidas sobre dichos elementos.

- **Muros**

Al igual que los entrepisos, a los muros se les asignó un espesor de 20 cm y dependiendo de la técnica utilizada, estos se modelaron con elementos de tipo barra o con elementos de tipo área, en cuyo caso se definieron como un elemento de tipo cascarón delgado.

- **Apoyos**

Los apoyos se consideraron como empotramiento perfecto.

3.1.9. Discretizado de elementos

Finalmente, para todos los elementos de tipo área utilizados durante el modelado de muros y entrepisos se utilizó una discretización estándar de elementos de 1 m x 1 m.

3.2. Técnicas de modelado aplicadas a un núcleo de muros de concreto

En la Figura 22 se observa una vista en planta de un núcleo de muros de concreto con dimensiones 10 m x 10 m y espesor de 20 cm. En este ejemplo se muestra de manera general el procedimiento que debe seguirse para ejecutar cada una de las técnicas estudiadas. Las coordenadas "X-Y" se encuentran en el plano horizontal, mientras que la coordenada "Z" está en dirección vertical.

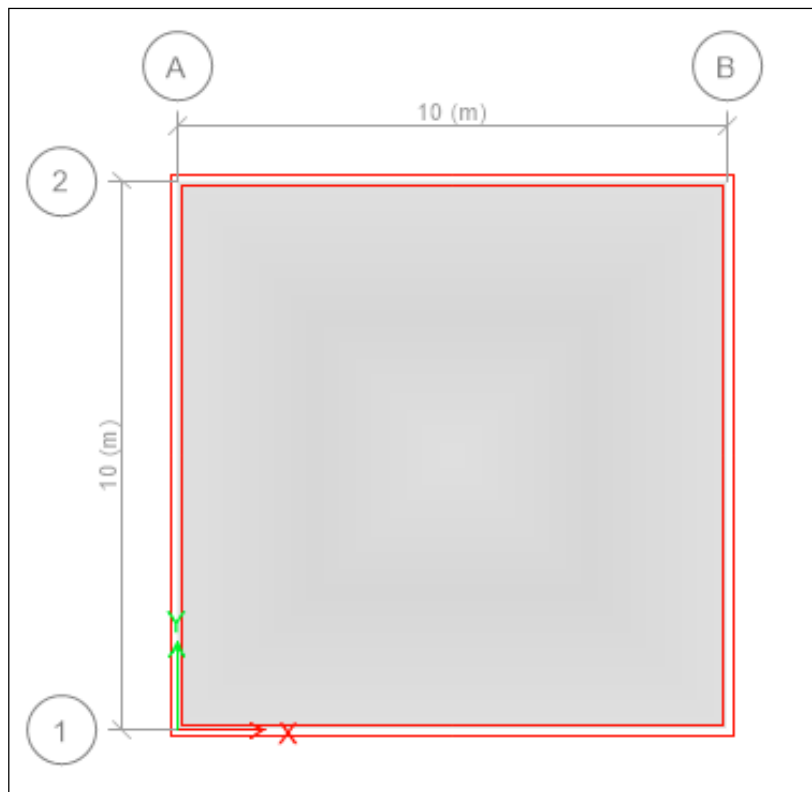


Figura 22. Vista en planta de un núcleo de muros de concreto

3.2.1. Método de modelado de muros con elementos de tipo barra

En esta técnica existen dos metodologías para definir las secciones transversales de los elementos, una de estas implica definir las secciones transversales de los elementos con forma rectangular mientras que la otra las define con forma irregular. Pese a esto el procedimiento general que siguen ambas metodologías es el mismo.

- **Modelado de muros con elementos tipo barra de sección transversal rectangular**

Para ejecutar esta metodología se requieren definir elementos tipo barra que posean las mismas características geométricas y mecánicas de cada muro en particular, en este caso las propiedades de cada muro se concentran a lo largo de un único elemento longitudinal. En la Figura 23 se muestran las propiedades asignadas al elemento tipo barra utilizado para modelar los muros del núcleo, como es posible apreciar las dimensiones definidas para este elemento corresponden al ancho y espesor del muro visto en planta.

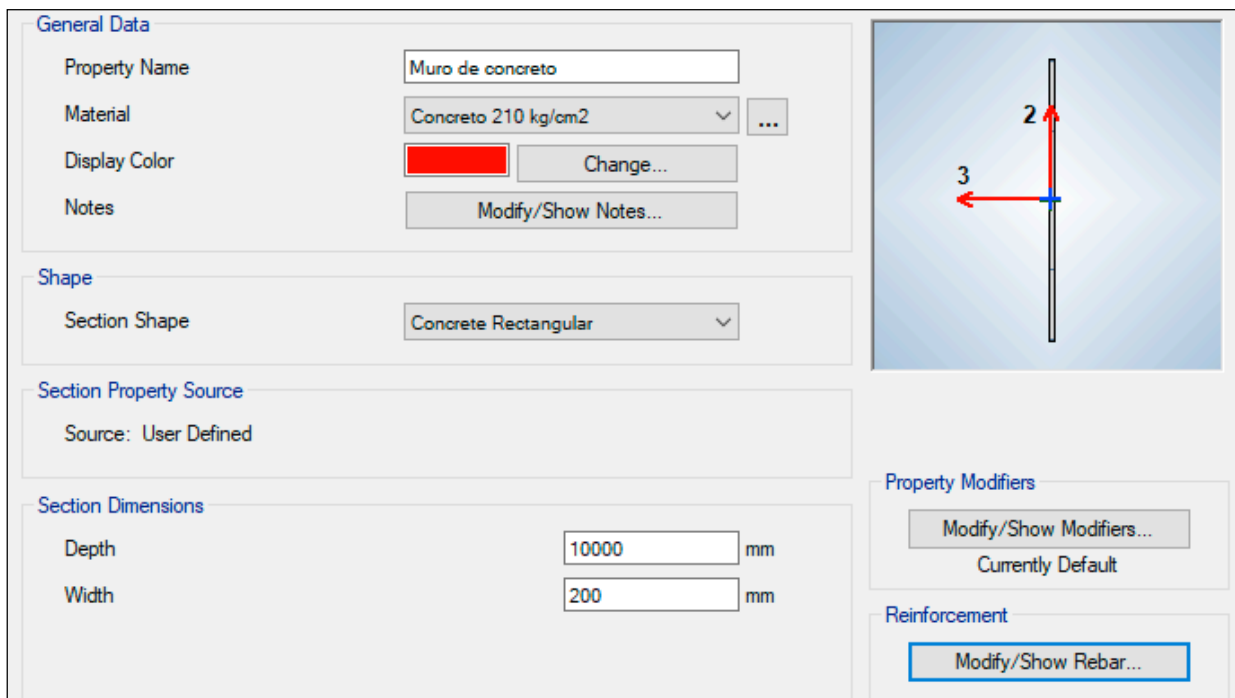


Figura 23. Propiedades del elemento de barra utilizado como muro introducidos en el programa ETABS ®

Una vez definidas estas secciones, se procede a dibujar dichos elementos en los espacios correspondientes, para ello se definen ejes auxiliares que se ubiquen sobre los centros geométricos de cada muro. En esta técnica debe tenerse el cuidado especial de orientar los ejes de cada sección en la dirección correcta, lo cual se puede comprobar si se obtiene una vista extruida del modelo, tal como se observa en la Figura 24, en la cual primero se muestra una vista general del modelo (a) y seguidamente la vista extruida (b).

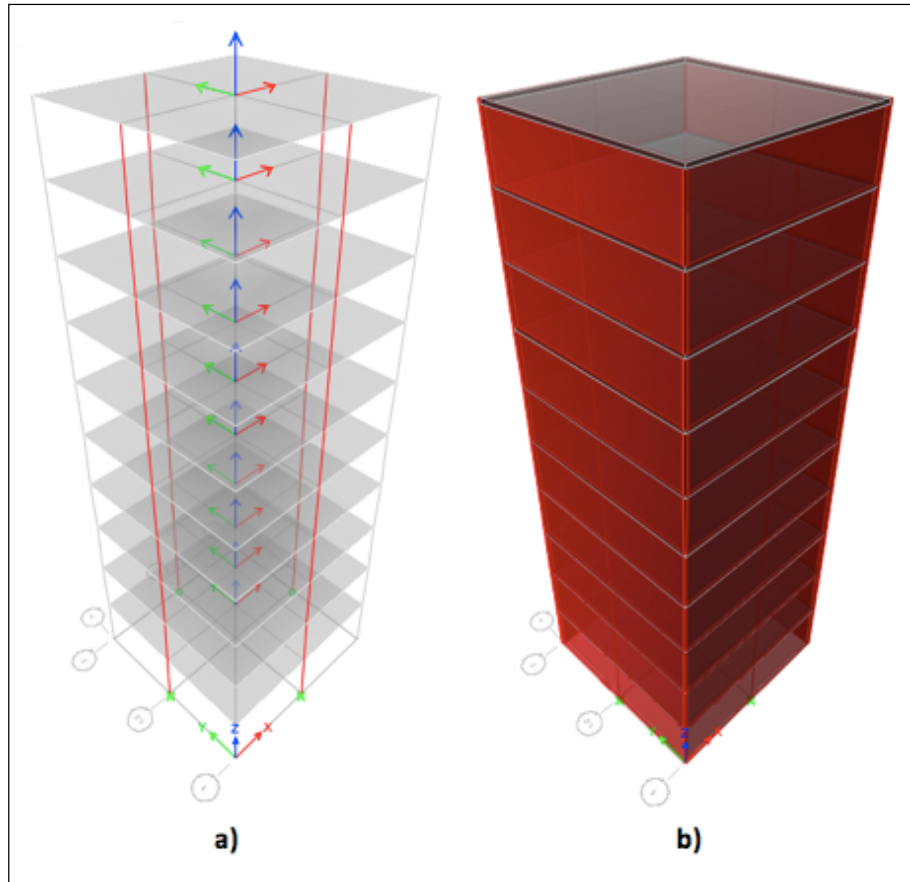


Figura 24. a) Vista general y b) Vista extruida de núcleo modelado con elementos de tipo barra de sección transversal regular

Finalmente, el último paso consiste en introducir al modelo elementos de tipo barra que se conocen como "brazos rígidos" (ver Figura 24), los cuales consisten en vigas "infinitamente" rígidas que permiten modelar una unión apropiada entre muro-muro y muro-entrepiso. Para este elemento en particular se debe introducir un modificador de la inercia a flexión dentro de sus propiedades, este factor le confiere el carácter de rigidez "infinita". Dicho valor se puede

tomar como la razón de inercias entre el muro con mayor inercia del modelo y la inercia definida para el brazo rígido multiplicada por un factor de 10000. Por ejemplo, en el caso del modelo la sección transversal del brazo rígido se definió con dimensiones de 50 cm x 20 cm, por lo cual la inercia a flexión de este elemento corresponde a:

$$I = \frac{h^3 \cdot L_w}{12} = \frac{(50 \text{ cm})^3 \cdot 20 \text{ cm}}{12} = 208\,333 \text{ cm}^4$$

Por otro lado, debido a que cada muro es geoméricamente igual, se tiene que la mayor inercia en el modelo corresponde a:

$$I = \frac{h^3 \cdot L_w}{12} = \frac{(1000 \text{ cm})^3 \cdot 20 \text{ cm}}{12} = 1,67 \times 10^{12} \text{ cm}^4$$

De esta forma se obtiene el modificador de inercia para el brazo rígido a partir de la siguiente razón:

$$a = \frac{I_{\text{mayor}}}{I_{\text{Brazo}}} \cdot 10000 = \frac{1,67 \times 10^{12} \text{ cm}^4}{208\,333 \text{ cm}^4} \cdot 10000 = 8 \times 10^{10} \quad (15)$$

Es necesario recordar que el brazo rígido solamente emula la unión que existe entre los distintos componentes de la estructura, por lo que debe modelarse como un elemento sin masa ni peso, finalmente al resto de modificadores se les asigna un valor de 10000. En la Figura 25 puede observarse la asignación de estos modificadores en una ventana del programa *ETABS*, mientras que en la Figura 26 se muestra la incorporación de estos elementos al modelo.

Property/Stiffness Modifiers for Analysis	
Cross-section (axial) Area	10000
Shear Area in 2 direction	10000
Shear Area in 3 direction	10000
Torsional Constant	10000
Moment of Inertia about 2 axis	10000
Moment of Inertia about 3 axis	8E+10
Mass	0
Weight	0

Figura 25. Modificadores asignados al brazo rígido

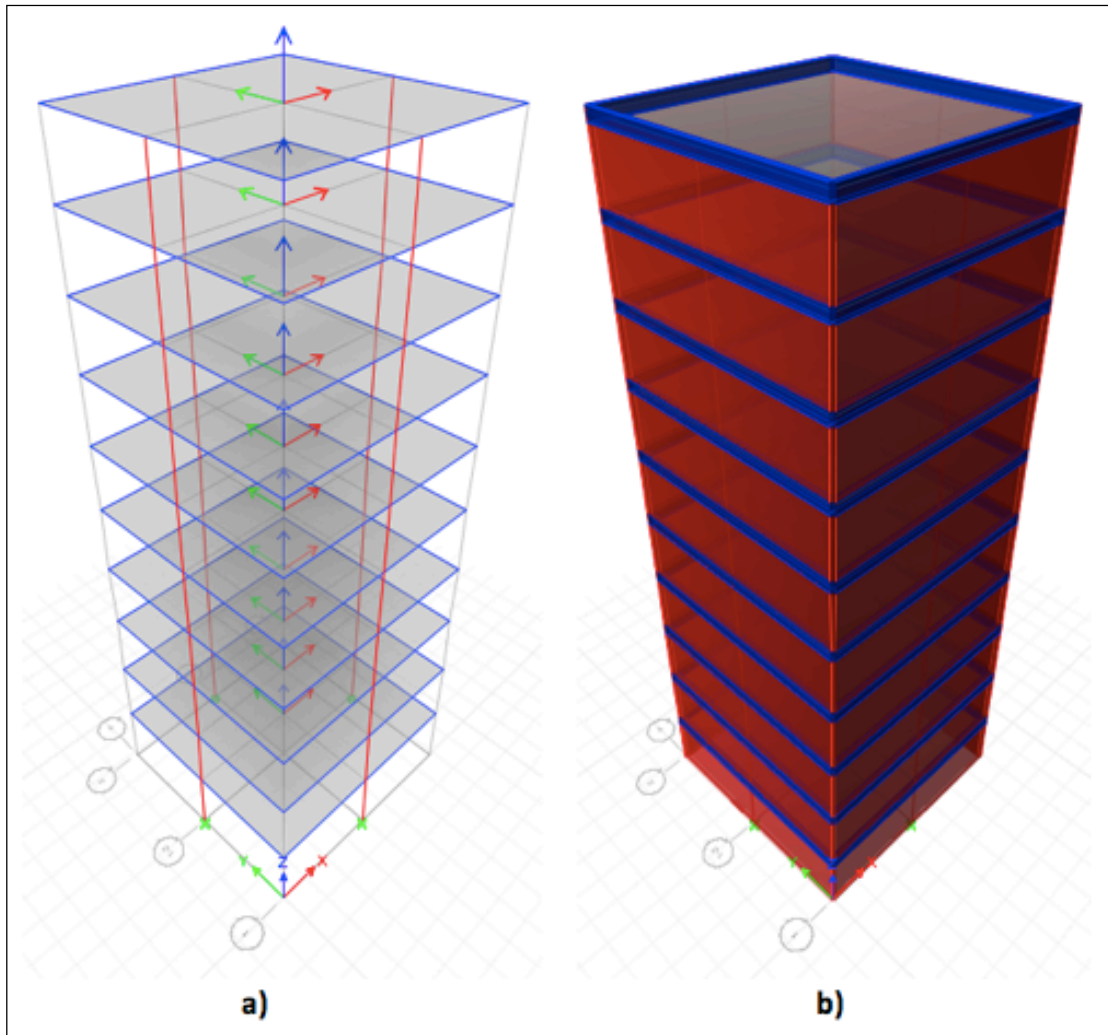


Figura 26. a) Vista general y b) Vista extruida de núcleo modelado con elementos tipo barra con sección transversal regular y con brazos infinitamente rígidos incorporados (en azul)

- **Modelado de muros con elementos tipo barra de sección transversal irregular**

Como ya se mencionó, el modelado de muros a través de elementos tipo barra también permite la definición de estos elementos con secciones transversales irregulares, lo cual quiere decir que en este caso se busca modelar un conjunto de muros adyacentes entre sí a través de un único elemento que siga la forma de dicho conjunto, por lo tanto se definen elementos con secciones transversales en forma de "L", "T" o incluso geometrías más irregulares, tales como las que se observarán posteriormente para los edificios estudiados.

El procedimiento general seguido para realizar el modelado es el mismo que cuando se utilizan elementos tipo barra con secciones transversales de forma regular, la diferencia radica en que en este caso se utiliza el módulo del programa *ETABS* denominado "section designer", el cual permite dibujar diferentes secciones transversales para elementos tipo barra. La interfaz de este módulo se observa en la Figura 27, como se puede apreciar, el programa provee herramientas para definir distintas geometrías y dimensiones. Para este ejemplo se procede a dibujar el núcleo de muros de concreto a través de un único elemento con sección transversal en forma "cajón", y dimensiones de 10 m x 10 m y espesor de 20 cm, tal como se observa en la Figura 27.

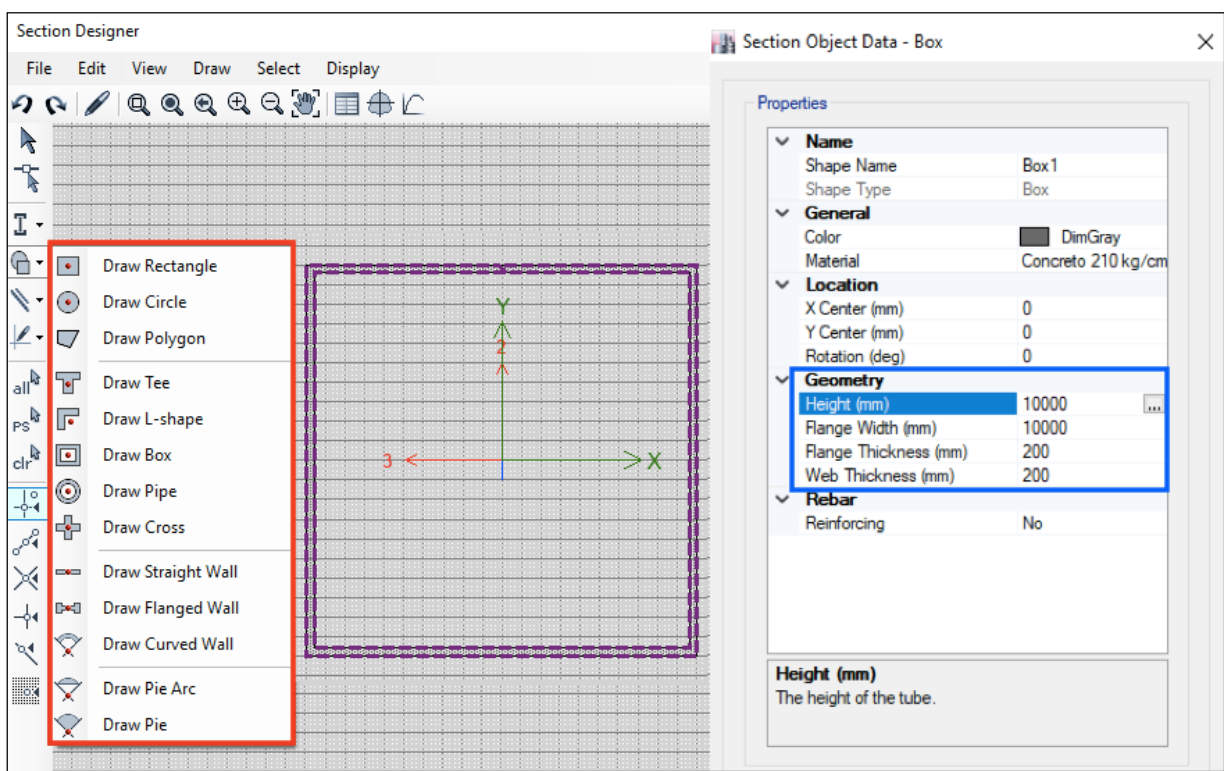


Figura 27. Definición de elemento tipo barra con sección transversal de forma irregular

Seguidamente se procede a ubicar el elemento en el modelo, el cual se puede insertar a partir del centroide de la sección o de algún punto en particular, para este caso se considera conveniente insertarlo a partir de su centroide, sin embargo como se verá más adelante, en secciones con geometrías más complejas y asimétricas resulta más práctico insertar estos elementos a partir de un "extremo" o "esquina", dado que ubicar su centroide en planta

requiere de más trabajo. Finalmente se completa el modelo con la inclusión de los brazos rígidos (ver Figura 28).

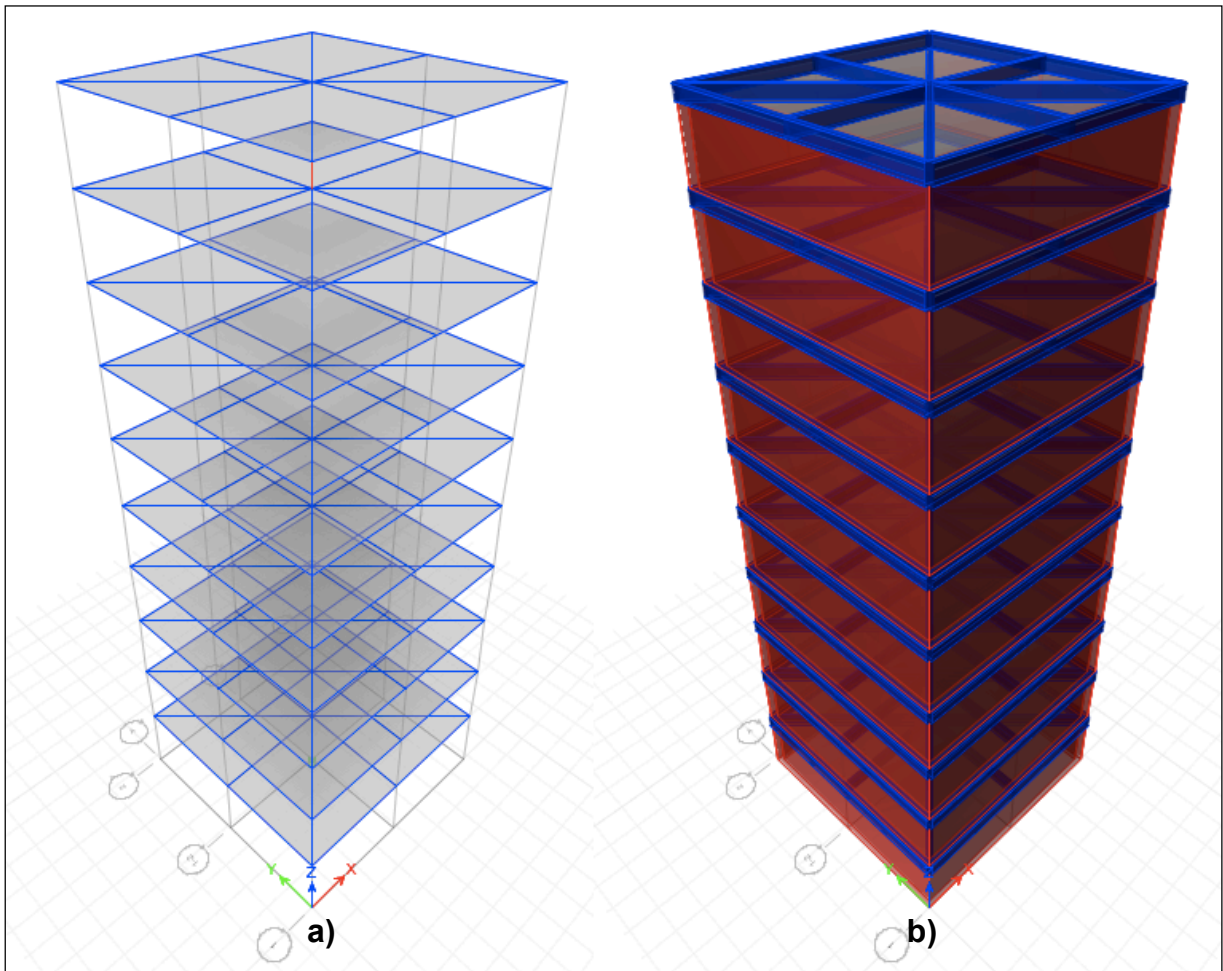
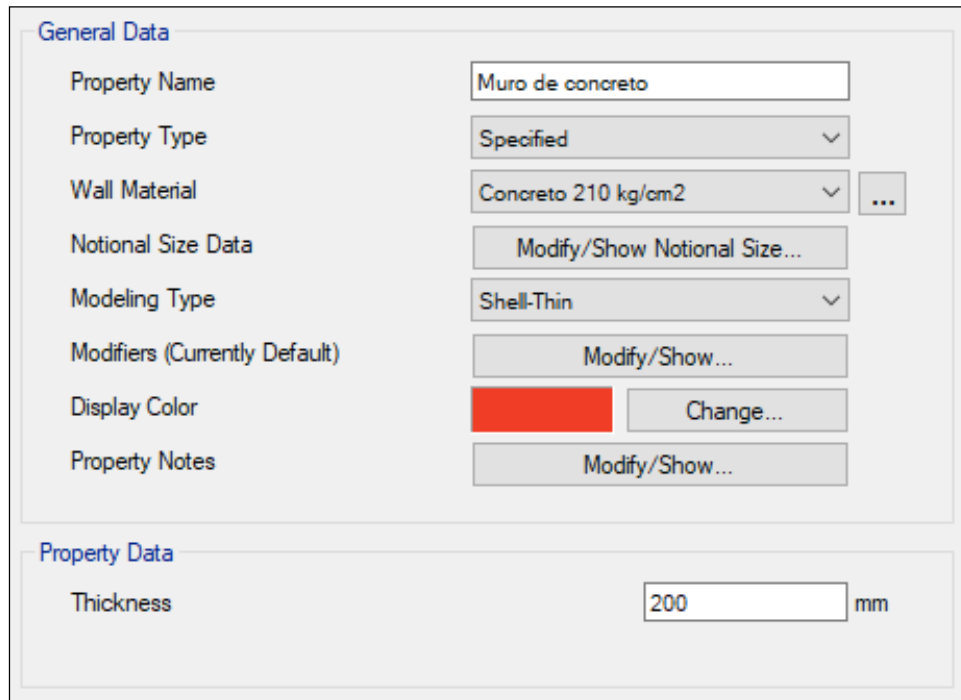


Figura 28. a) Vista general y b) Vista extruida de núcleo modelado con elementos tipo barra con sección transversal irregular y con brazos infinitamente rígidos incorporados (en azul)

3.2.2. Método de modelado de muros con elementos de tipo área

Un paso inicial en la modelación de muros a través de esta metodología consiste en definir una sección de tipo área que posea el espesor y las propiedades mecánicas deseadas en el muro, tal como se observa en la Figura 29, donde además se aprecia la selección de la opción de cascarón delgado o "shell thin".



General Data	
Property Name	Muro de concreto
Property Type	Specified
Wall Material	Concreto 210 kg/cm2
Notional Size Data	Modify/Show Notional Size...
Modeling Type	Shell-Thin
Modifiers (Currently Default)	Modify/Show...
Display Color	Change...
Property Notes	Modify/Show...

Property Data	
Thickness	200 mm

Figura 29. Definición de la sección de muro "Muro de concreto"

Una vez definida la sección y con ayuda de la herramienta de dibujo del programa se procede a asignar los muros en los ejes estructurales correspondientes, resultado que se observa en la secuencia de la Figura 30, en donde primero se observa definido uno de los muros que corresponde al primer nivel (a), seguidamente se completa este nivel con el resto de muros (b) y finalmente se replica este resultado en los niveles superiores.

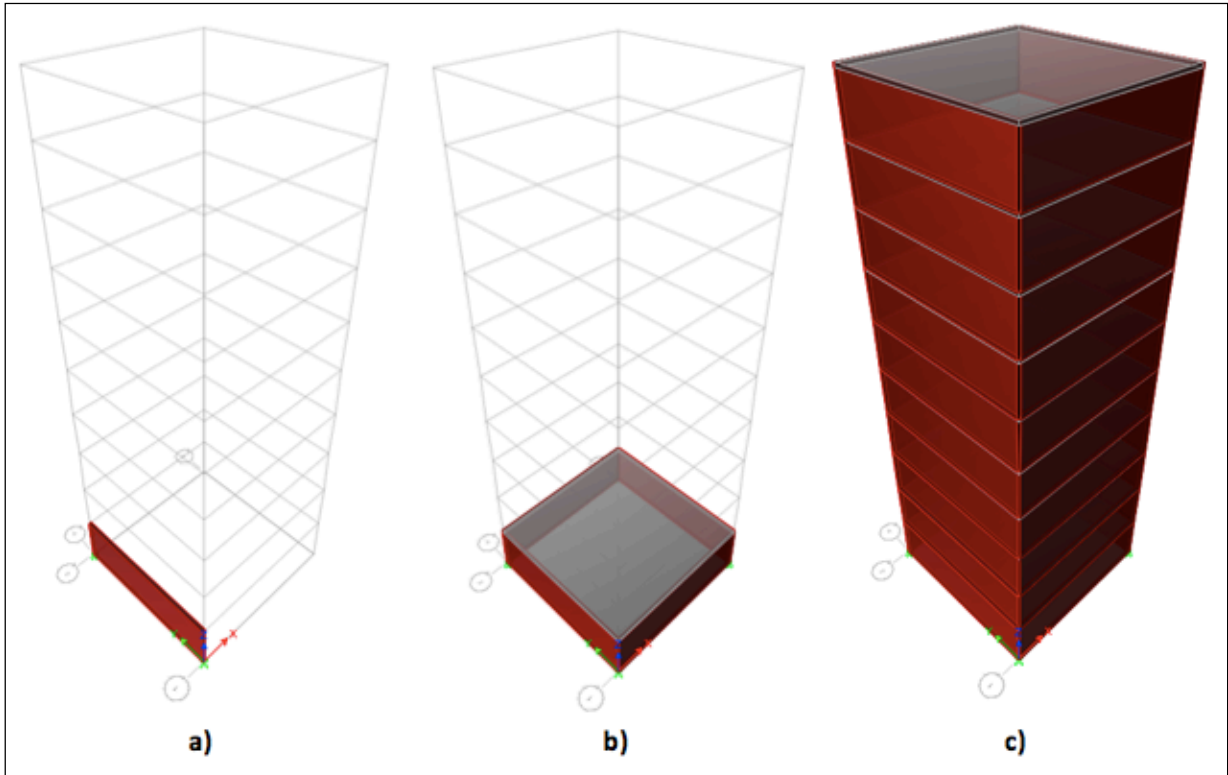


Figura 30. Secuencia de modelado de muros con elementos de tipo área

En esta técnica de modelado la unión entre cada muro se encuentra definida a través de los nudos enmarcados con un círculo (ver Figura 31), sin embargo este vínculo puede afinarse una vez realizada la discretización de las secciones, lo que establecería nudos intermedios entre los creados por defecto (ver Figura 32). Es importante recalcar este aspecto debido a que en la metodología de modelado de muros a través de elementos de barra, este vínculo no existe inicialmente, por lo que se deben recurrir a elementos adicionales que permitan modelar adecuadamente las uniones entre cada muro.

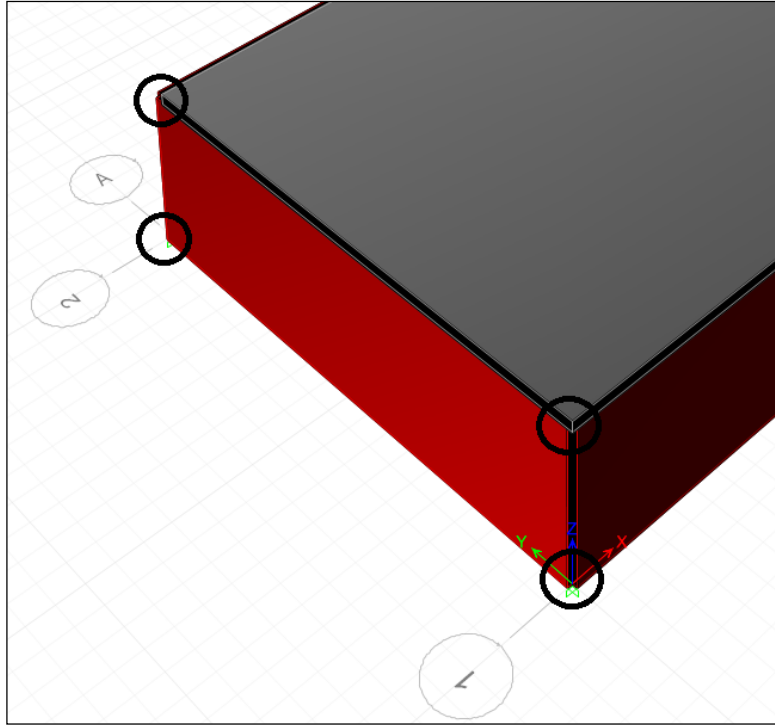


Figura 31. Nudos de unión entre muros sin discretizar

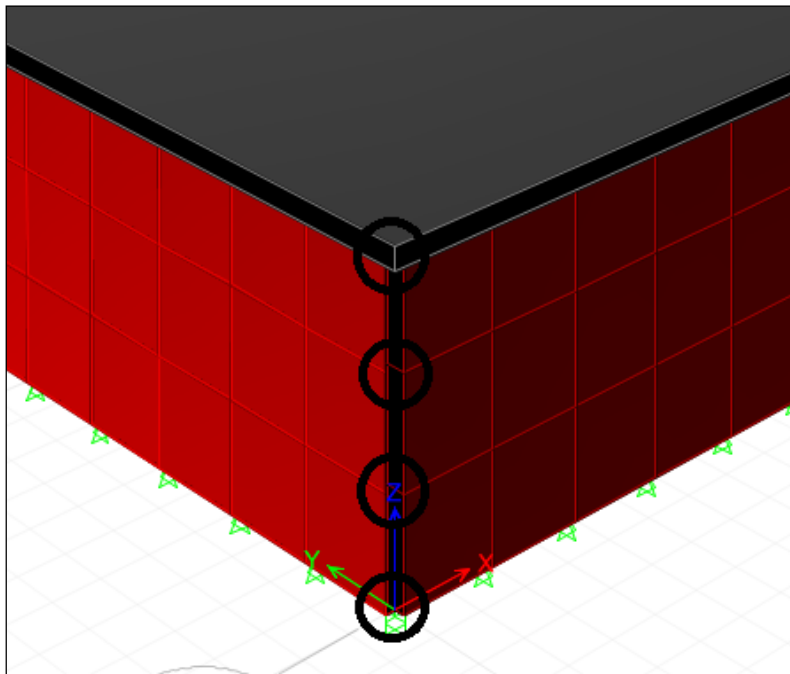


Figura 32. Nudos de unión entre muros discretizados

3.2.3. Análisis comparativo para los modelos del núcleo de concreto

A continuación se muestran las respuestas estructurales (masa participativa, período y cortante basal) obtenidas a través de cada una de la técnicas utilizadas. Como se puede observar en los Cuadros 4, 5 y 6, las diferencias porcentuales entre ambas respuestas son poco significativas. El objetivo de esta investigación consta de comparar estas técnicas en estructuras más complejas y para diferentes cantidades de niveles. La diferencia porcentual se calcula con base en la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Diferencia} = \frac{X_{\text{Modelo Área}} - X_{\text{Modelo Barra}}}{X_{\text{Modelo Área}}} \cdot 100\% \quad (16)$$

Dónde:

- $X_{\text{Modelo Área}}, X_{\text{Modelo Barra}}$: Es cualquier parámetro de respuesta estructural obtenido por el modelo construido a través de elementos tipo área y tipo barra respectivamente.

Cuadro 4. Diferencias en masas participativas para los modelos del núcleo de concreto

Masa participativa del primer modo de oscilación (%)			
Modo	Modelo		% Respecto a Modelo: Área
	Área	Barra rectangular	
X	70,34%	71,57%	1,72%
Y	70,34%	71,57%	1,72%

Cuadro 5. Diferencias en períodos para los modelos del núcleo de concreto

Valor del período principal de oscilación (s)			
Modo	Modelo		% Respecto a Modelo: Área
	Área	Barra rectangular	
X	0,251	0,256	1,95%
Y	0,251	0,256	1,95%

Cuadro 6. Diferencias en reacciones de la base para los modelos del núcleo de concreto

Modelo	Sismo en X		Sismo en Y	
	Fx (ton)	My (ton-m)	Fy (ton)	Mx (ton-m)
Área	839,59	17752,23	839,59	17752,23
Barra rectangular	844,26	17817,42	844,26	17817,42
% Respecto a Modelo: Área	0,56%	0,37%	0,56%	0,37%

3.3. Modelos construidos

3.3.1. Edificios ficticios

Para este apartado se modelaron un total de seis estructuras con distribuciones de muros bastante simétricas, esto permitió facilitar la interpretación de resultados en esta primera etapa de la investigación. A continuación se muestra una vista en planta de cada una de estas distribuciones, cada una de estas se denominaron como Edificio A, B, C, D, E y F respectivamente. La cantidad de niveles utilizado en cada edificación se muestra en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Cantidad de niveles para cada modelo de edificio ficticio

Modelo	Cantidad de niveles
Edificio A	5
Edificio B	10
Edificio C	15
Edificio D	20
Edificio E	25
Edificio F	30

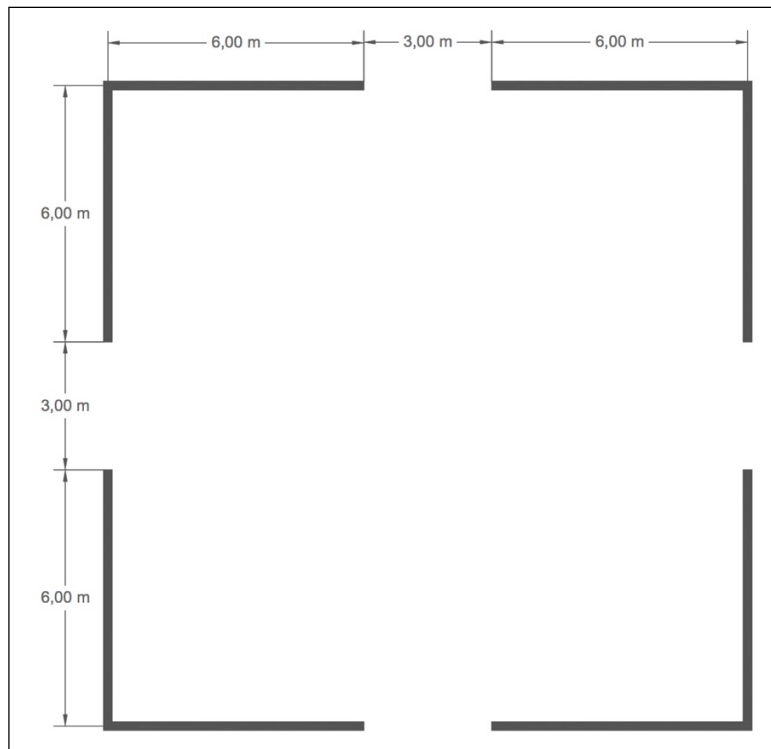


Figura 33. Vista en planta del Edificio A

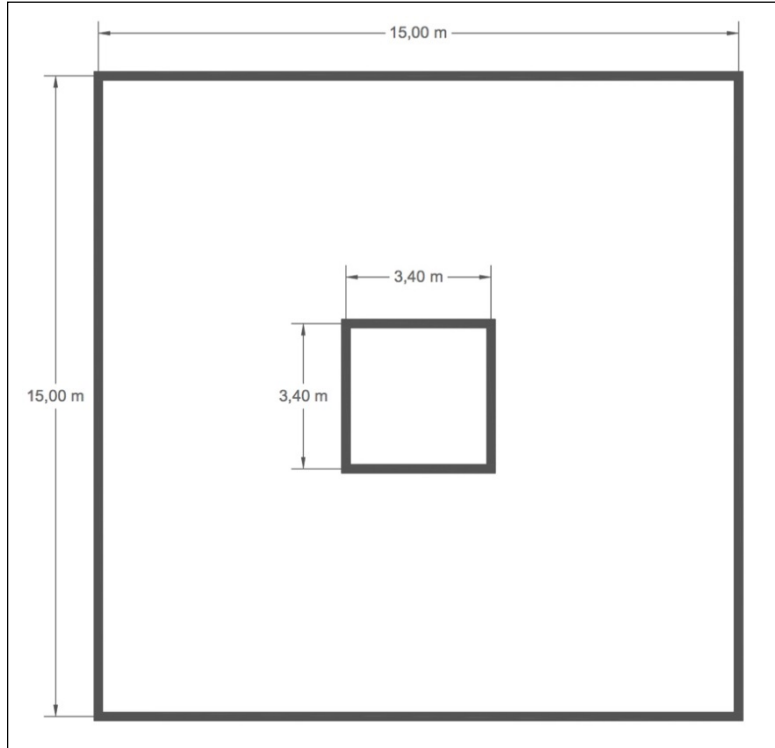


Figura 34. Vista en planta del Edificio B

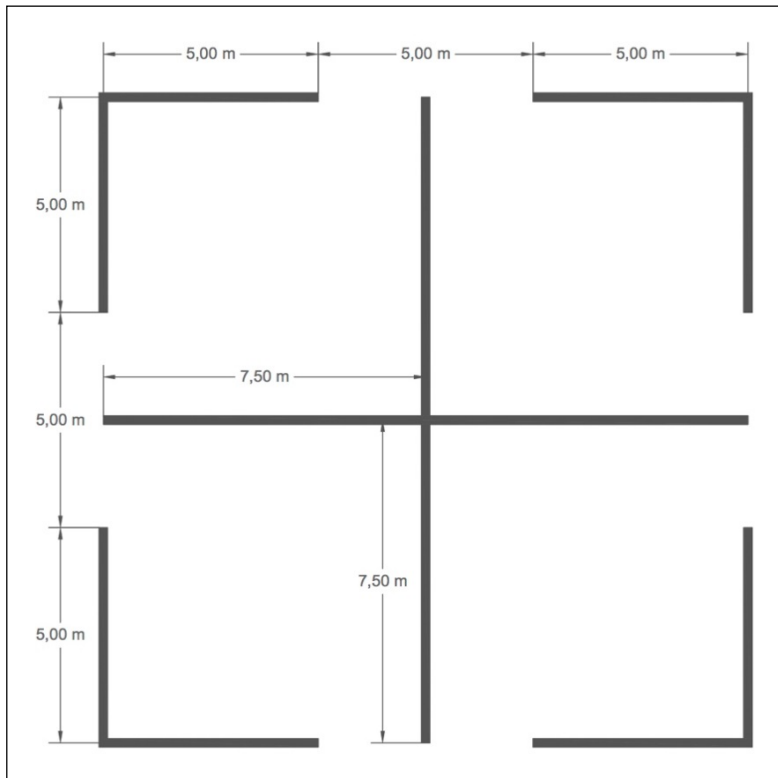


Figura 35. Vista en planta del Edificio C

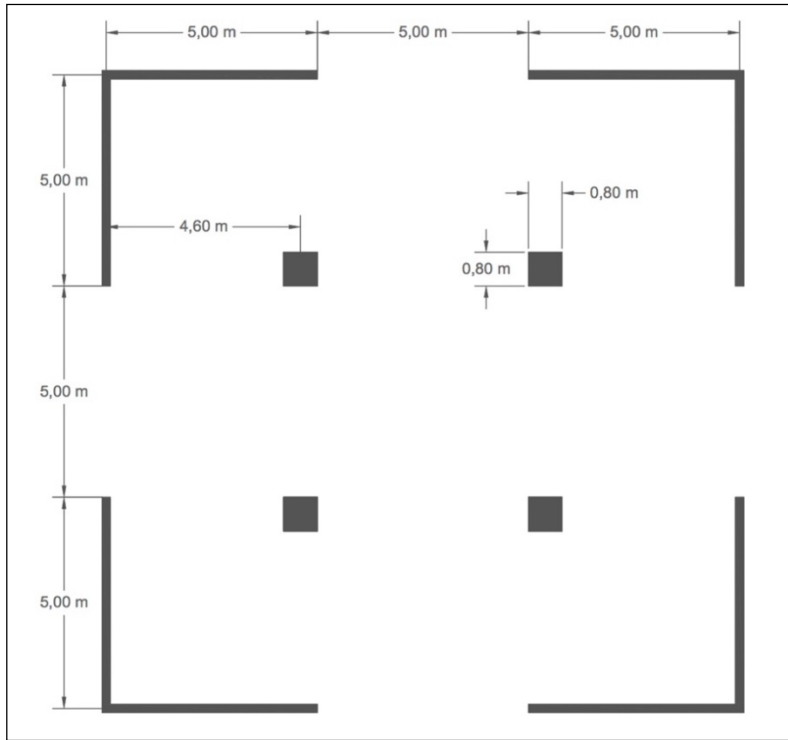


Figura 36. Vista en planta del Edificio D

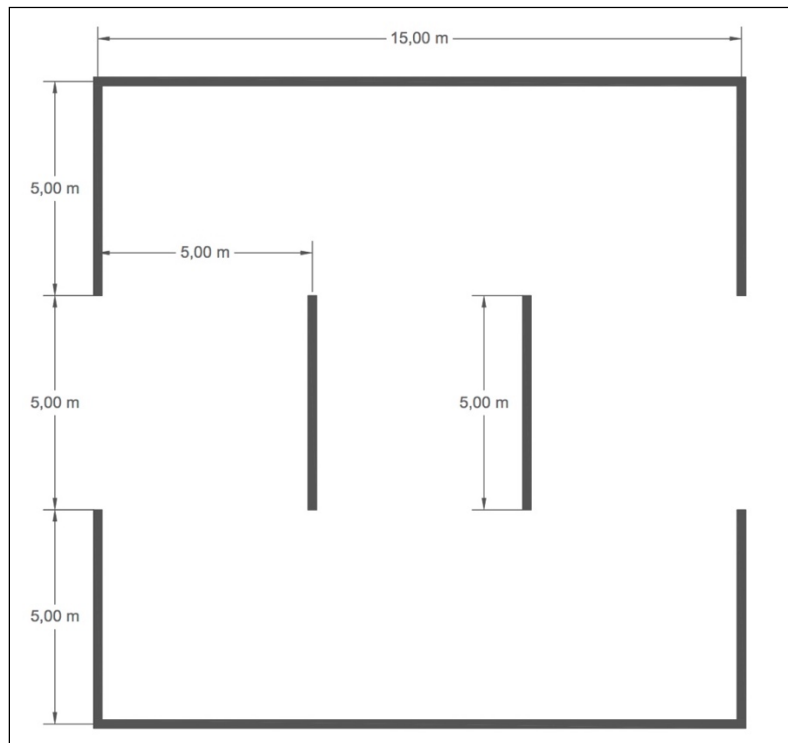


Figura 37. Vista en planta del Edificio E

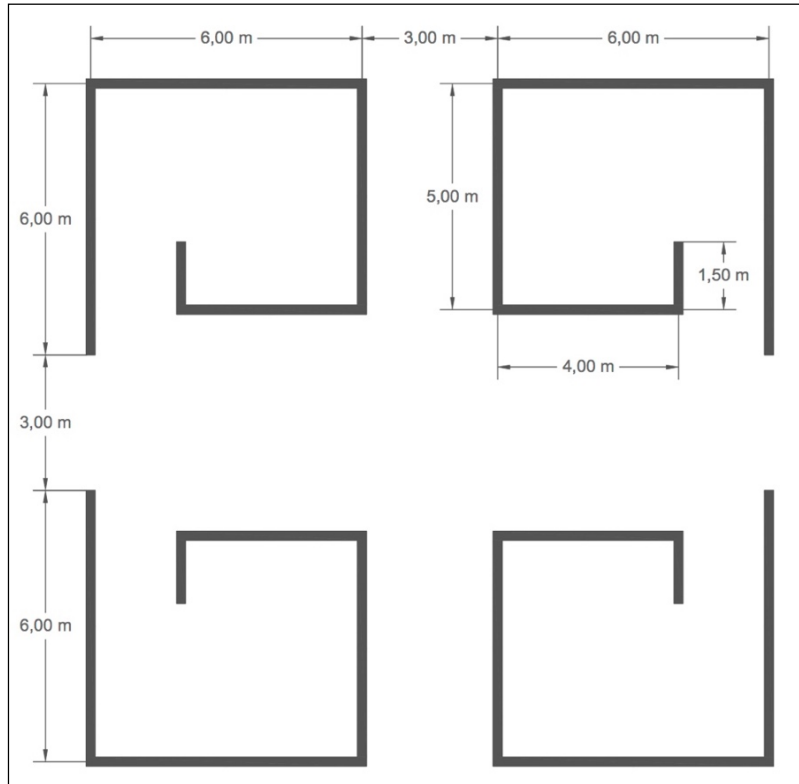


Figura 38. Vista en planta del Edificio F

Como ya se mencionó anteriormente, para cada una de estas distribuciones en planta se elaboraron tres modelos independientes utilizando las diferentes técnicas investigadas, por ejemplo, en la Figura 39 se muestra una vista general de los modelos elaborados para la primera distribución en planta (Edificio A). Cabe mencionar que la inserción de los elementos tipo barra de sección transversal irregular (modelo de la derecha) no se realizó a partir de los centroides de dichos elementos, sino a través de un "punto" que facilitara su ubicación en planta, para el caso mostrado en la Figura 39, dicha inserción se realizó a partir de la esquina de los muros en "L".

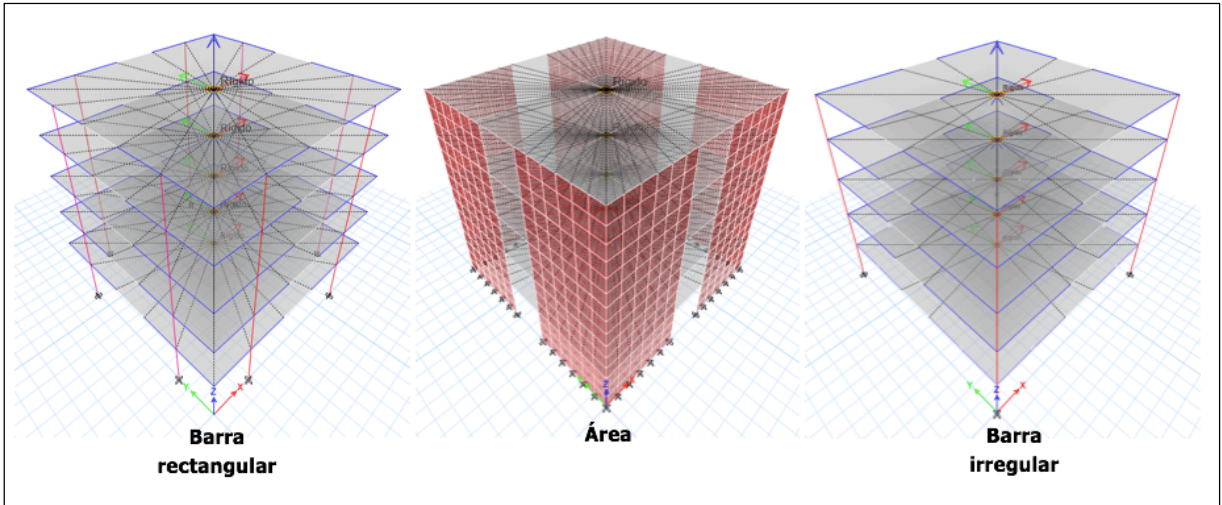


Figura 39. Vistas generales de las técnicas de modelado utilizadas (Edificio A)

Finalmente, en las Figuras 40, 41, 42, 43, 44 y 45 se incluyen vistas en planta para el caso donde se modelan los elementos tipo barra con secciones transversales de forma irregular, y en las cuales cada color representa un elemento diferente.

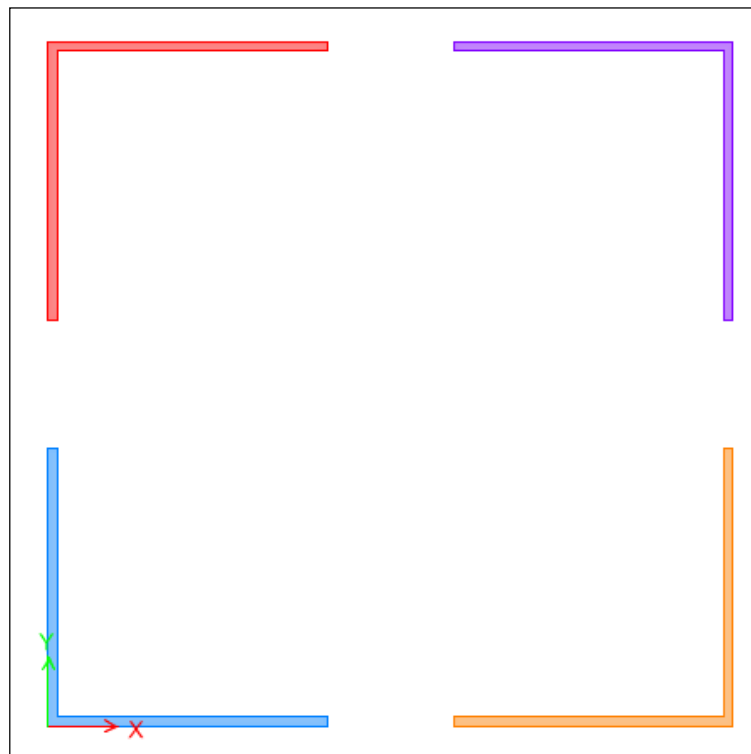


Figura 40. Vista en planta del Edificio A (elementos tipo barra de sección transversal irregular)

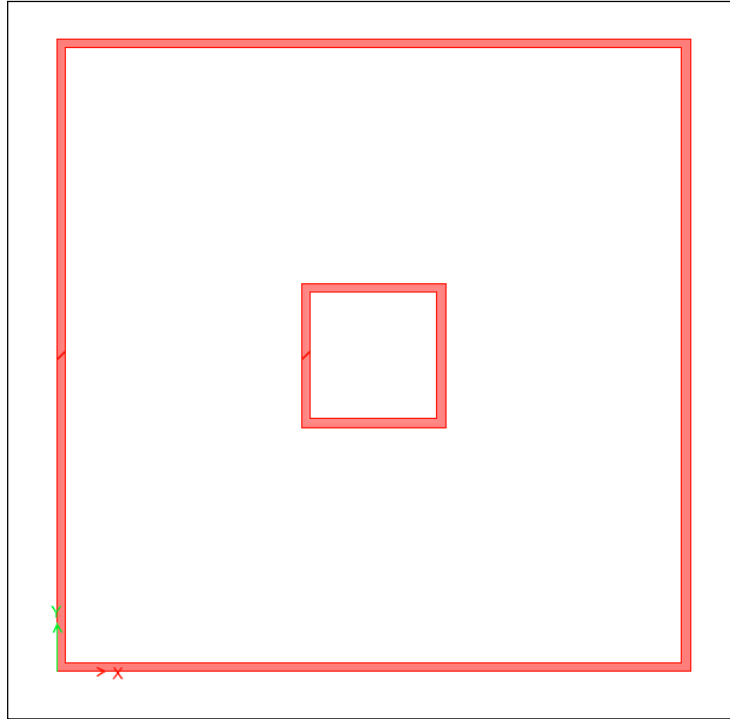


Figura 41. Vista en planta del Edificio B (elementos tipo barra de sección transversal irregular)

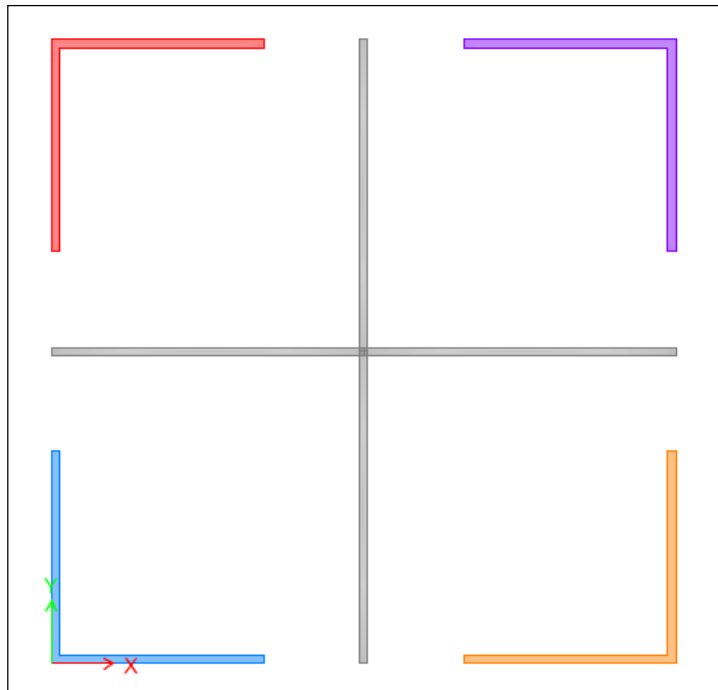


Figura 42. Vista en planta del Edificio C (elementos tipo barra de sección transversal irregular)

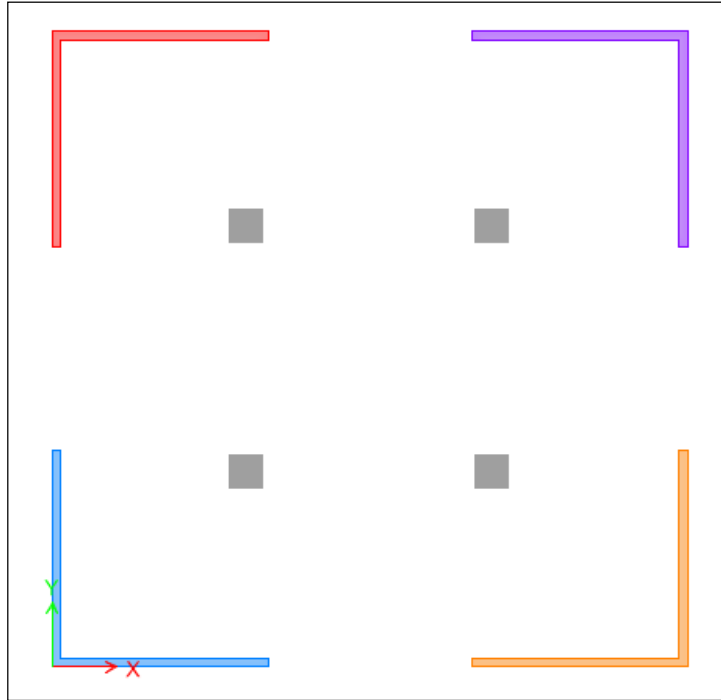


Figura 43. Vista en planta del Edificio D (elementos tipo barra de sección transversal irregular)

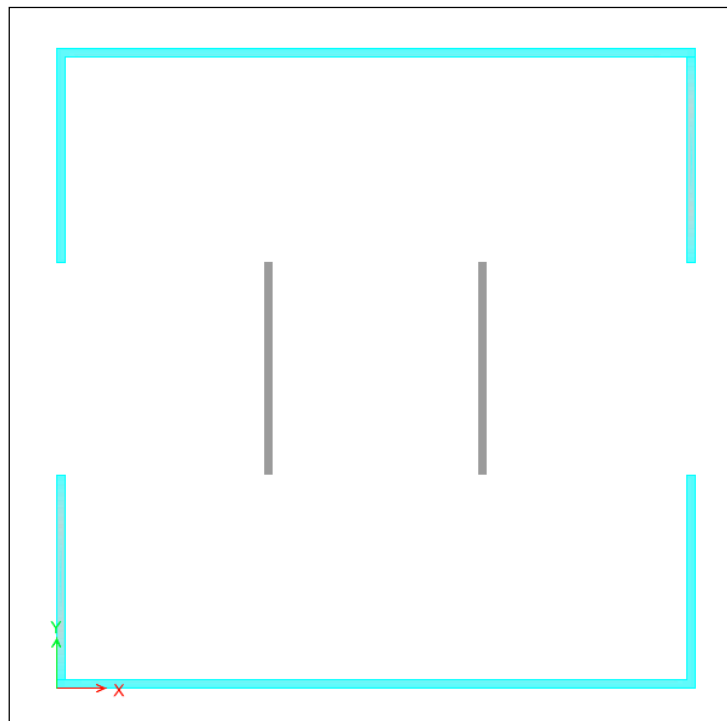


Figura 44. Vista en planta del Edificio E (elementos tipo barra de sección transversal irregular)

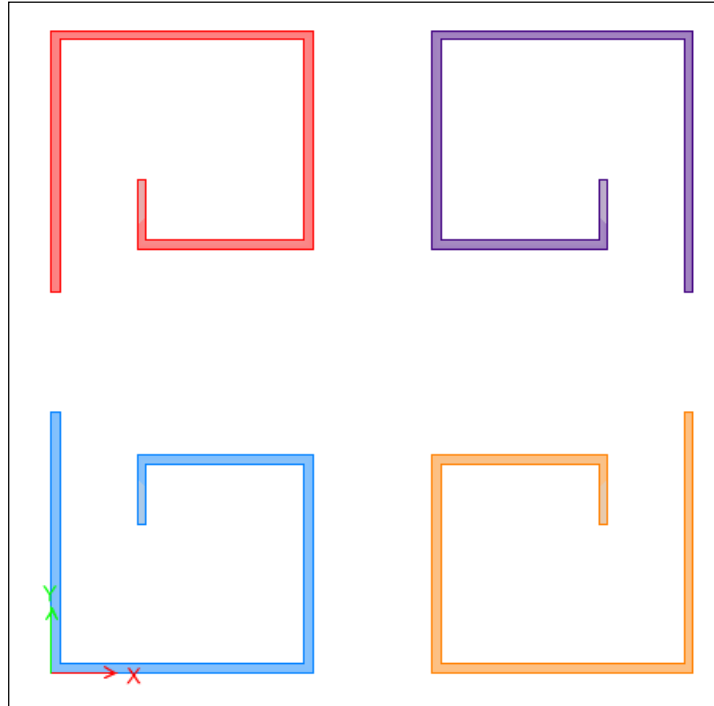


Figura 45. Vista en planta del Edificio F (elementos tipo barra de sección transversal irregular)

3.3.2. Edificios reales

Al igual que en la sección anterior, en este apartado se modelaron un total seis estructuras, en este caso las distribuciones en planta corresponden con edificios reales ubicados en el territorio nacional. Para continuar con la nomenclatura, estas plantas se nombraron como edificio G, H, I, J, K y L respectivamente. A continuación se muestran las vistas en planta de las distribuciones de muros de estas estructuras, mientras que el Cuadro 8 muestra la cantidad de niveles considerados en cada caso.

Cuadro 8. Cantidad de niveles para cada modelo de edificio real

Modelo	Cantidad de niveles
Edificio G	5
Edificio H	10
Edificio I	15
Edificio J	20
Edificio K	25
Edificio L	30

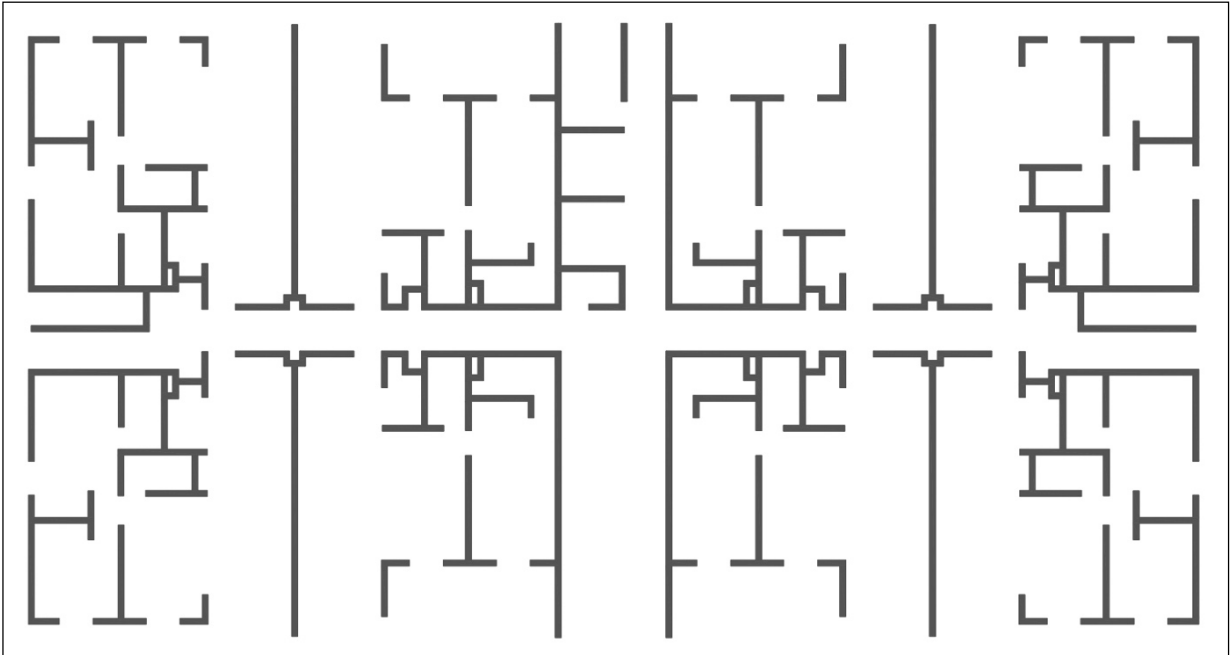


Figura 46. Vista en planta del Edificio G

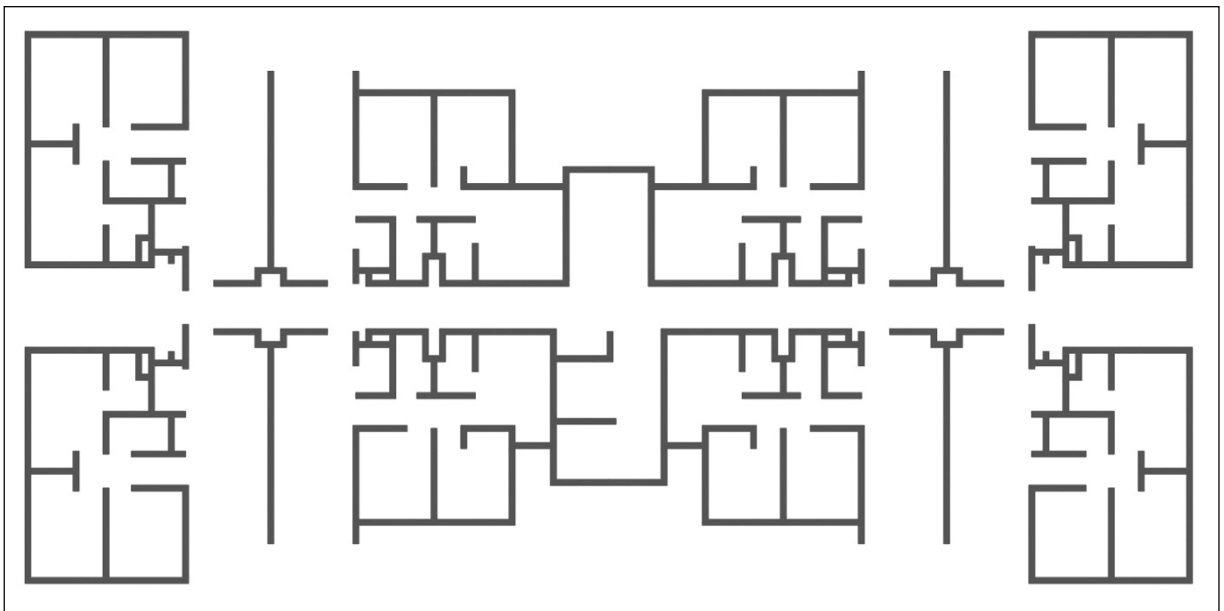


Figura 47. Vista en planta del Edificio H

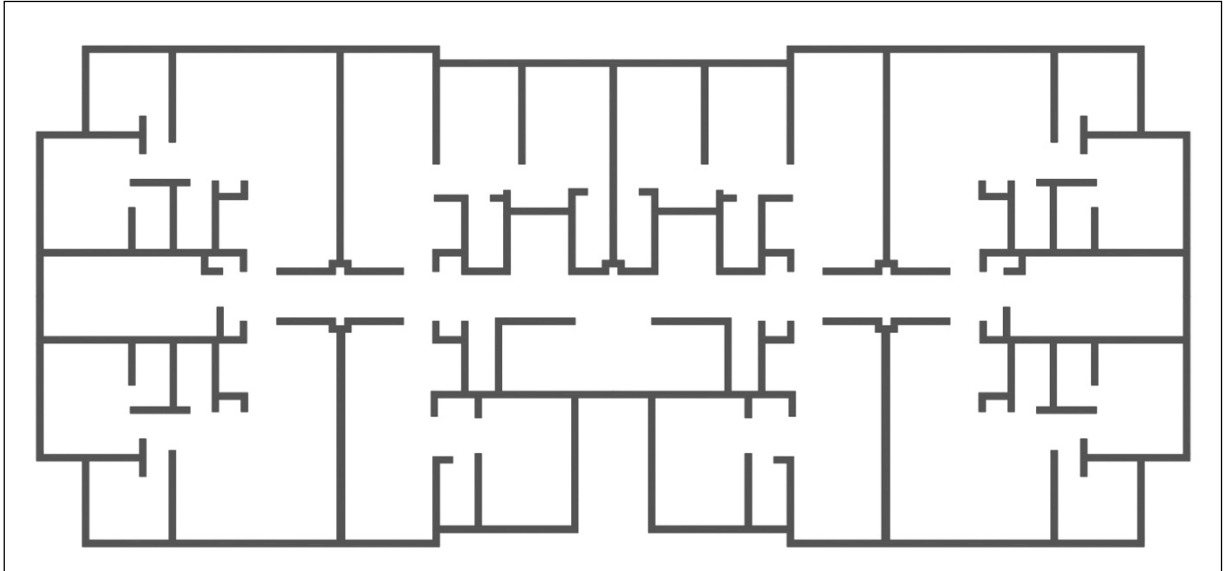


Figura 48. Vista en planta del Edificio I

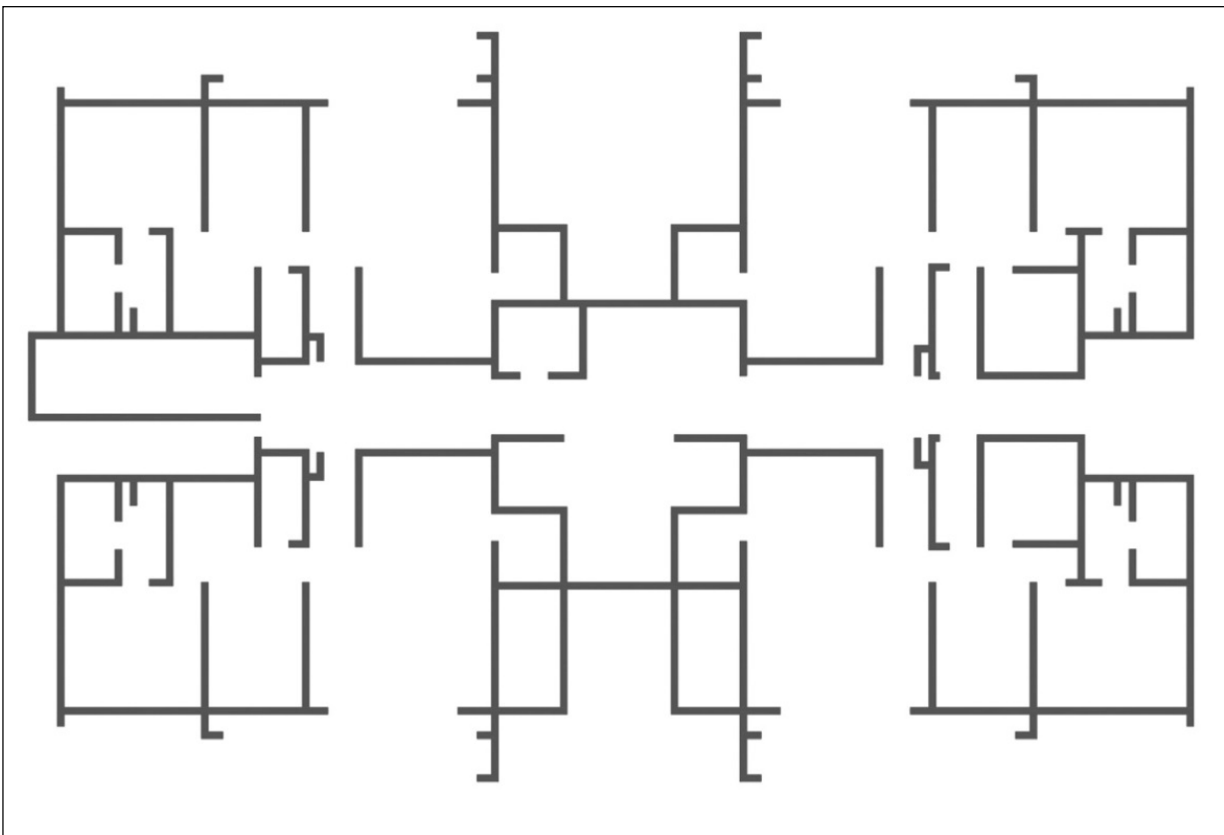


Figura 49. Vista en planta del Edificio J

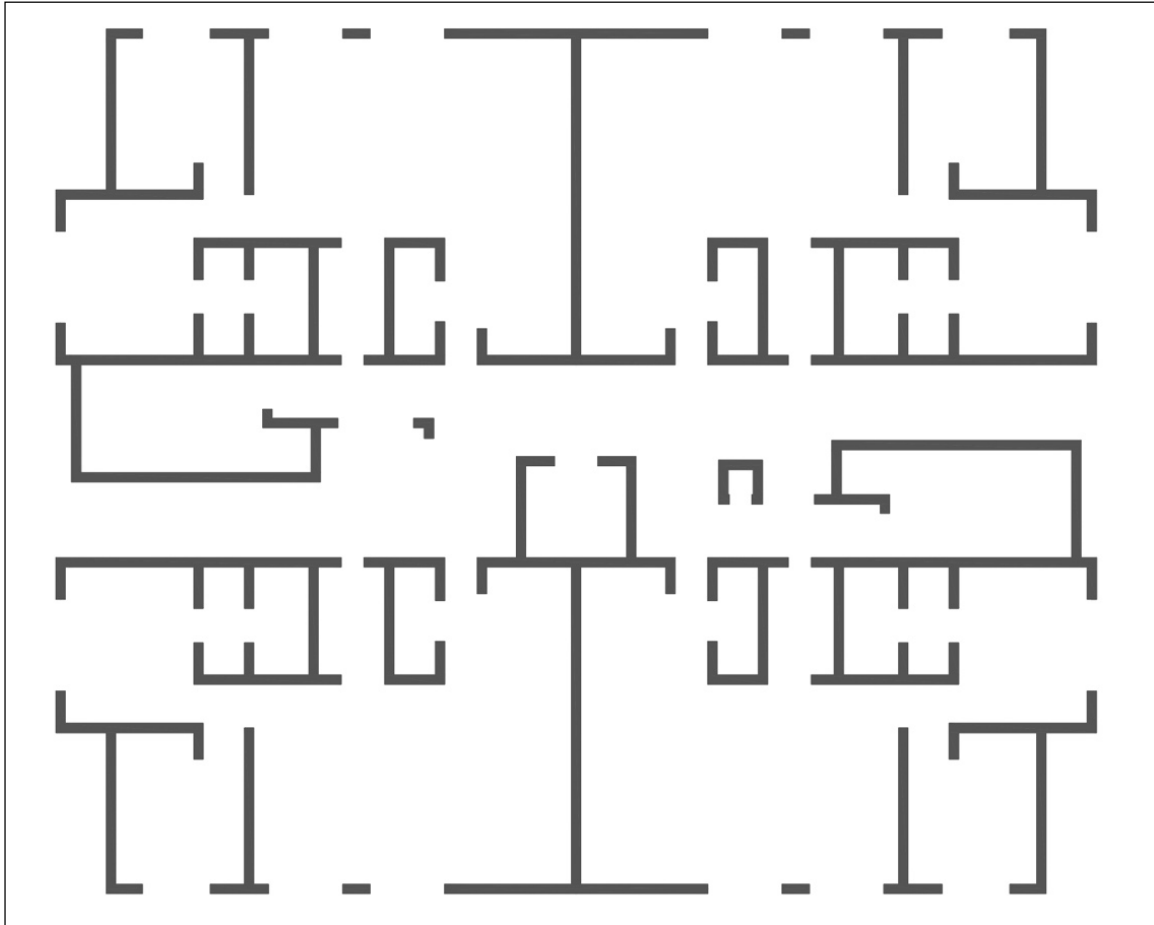


Figura 50. Vista en planta del Edificio K

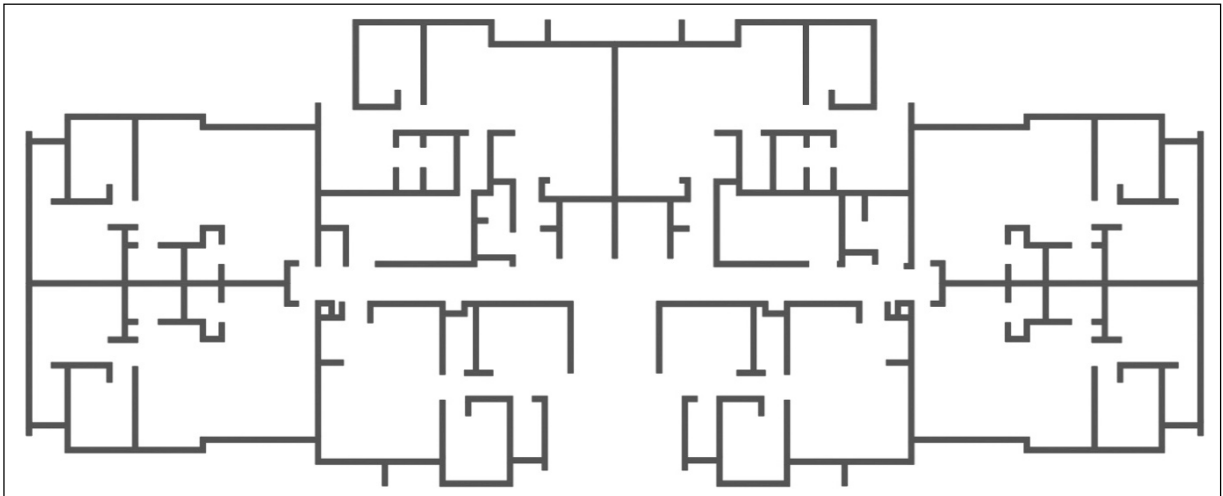


Figura 51. Vista en planta del Edificio L

La Figura 52 muestra una vista general de los modelos elaborados para la primera distribución en planta de los edificios reales (Edificio G). De igual forma se incluyen vistas en planta para el caso donde se modelan los elementos tipo barra con secciones transversales de forma irregular, y en las cuales cada color representa un elemento diferente (ver Figuras 53, 54, 55, 56, 57 y 58). Cabe mencionar que la complejidad de las secciones transversales de los elementos tipo barra en dicha metodología, se vio limitada por la capacidad de procesamiento del equipo de cómputo, por lo que en casos donde se pudo haber empleado un único elemento tipo barra, se utilizaron dos elementos, tal es el caso del Edificio H, en el cual los elementos de color verde y rosado (ver Figura 54) se podrían modelar a partir de un único elemento, sin embargo estos se dividieron. Finalmente, se recuerda que la inserción de los elementos tipo barra de sección transversal irregular (modelo de la derecha) no se realizó a partir de los centroides de dichos elementos sino a través de un "punto" que facilitara su ubicación en planta.

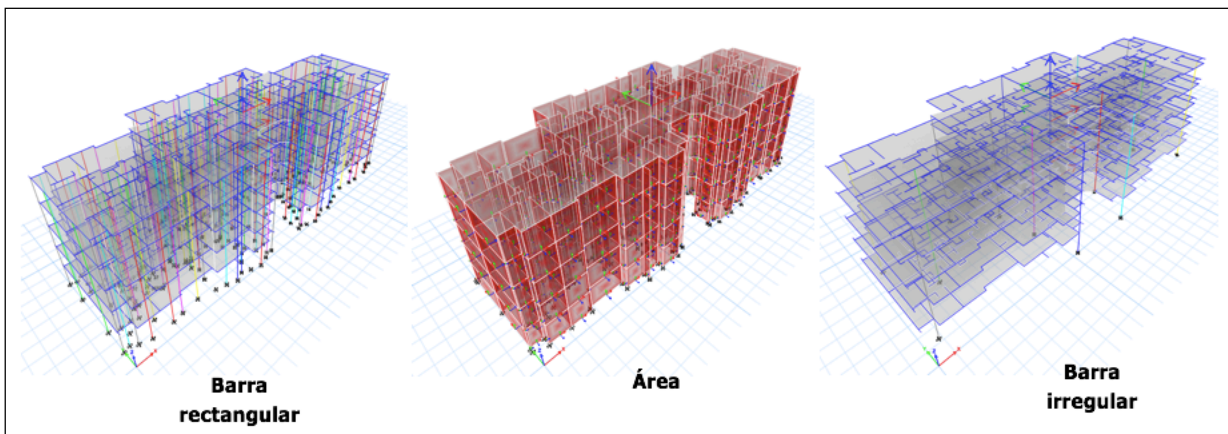


Figura 52. Vistas generales de las técnicas utilizadas (Edificio G)

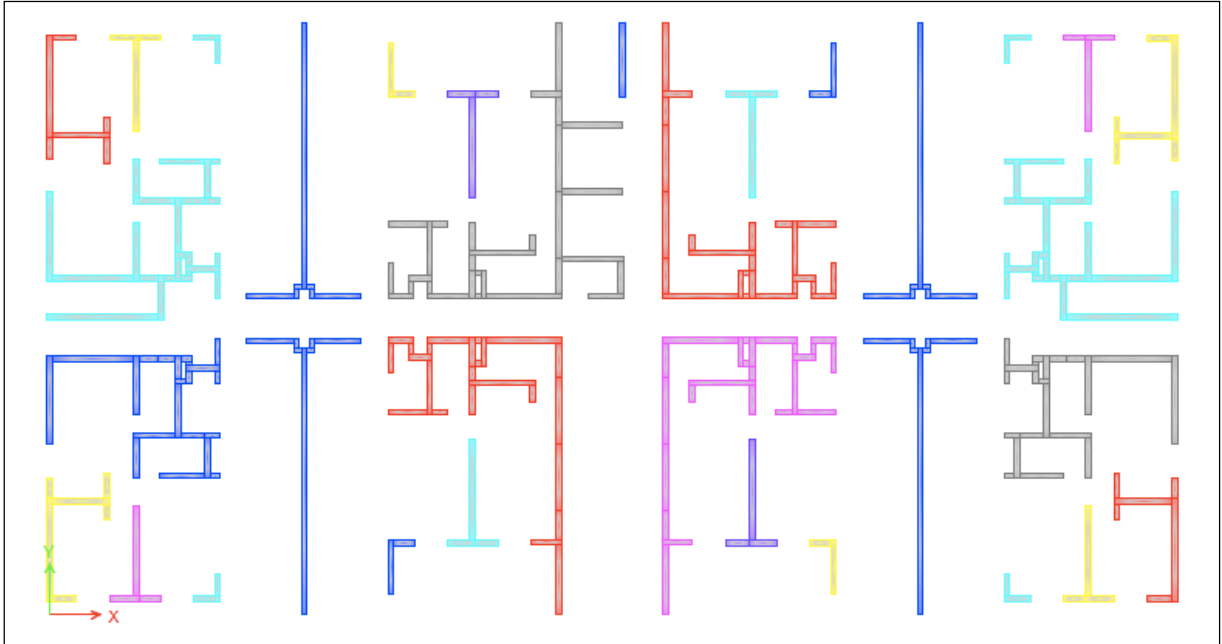


Figura 53. Vista en planta del Edificio G (elementos tipo barra de sección transversal irregular)

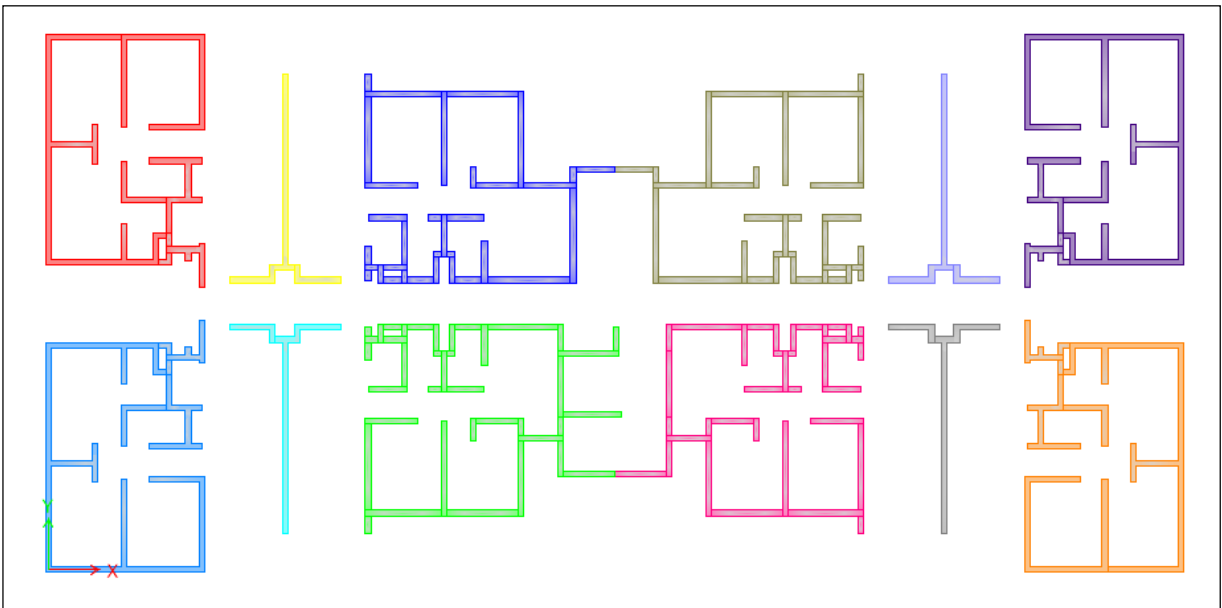


Figura 54. Vista en planta del Edificio H (elementos tipo barra de sección transversal irregular)

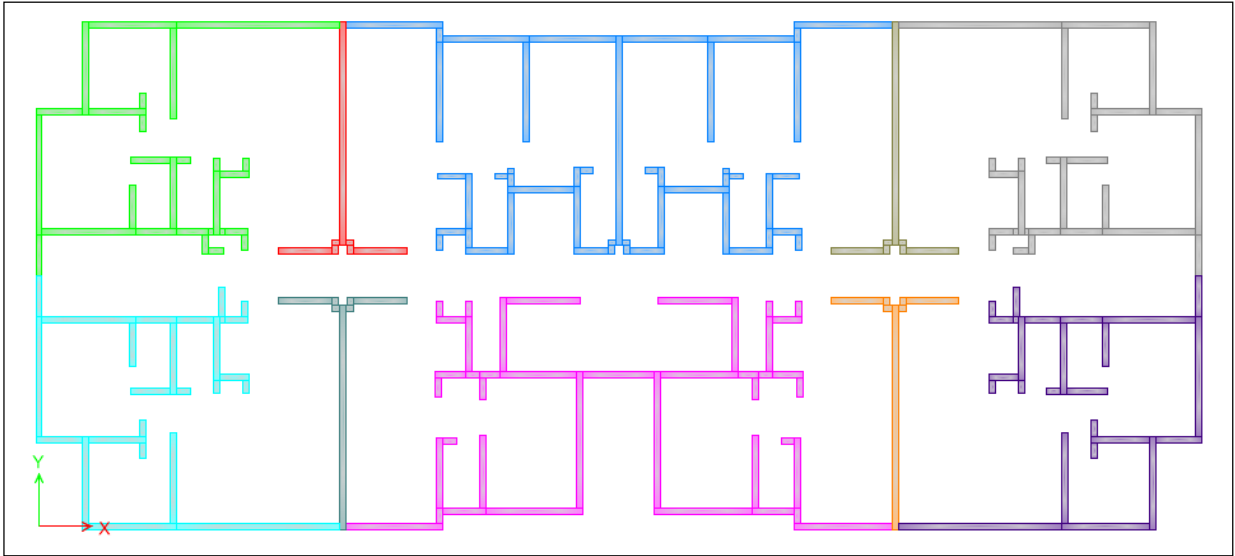


Figura 55. Vista en planta del Edificio I (elementos tipo barra de sección transversal irregular)

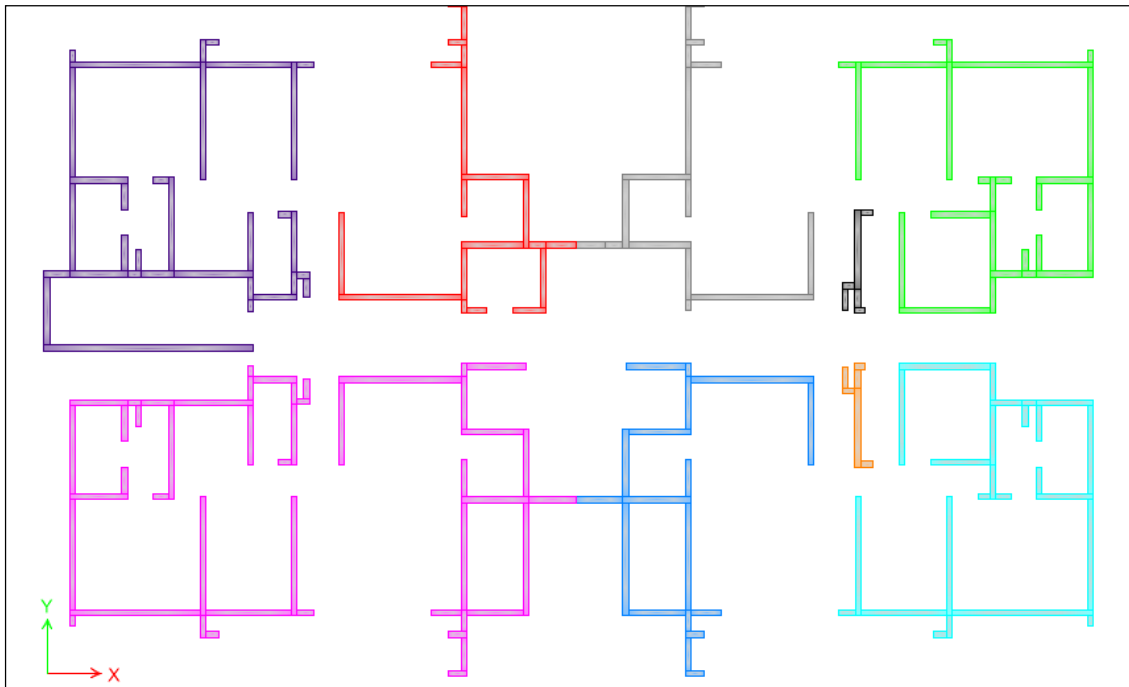


Figura 56. Vista en planta del Edificio J (elementos tipo barra de sección transversal irregular)

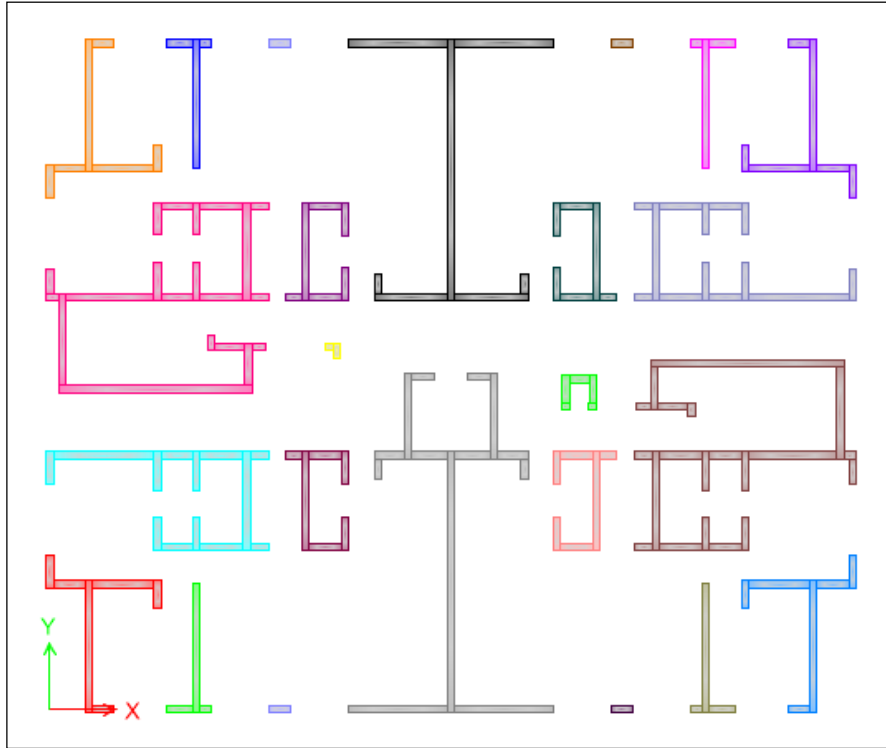


Figura 57. Vista en planta del Edificio K (elementos tipo barra de sección transversal irregular)

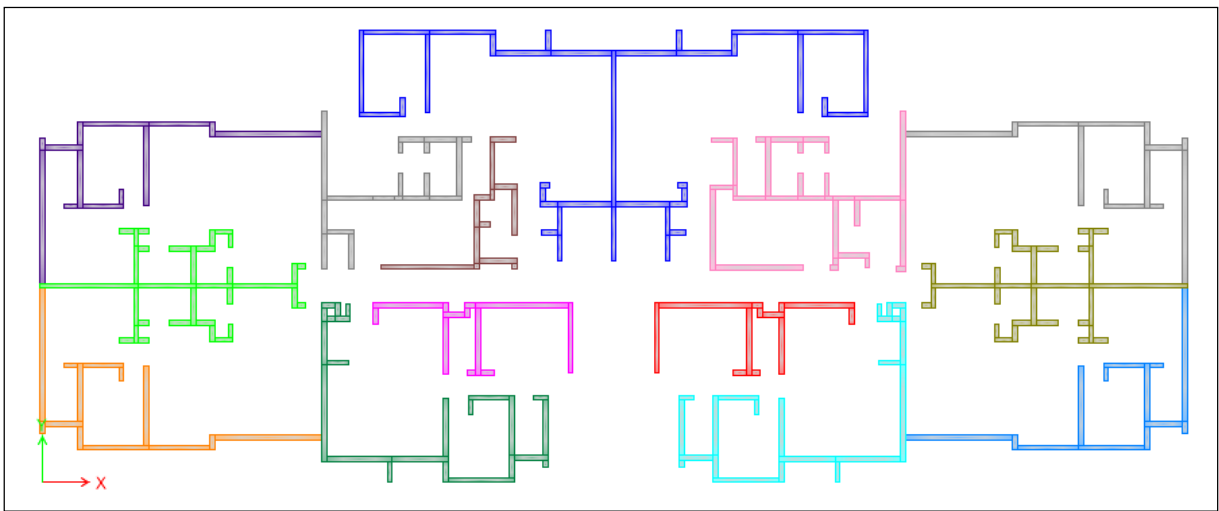


Figura 58. Vista en planta del Edificio L (elementos tipo barra de sección transversal irregular)

4. Análisis comparativo

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos a través de cada una de las técnicas de modelado empleadas así como las diferencias porcentuales existentes entre las respuestas estructurales (períodos, masas participativas, cortantes, momentos y derivas) asociadas al uso cada metodología. Para efectos comparativos se tomó como referencia los modelos de elementos de tipo área, recordando que la ecuación definida para el cálculo de la diferencia porcentual es la siguiente:

$$\% \text{ Diferencia} = \frac{X_{\text{Modelo Área}} - X_{\text{Modelo Barra}}}{X_{\text{Modelo Área}}} \cdot 100\% \quad (16)$$

Dónde:

- $X_{\text{Modelo Área}}, X_{\text{Modelo Barra}}$: Es cualquier parámetro de respuesta estructural arrojado por el modelo construido a través de elementos tipo área y tipo barra respectivamente.

4.1. Resultados de modelos de edificios ficticios

▪ Periodos

A continuación se resumen los períodos principales obtenidos para los edificios ficticios, estos corresponden a valores para los primeros modos de oscilación de la estructura en las direcciones "X", "Y" y "RZ" (modo rotacional en el eje vertical). En el Cuadro 9 se muestran los resultados de los modelos de elementos tipo área contra los modelos de elementos tipo barra con sección transversal rectangular.

Cuadro 9. Períodos para modelos de elementos tipo barra rectangular (ficticios)

Valor del período principal de oscilación (s)										
Edificio	Cantidad de niveles	Modelo: Área			Modelo: Barra rectangular			% Diferencia		
		X	Y	RZ	X	Y	RZ	X	Y	RZ
A	5	0,170	0,170	0,092	0,173	0,173	0,095	1,76%	1,76%	3,26%
B	10	0,221	0,221	0,115	0,235	0,235	0,106	6,33%	6,33%	-7,83%
C	15	0,695	0,695	0,564	0,710	0,710	0,611	2,16%	2,16%	8,33%
D	20	1,933	1,933	1,058	1,958	1,958	1,080	1,29%	1,29%	2,08%
E	25	2,094	1,142	0,749	2,144	1,174	0,527	2,39%	2,80%	-29,64%
F	30	2,363	1,995	0,872	2,384	2,026	0,775	0,89%	1,55%	-11,12%

Como puede apreciarse, en el caso de los modelos elaborados con elementos tipo barra de sección transversal rectangular, los periodos en las direcciones "X" y "Y" son mayores a los obtenidos en modelos construidos a partir de elementos tipo área, por lo que en primera instancia se podría concluir que esta metodología conforma modelos más flexibles en dichas direcciones y por ende estos valores aumentan. En el caso más crítico se alcanza un +6,33% de diferencia, mientras que para el resto de edificios las diferencias son menores al +2,80%. Por lo tanto, para el rango de incertidumbre manejado en el ámbito de la ingeniería civil, las diferencias contenidas entre ambas técnicas de modelado se consideran aceptables. Por otro lado, para el primer modo rotacional "RZ" no se observan tendencias claras, ya que en algunos casos los períodos aumentan y en otros disminuye, con diferencias que se encuentran en un rango de -29,64% a 8,33%.

El Cuadro 10 muestra la comparación realizada entre los modelos de elementos tipo área contra los modelos de elementos de tipo barra de sección transversal irregular.

Cuadro 10. Períodos para modelos de elementos tipo barra irregular (ficticios)

Valor del período principal de oscilación (s)										
Edificio	Cantidad de niveles	Modelo: Área			Modelo: Barra irregular			% Diferencia		
		X	Y	RZ	X	Y	RZ	X	Y	RZ
A	5	0,17	0,17	0,092	0,163	0,163	0,115	-4,12%	-4,12%	25,00%
B	10	0,221	0,221	0,115	0,211	0,211	0,07	-4,52%	-4,52%	-39,13%
C	15	0,695	0,695	0,564	0,662	0,662	0,662	-4,75%	-4,75%	17,38%
D	20	1,933	1,933	1,058	1,740	1,740	1,320	-9,98%	-9,98%	24,76%
E	25	2,094	1,142	0,749	1,922	1,032	0,863	-8,21%	-9,62%	15,22%
F	30	2,363	1,995	0,872	1,883	1,488	1,403	-20,31%	-25,41%	60,89%

En este caso, se observa que cuando se utilizan elementos tipo barra de sección transversal irregular, los periodos en las direcciones "X" y "Y" son menores a los obtenidos a través de modelos de elementos tipo área, es decir, caso contrario al de la técnica anterior, esta metodología constituye modelos más rígidos en tales direcciones, lo que repercute en la disminución de los períodos. Esta disminución se mantiene en valores menores al -5% para edificios de hasta 15 niveles, sin embargo a medida que se aumenta la cantidad de pisos estas diferencias crecen, llegando a valores de hasta -25,41% de diferencia, como el caso del edificio de 30 niveles. De igual forma que en la técnica anterior, para el primer modo rotacional "RZ" no se observan patrones, las diferencias varían entre -39,13% y 60,89%, por lo que en

términos absolutos las diferencias que se pueden obtener para el modo rotacional a través de esta técnica son mayores que cuando se utiliza metodología anterior.

Las Figuras 59 y 60 muestran que para todas las estructuras ficticias los períodos principales (en las direcciones "X" y "Y") que más se asemejan a los obtenidos con modelos de elementos tipo área corresponden a los valores alcanzados en modelos construidos con elementos tipo barra de sección transversal rectangular.

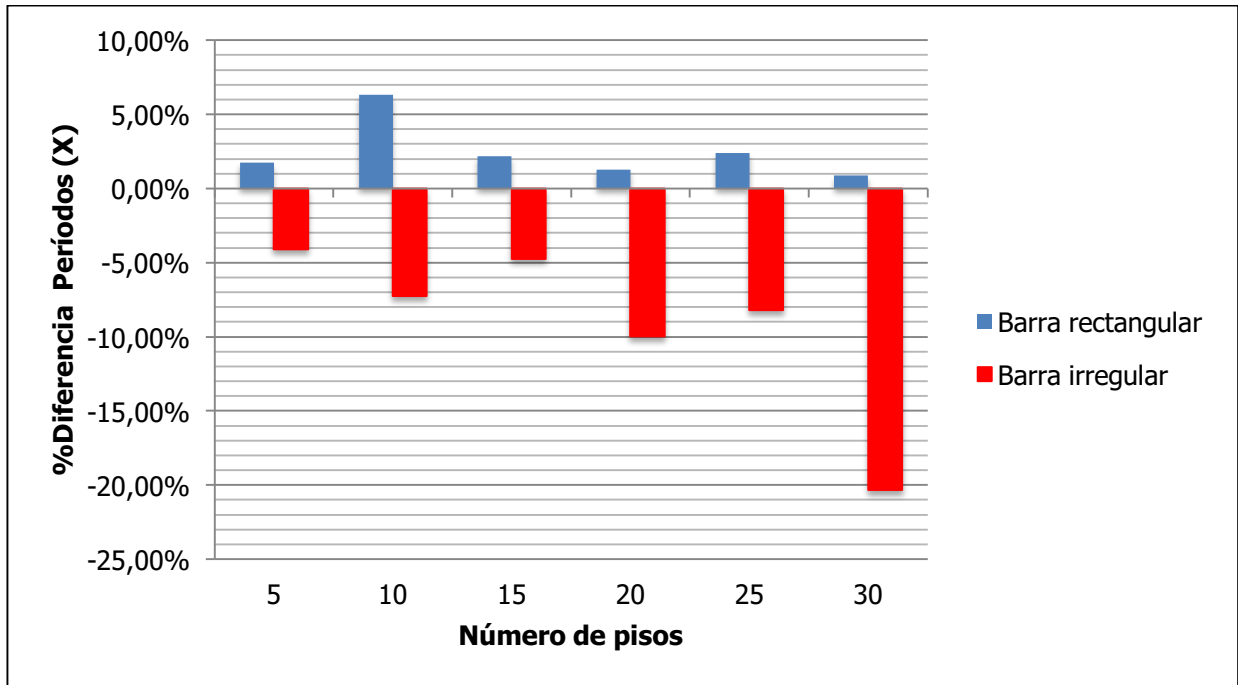


Figura 59. Diferencias porcentuales para períodos principales en la dirección "X" (modelos con geometría ficticia)

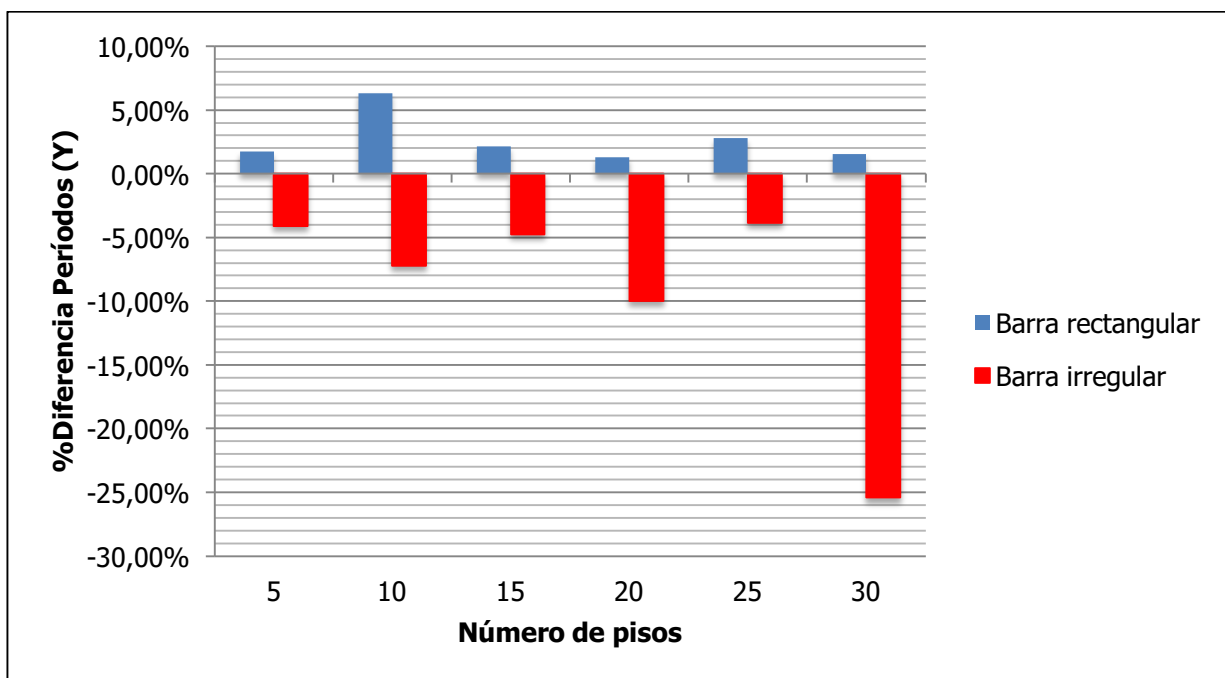


Figura 60. Diferencias porcentuales para períodos en la dirección "Y" (modelos con geometría ficticia)

▪ **Masas participativas**

El Cuadro 11 muestra las masas participativas correspondientes a los primeros modos de oscilación en las direcciones "X", "Y" y "RZ" (modo rotacional en el eje vertical) para edificios ficticios. En este se realiza la comparación entre modelos de elementos tipo área y modelos de elementos tipo barra con sección transversal rectangular.

Cuadro 11. Masa participativa para modelos de elementos tipo barra rectangular (ficticios)

Masa participativa del primer modo de oscilación (%)										
Edificio	Cantidad de niveles	Modelo: Área			Modelo: Barra rectangular			% Diferencia		
		X	Y	RZ	X	Y	RZ	X	Y	RZ
A	5	0,730	0,730	0,745	0,748	0,748	0,776	2,48%	2,48%	4,19%
B	10	0,724	0,724	0,847	0,748	0,748	0,849	3,30%	3,30%	0,15%
C	15	0,673	0,673	0,685	0,680	0,680	0,680	1,14%	1,14%	-0,76%
D	20	0,661	0,661	0,660	0,666	0,666	0,662	0,74%	0,74%	0,29%
E	25	0,650	0,678	0,672	0,653	0,680	0,640	0,52%	0,27%	-4,72%
F	30	0,664	0,658	0,728	0,666	0,660	0,755	0,27%	0,29%	3,60%

Como puede apreciarse, para todos los casos las diferencias obtenidas fueron aproximadamente menores al 5% en términos absolutos, siendo el Edificio E el caso donde se obtuvo mayor diferencia con un -4,72% para el primer modo rotacional. Además es posible observar que la masa participativa obtenida en las direcciones "X" y "Y" a través de los modelos construidos con elementos tipo barra de sección transversal rectangular son mayores que cuando se utilizan elementos tipo área.

Por otro lado, el Cuadro 12 muestra la comparación entre modelos elaborados con elementos tipo área y elementos tipo barra con sección transversal irregular.

Cuadro 12. Masa participativa para modelos de elementos tipo barra irregular (ficticios)

Masa participativa del primer modo de oscilación (%)										
Edificio	Cantidad de niveles	Modelo: Área			Modelo: Barra irregular			% Diferencia		
		X	Y	RZ	X	Y	RZ	X	Y	RZ
A	5	0,730	0,730	0,745	0,728	0,728	0,749	-0,25%	-0,25%	0,54%
B	10	0,724	0,724	0,847	0,739	0,739	0,848	2,07%	2,07%	0,07%
C	15	0,673	0,673	0,685	0,687	0,687	0,685	2,19%	2,19%	0,00%
D	20	0,661	0,661	0,660	0,675	0,675	0,666	2,10%	2,10%	0,92%
E	25	0,650	0,678	0,672	0,687	0,687	0,657	5,76%	1,30%	-2,22%
F	30	0,664	0,658	0,728	0,691	0,683	0,688	4,08%	3,77%	-5,52%

Utilizando elementos tipo barra de sección transversal irregular, las diferencias porcentuales entre masas participativas aumentan, llegando a valores de +5,76% en el caso más crítico (Edificio E, dirección "X"). Con la excepción del Edificio A, la tendencia que sigue esta técnica es similar a la de la metodología anterior, ya que para la mayoría de los casos la masa participativa obtenida en las direcciones "X" y "Y" es mayor que en los modelos de elementos tipo área.

▪ **Factor espectral dinámico (FED)**

Los valores del FED utilizados para el cálculo del coeficiente sísmico de una estructura dependen directamente de los períodos principales asociados a esta. En general, este aspecto adquiere mayor relevancia a medida que se aumenta la cantidad de niveles de un edificio, ya que con la altura los períodos se desplazan hacia la derecha del plató del espectro de diseño y en dicha zona conforme aumenta el período se reduce el valor del FED y viceversa. Por lo tanto, resulta importante conocer la incidencia de la variación del período a través de las diferentes técnicas de modelado para la obtención del FED. A continuación se muestran las Figuras 61, 62, 63, 64, 65 y 66, en estas se muestra el espectro de respuesta y los diferentes valores de FED asociados a los períodos principales en la dirección "Y" para cada metodología de modelado.

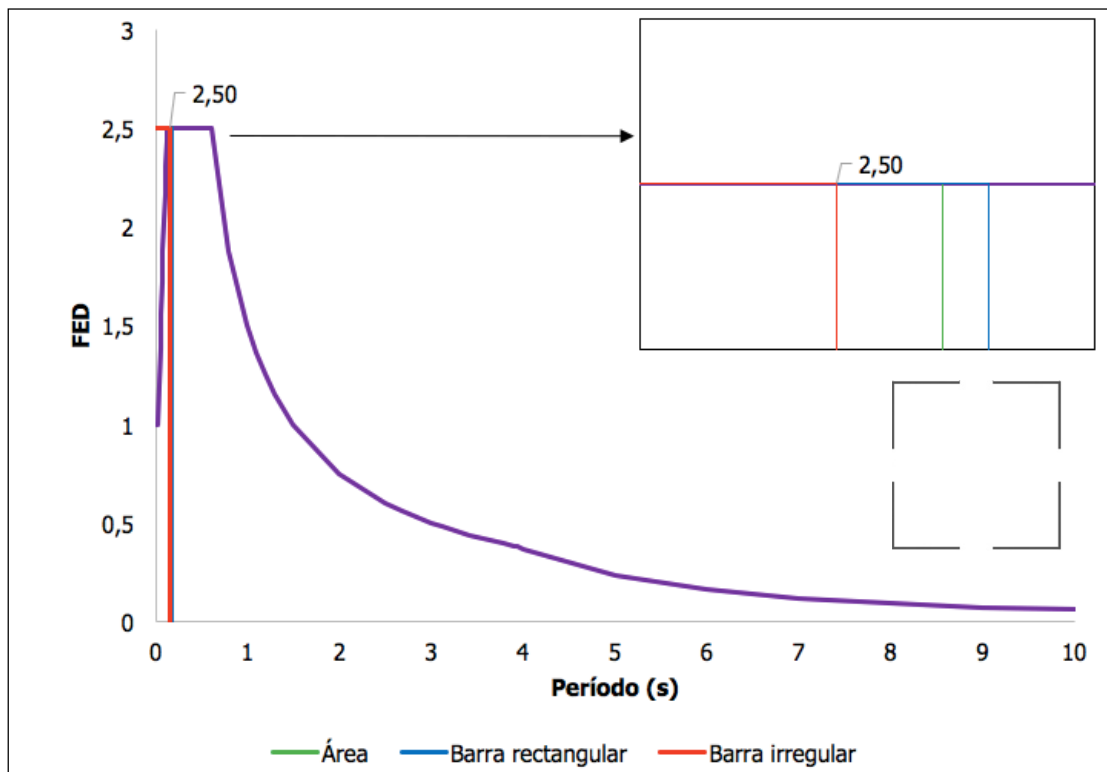


Figura 61. Factor espectral dinámico para Edificio A (5 niveles) en la dirección "Y"

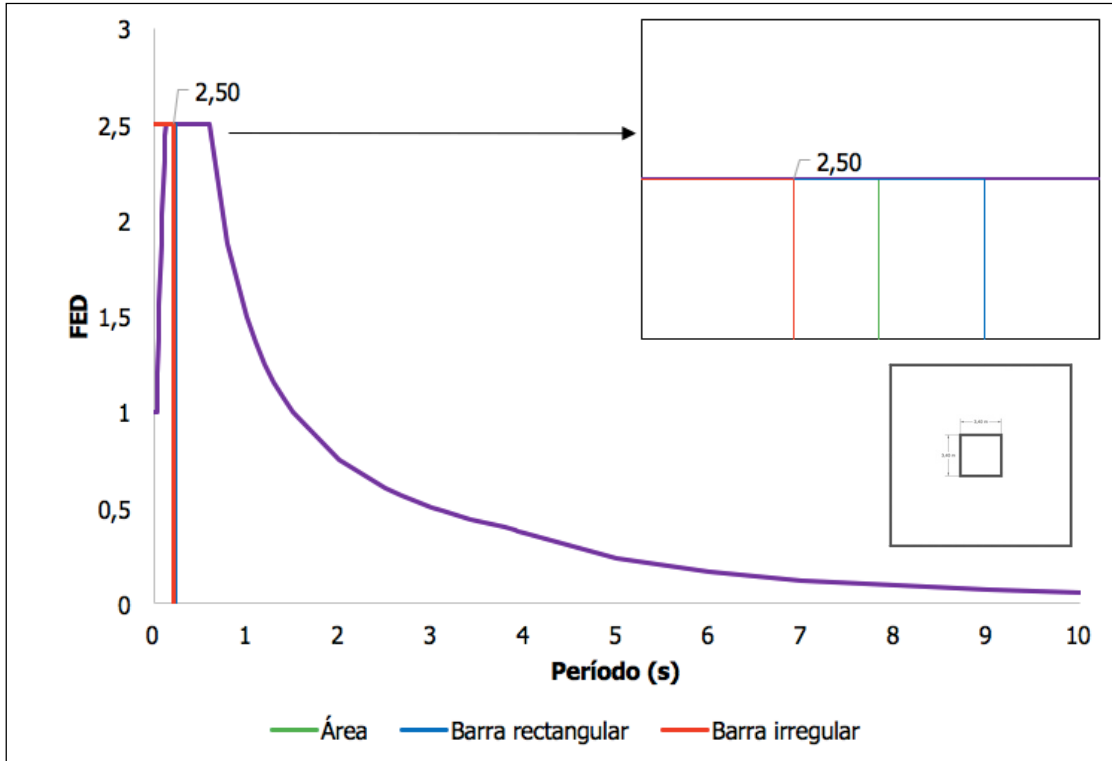


Figura 62. Factor espectral dinámico para Edificio B (10 niveles) en la dirección "Y"

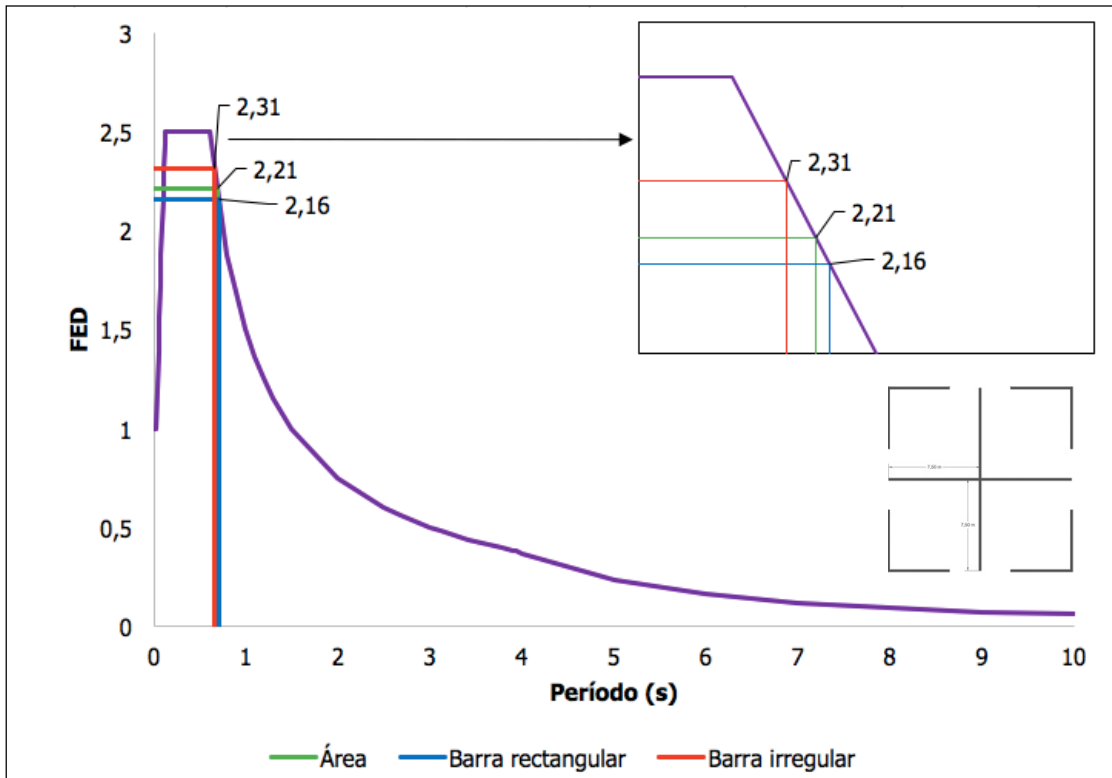


Figura 63. Factor espectral dinámico para Edificio C (15 niveles) en la dirección "Y"

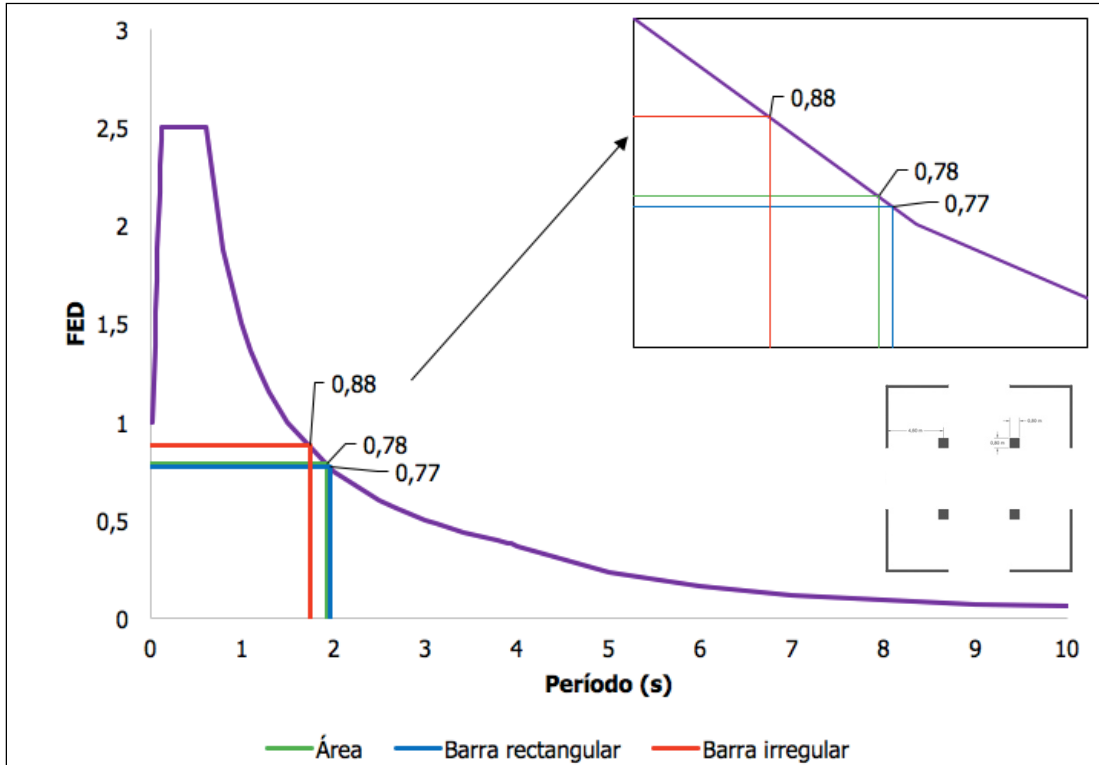


Figura 64. Factor espectral dinámico para Edificio D (20 niveles) en la dirección "Y"

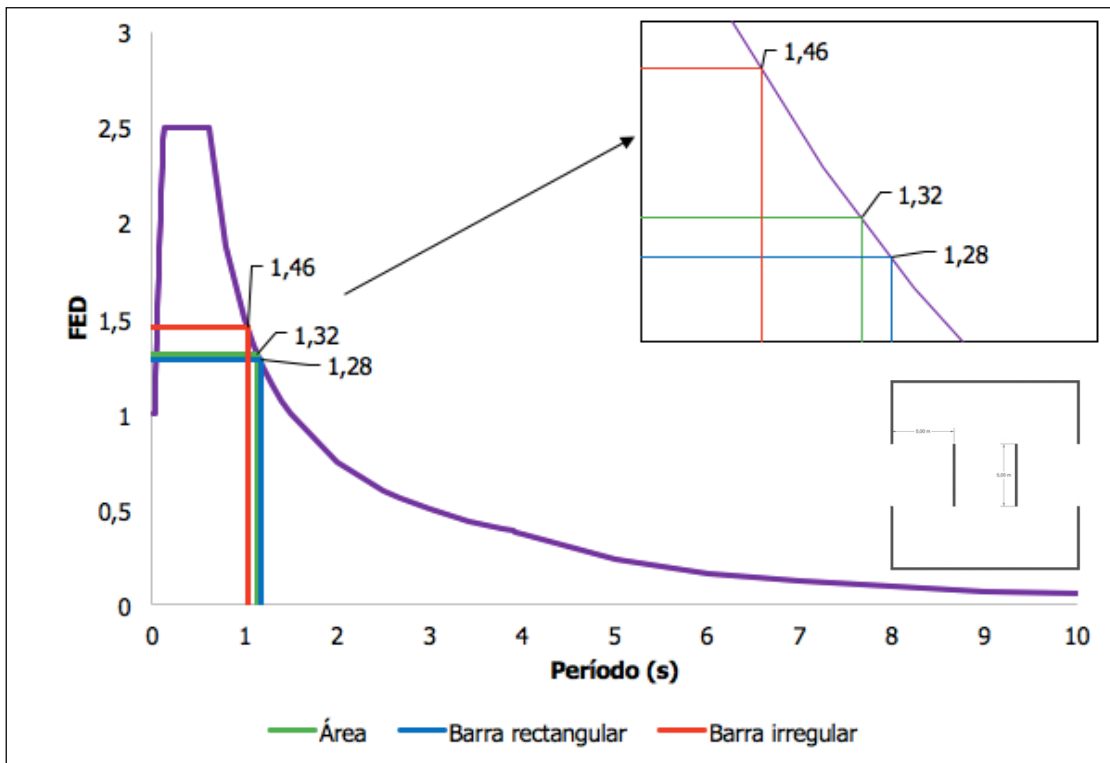


Figura 65. Factor espectral dinámico para Edificio E (25 niveles) en la dirección "Y"

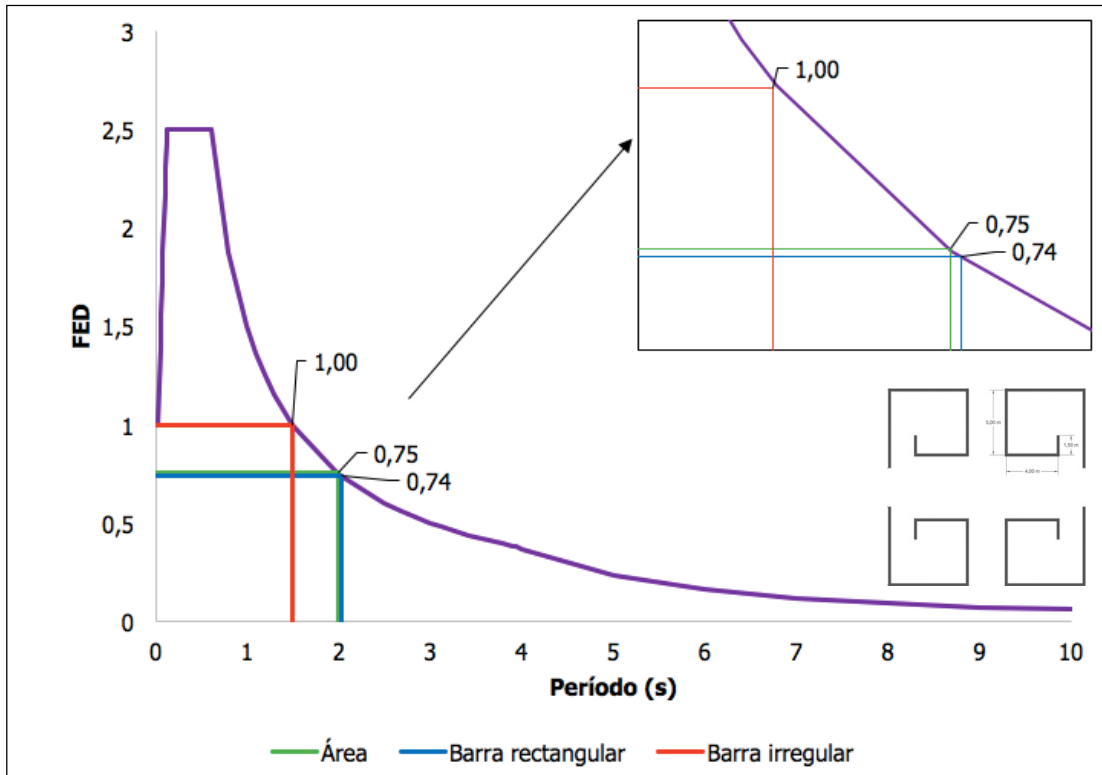


Figura 66. Factor espectral dinámico para Edificio F (30 niveles) en la dirección “Y”

Como puede observarse en la Figura 61, para el caso del Edificio A (5 niveles) los valores del período se encuentran dentro de la zona del plató del espectro, por lo que en dicho caso la variación del período a través de la diferentes técnicas, no incide en el valor del FED utilizado para el cálculo de la demanda sísmica, lo mismo sucede en el caso del Edificio B (10 niveles, ver Figura 62).

Por otro lado, para los Edificios C, D, E y F (15, 20, 25 y 30 niveles respectivamente), los períodos se encuentran desplazados a la derecha del plató. Dado que en los modelos de elementos tipo barra con sección transversal rectangular se alcanzaron períodos mayores respecto a los modelos de elementos tipo área, es esperable obtener menores valores de FED cuando se utiliza dicha metodología de modelado, tal como se observa en las Figuras 63, 64, 65 y 66. Caso contrario sucede con los modelos elaborados a partir de elementos tipo barra con sección transversal irregular.

Para el caso específico del Edificio F (Figura 66), se muestra un valor de FED de 1,00 para el modelo construido a través de elementos tipo barra de sección transversal irregular, mientras que en el modelo elaborado con elementos tipo área se alcanza un valor de FED de 0,75. En contraparte para el modelo construido con elementos tipo barra de sección transversal rectangular se obtiene un valor de FED de 0,74. Por lo tanto a través de esta última técnica se obtuvo un valor de FED más cercano al considerado como "real" (FED obtenido para modelo de elementos tipo área). Esta es una tendencia que se repite en las Figuras 63, 64 y 65, y que se resume en los Cuadros 13 y 14.

Cuadro 13. FED para modelos de elementos tipo barra rectangular (ficticios)

Factor espectral dinámico (FED)							
Edificio	Cantidad de niveles	Modelo: Área		Modelo: Barra rectangular		% Diferencia	
		X	Y	X	Y	X	Y
A	5	2,50	2,50	2,50	2,50	0,00%	0,00%
B	10	2,50	2,50	2,50	2,50	0,00%	0,00%
C	15	2,21	2,21	2,16	2,16	-2,26%	-2,26%
D	20	0,78	0,78	0,77	0,77	-1,28%	-1,28%
E	25	0,72	1,32	0,71	1,28	-1,39%	-3,03%
F	30	0,64	0,77	0,63	0,74	-1,56%	-3,90%

Cuadro 14. FED para modelos de elementos tipo barra irregular (ficticios)

Factor espectral dinámico (FED)							
Edificio	Cantidad de niveles	Modelo: Área		Modelo: Barra rectangular		% Diferencia	
		X	Y	X	Y	X	Y
A	5	2,50	2,50	2,5	2,5	0,00%	0,00%
B	10	2,50	2,50	2,5	2,5	0,00%	0,00%
C	15	2,21	2,21	2,31	2,31	4,52%	4,52%
D	20	0,78	0,78	0,88	0,88	12,82%	12,82%
E	25	0,72	1,32	0,78	1,67	8,33%	26,52%
F	30	0,64	0,77	0,81	1,01	26,56%	31,17%

▪ **Cortantes y momentos basales**

Los Cuadros 15 y 16 muestran la comparación de cortantes y momento basales obtenidos para edificios ficticios a través de modelos de elementos tipo área y elementos tipo barra de sección transversal rectangular.

Cuadro 15. Cortantes basales para modelos de elementos tipo barra rectangular (ficticios)

Cortantes basales (ton)							
Edificio	Cantidad de niveles	Modelo: Área		Modelo: Barra rectangular		% Diferencia	
		Vx	Vy	Vx	Vy	Vx	Vy
A	5	771	771	777	777	0,77%	0,77%
B	10	1811	1811	1826	1826	0,82%	0,82%
C	15	2227	2227	2202	2202	-1,10%	-1,10%
D	20	1220	1220	1215	1215	-0,42%	-0,41%
E	25	2306	1473	2274	1463	-1,41%	-0,71%
F	30	2185	2005	2183	2005	-0,09%	-0,01%

Cuadro 16. Momentos para basales modelos de elementos tipo barra rectangular (ficticios)

Momentos basales (ton-m)										
Edificio	Cantidad de niveles	Modelo: Área			Modelo: Barra irregular			% Diferencia		
		Mx	My	Mz	Mx	My	Mz	Mx	My	Mz
A	5	8578	8578	6041	8636	8636	6087	0,67%	0,67%	0,77%
B	10	37827	37827	14180	38018	38018	14296	0,50%	0,50%	0,82%
C	15	69054	69054	17434	67927	67927	17242	-1,63%	-1,63%	-1,10%
D	20	39685	39685	9554	39143	39143	9515	-1,36%	-1,36%	-0,41%
E	25	59686	106049	17612	58543	103437	17369	-1,91%	-2,46%	-1,38%
F	30	88675	103690	16995	87930	102449	16981	-0,84%	-1,20%	-0,08%

Observando los cortantes y momentos basales obtenidos a través de ambas técnicas, se aprecia que existen diferencias porcentuales que para las magnitudes manejadas en el ámbito de la ingeniería civil y la incertidumbre del cálculo de la fuerza sísmica son aceptables. Llegando a una diferencia máxima de -1,41% y -2,46% para el cortante y momento basal respectivamente. A continuación se muestran los resultados de cortantes y momentos basales para los modelos construidos a través de elementos tipo barra de sección transversal irregular.

Cuadro 17. Cortantes basales para modelos de elementos tipo barra irregular (ficticios)

Cortantes basales (ton)							
Edificio	Cantidad de niveles	Modelo: Área		Modelo: Barra irregular		% Diferencia	
		Vx	Vy	Vx	Vy	Vx	Vy
A	5	771	771	775	775	0,40%	0,40%
B	10	1811	1811	1780	1780	-1,71%	-1,71%
C	15	2227	2227	2371	2371	6,50%	6,50%
D	20	1220	1220	1295	1295	6,16%	6,16%
E	25	2306	1473	2423	1632	5,08%	10,79%
F	30	2185	2005	2578	2196	18,00%	9,50%

Cuadro 18. Momentos basales para modelos de elementos tipo barra irregular (ficticios)

Momentos basales (ton-m)										
Edificio	Cantidad de niveles	Modelo: Área			Modelo: Barra irregular			% Diferencia		
		Mx	My	Mz	Mx	My	Mz	Mx	My	Mz
A	5	8578	8578	6041	8619	8619	6065	0,47%	0,47%	0,40%
B	10	37827	37827	14180	37383	37383	14572	-1,17%	-1,17%	2,77%
C	15	69054	69054	17434	73619	73619	18568	6,61%	6,61%	6,50%
D	20	39685	39685	9554	44670	44670	10143	12,56%	12,56%	6,16%
E	25	59686	106049	17612	65182	114796	12961	9,21%	8,25%	20,66%
F	30	88675	103690	16995	111491	139484	17459	25,73%	34,52%	17,42%

Para el caso de los modelos construidos a través de elementos tipo barra de sección transversal irregular las diferencias porcentuales respecto a los modelos elaborados con elementos tipo área se incrementan sustancialmente, llegando a valores de +18,00% y 34,52% en cortante y momento basal respectivamente. Si se toma como "correcto" el modelado a través de elemento tipo área se podría concluir que el uso de elementos tipo barra de sección transversal irregular, para el modelado de edificios tipo muro, provoca que se sobreestime las fuerzas producidas durante la actividad sísmica, lo que repercute en mayores costos durante la etapa constructiva.

Es importante recordar que en esta investigación se parte del hecho que el modelado de muros a través de elementos tipo área es el adecuado, dado que desde el punto de vista teórico, la aplicación de la teoría de Euler-Bernoulli en elementos chatos posee limitaciones. Este es un aspecto que no se está comprobando, por lo que tampoco se puede asegurar si por el contrario el uso de elementos tipo área se subestima las fuerzas sísmicas, con lo que se podría estar incumpliendo los factores de seguridad al deslizamiento y al vuelco.

Por otro lado, hay que tomar en cuenta que las mayores diferencias obtenidas se observan en aquellas estructuras cuyos períodos se encuentran a la derecha de la zona del plató del espectro. Es por este motivo que para los Edificios A y B, las diferencias obtenidas son considerablemente menores en comparación con los otros casos, dado que para estas estructura el valor asociado al FED es el mismo sin importar la metodología de modelado utilizada.

En las Figuras 67 y 68 se aprecia gráficamente las diferencias anteriormente expuestas, obsérvese como, en principio, el modelado a través de elementos de tipo barra de sección transversal irregular no pareciera resultar una metodología de modelado adecuada para estimar las fuerzas sísmicas en un edificio tipo muro.

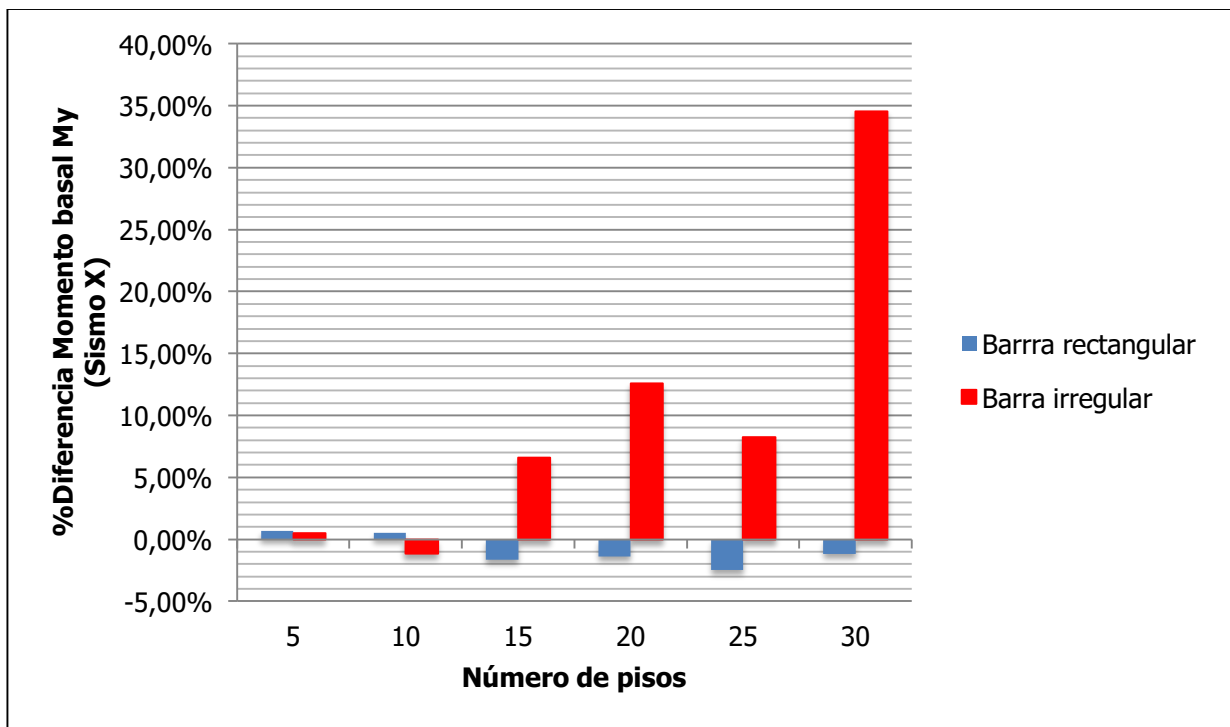


Figura 67. Diferencias porcentuales para flexión "My" (modelos de geometría ficticia)

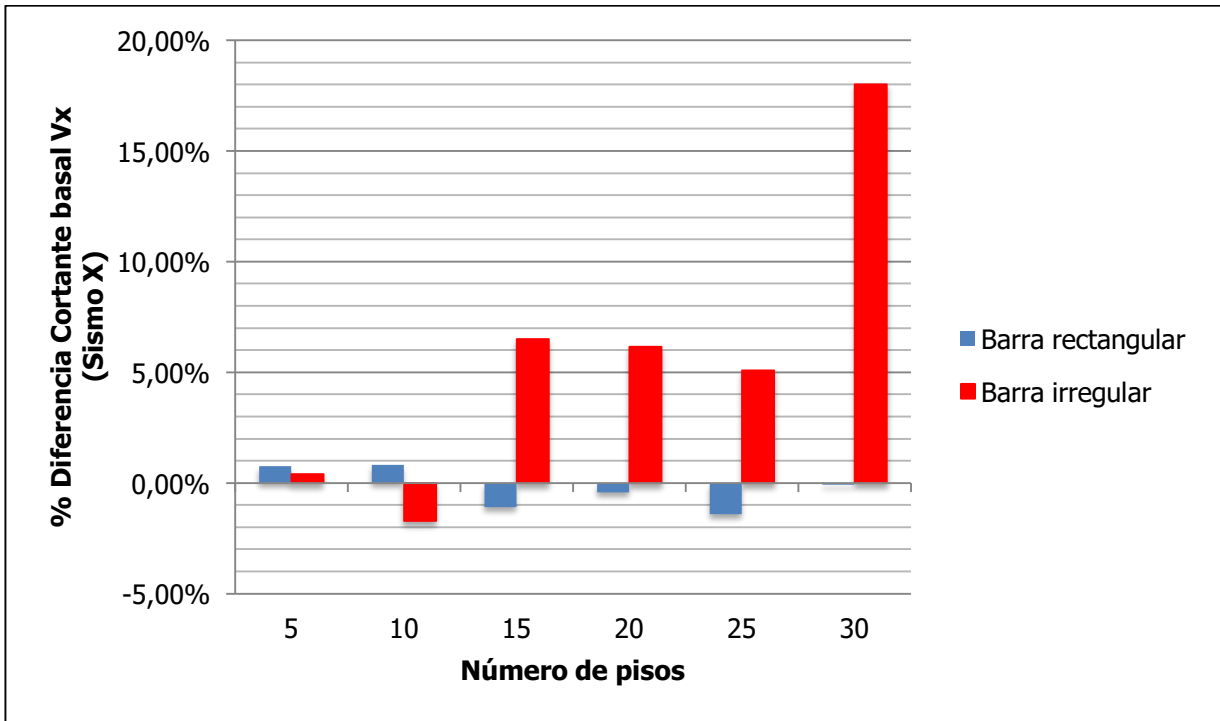


Figura 68. Diferencias porcentuales para cortante "Vx" (modelos de geometría ficticia)

- **Deformadas y derivas**

Dado que los modelos con elementos tipo barra de sección transversal rectangular arrojan períodos mayores que aquellos construidos a través de elementos tipo área, es esperable que dicha característica se vea reflejada en la deformada final de la estructura, tal como se muestra en las Figuras 69, 70, 71, 72, 73 y 74, donde se aprecia que la metodología de modelado con elementos de tipo barra con sección transversal rectangular conforma modelos más flexibles, lo que repercute en mayores desplazamientos ante la acción del sismo.

En contraparte, los modelos elaborados a través de elementos tipo barra de sección transversal irregular presentan un comportamiento más rígido, a tal punto que en algunos casos el desplazamiento del centro de masa de cada entrepiso se ve reducido significativamente con respecto a las otras dos metodologías, tal como sucede en el caso de los modelos B y F.

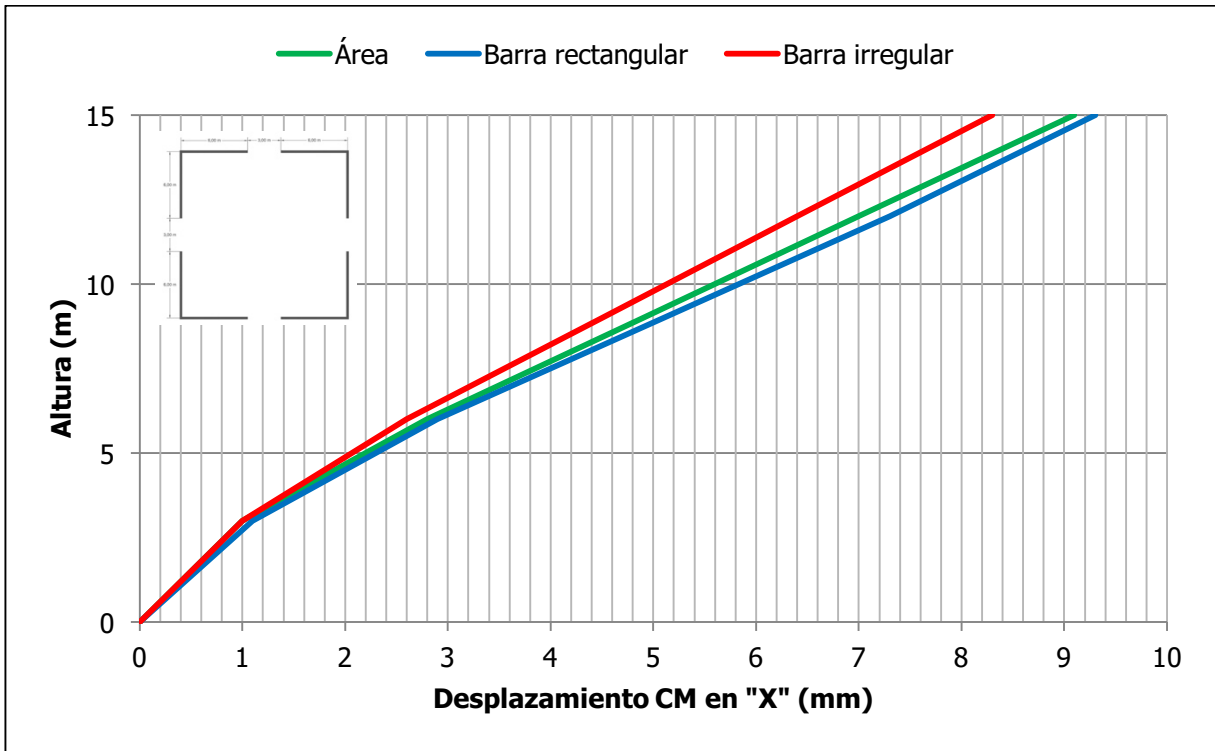


Figura 69. Deformada en X para Edificio A (5 niveles)

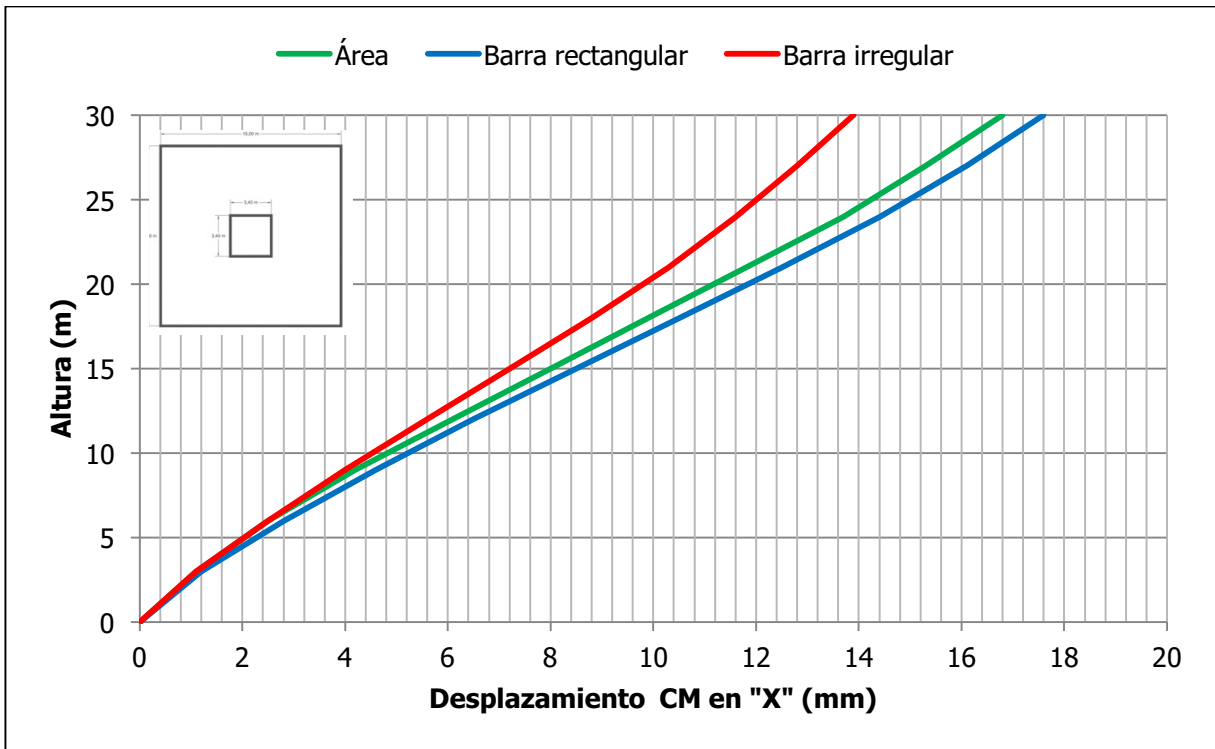


Figura 70. Deformada en X para Edificio B (10 niveles)

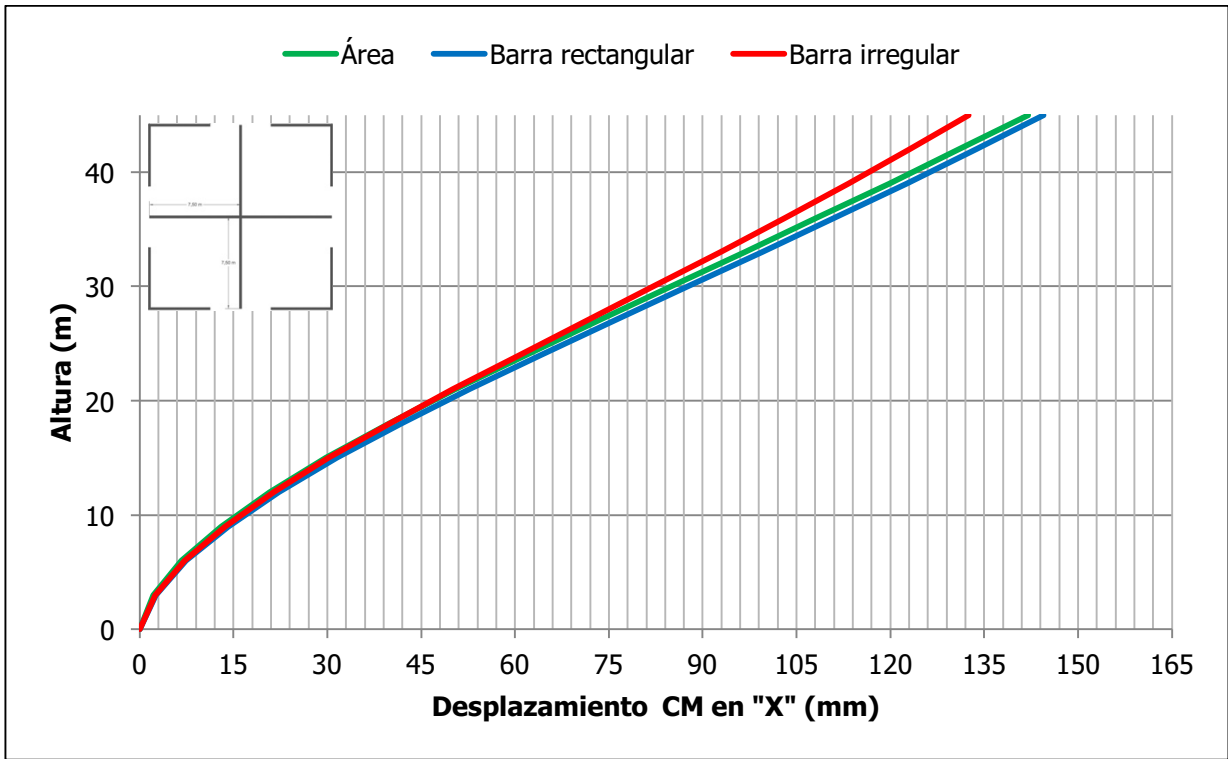


Figura 71. Deformada en X para Edificio C (15 niveles)

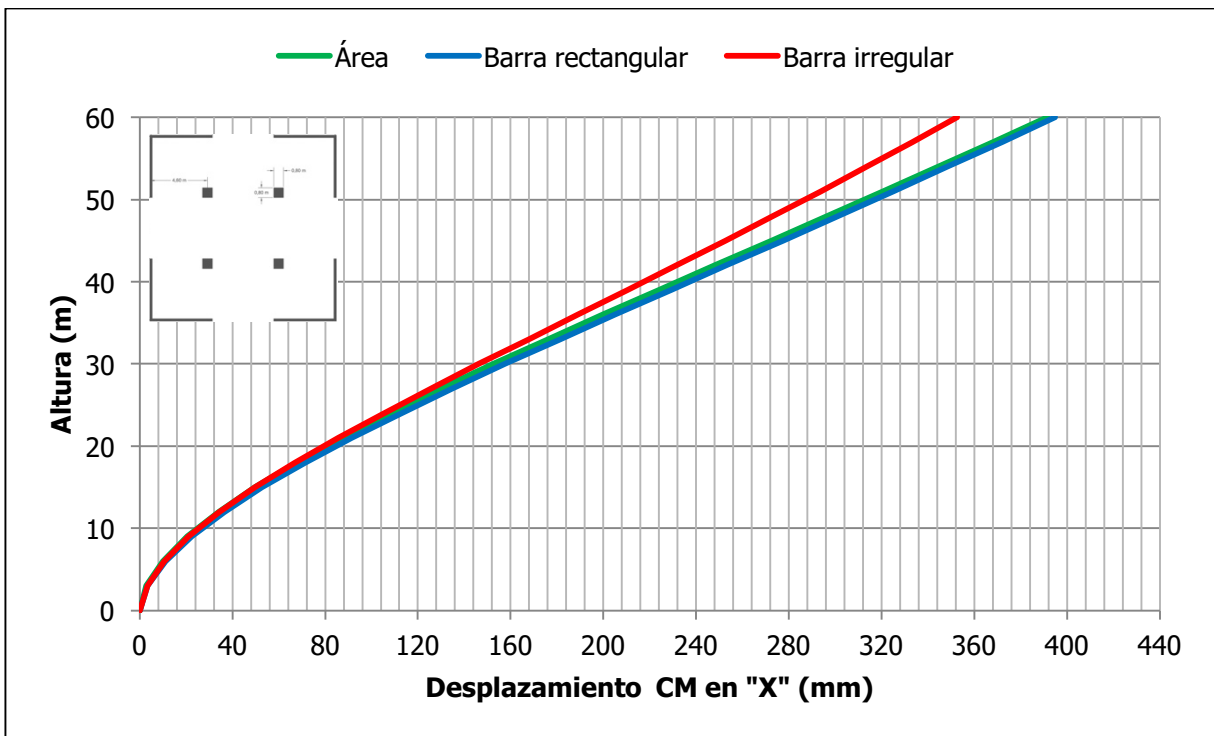


Figura 72. Deformada en X para Edificio D (20 niveles)

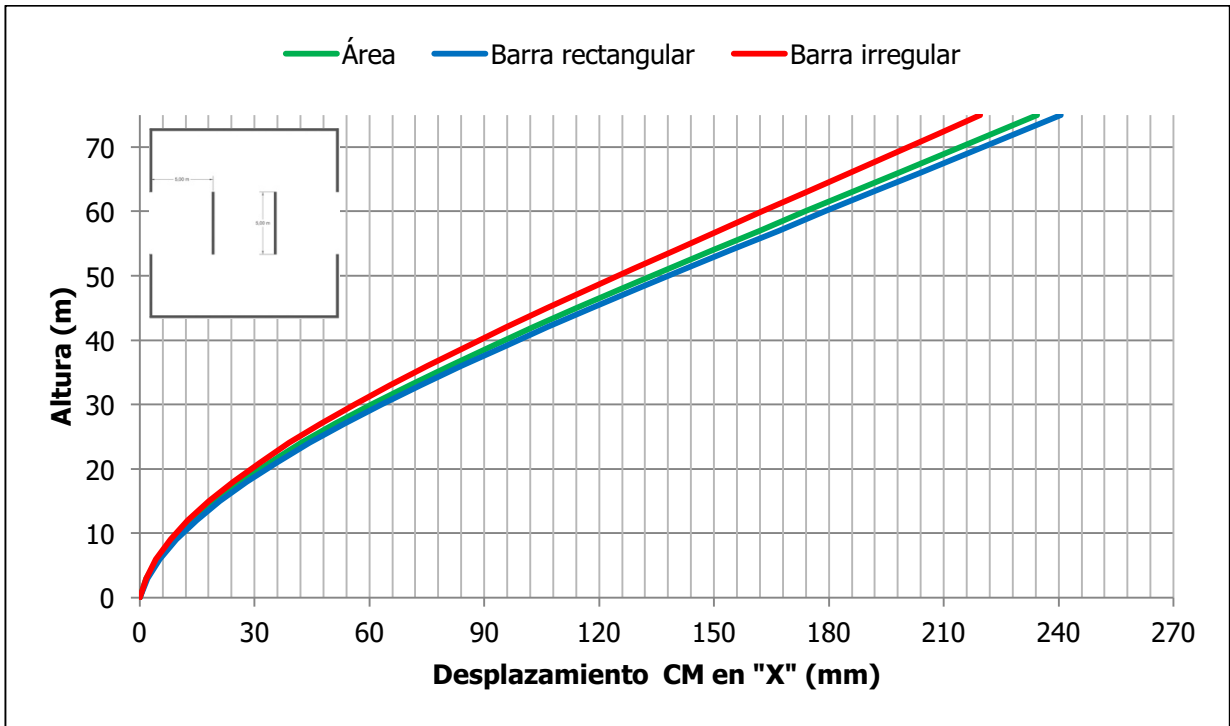


Figura 73. Deformada en X para Edificio E (25 niveles)

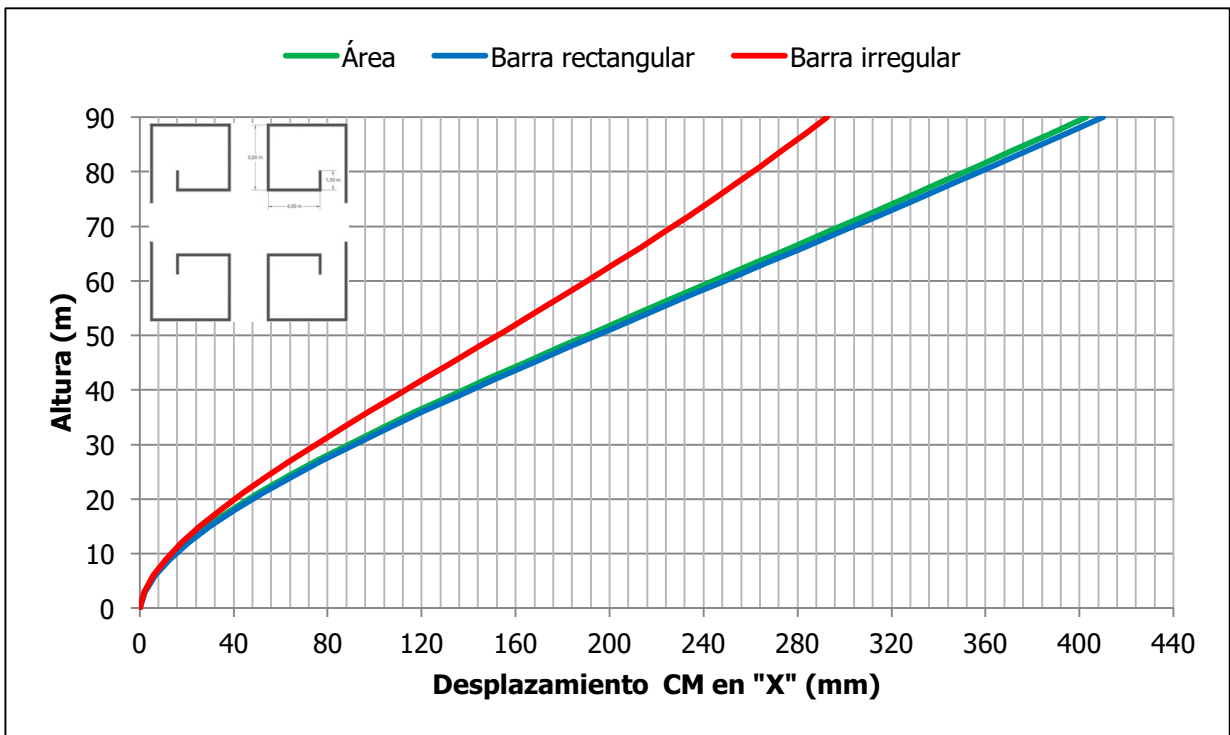


Figura 74. Deformada en X para Edificio F (30 niveles)

Finalmente, los Cuadros 19 y 20 muestran las derivadas arrojadas por los modelos de elementos tipo barra de sección transversal rectangular e irregular en comparación con los modelos de elementos tipo área.

Cuadro 19. Derivas para modelos de elementos tipo barra regular (ficticios)

Derivas							
Edificio	Cantidad de niveles	Modelo: Área		Modelo: Barra rectangular		% Diferencia	
		X	Y	X	Y	X	Y
A	5	0,000682	0,000682	0,000684	0,000684	0,29%	0,29%
B	10	0,000505	0,000505	0,000516	0,000516	2,18%	2,18%
C	15	0,00367	0,00367	0,00363	0,00363	-1,09%	-1,09%
D	20	0,008009	0,008009	0,00787	0,00787	-1,74%	-1,74%
E	25	0,003996	0,006098	0,004055	0,006231	1,48%	2,18%
F	30	0,005272	0,006566	0,005341	0,00658	1,31%	0,21%

Cuadro 20. Derivas para modelos de elementos tipo barra irregular (ficticios)

Derivas							
Edificio	Cantidad de niveles	Modelo: Área		Modelo: Barra irregular		% Diferencia	
		X	Y	X	Y	X	Y
A	5	0,000682	0,000682	0,000618	0,000618	-9,38%	-9,38%
B	10	0,000505	0,000505	0,000436	0,000436	-13,66%	-13,66%
C	15	0,003670	0,003670	0,003169	0,003169	-13,65%	-13,65%
D	20	0,008009	0,008009	0,006618	0,006618	-17,37%	-17,37%
E	25	0,003996	0,006098	0,003677	0,005209	-8,00%	-14,58%
F	30	0,005272	0,006566	0,003182	0,004345	-39,64%	-33,83%

Es posible apreciar que en términos porcentuales, las diferencias obtenidas cuando se utilizan elementos tipo barra de sección transversal irregular son considerablemente mayores que cuando tales elementos se definen con secciones rectangulares. Es decir, si se toma como correcto el modelado a través de elementos tipo área, la metodología de modelado a través de elementos tipo barra de sección transversal irregular provoca que se subestime la flexibilidad de la estructura ante la acción del sismo, ya que como se puede apreciar se obtienen reducciones de hasta un -39,64% en las derivadas. Mientras que para los modelos de elementos tipo barra de sección transversal rectangular dichas diferencias se encuentran en un rango de -1,74% y 2,18%.

Usualmente las razones de deriva de los edificios tipo muro no son el parámetro que rige el diseño de estas estructuras, por lo que los resultados anteriores no serían significativos en el diseño de dichos edificios a partir de los tipos de modelado estudiados en este trabajo.

4.2. Resultados de modelos de edificios reales

La inclusión del modelado de edificios ficticios con geometrías simples se realizó con el fin de observar con claridad tendencias en las metodologías, sin embargo el propósito final del trabajo es determinar las tendencias que se presentan en estructuras reales.

▪ Periodos

A continuación se resumen los períodos principales obtenidos para los edificios reales. El Cuadro 21 muestra los resultados de los modelos de elementos de tipo área contra los modelos de elementos tipo barra de sección transversal rectangular

Cuadro 21. Períodos para modelos de elementos tipo barra rectangular (reales)

Valor del período principal de oscilación (s)										
Edificio	Cantidad de niveles	Modelo: Área			Modelo: Barra rectangular			% Diferencia		
		X	Y	RZ	X	Y	RZ	X	Y	RZ
G	5	0,148	0,112	0,128	0,157	0,118	0,129	6,08%	5,36%	0,78%
H	10	0,260	0,308	0,247	0,271	0,308	0,254	4,23%	0,00%	2,83%
I	15	0,306	0,466	0,235	0,326	0,461	0,265	6,54%	-1,07%	12,77%
J	20	0,605	0,759	0,543	0,637	0,775	0,546	5,29%	2,11%	0,55%
K	25	1,088	1,299	1,079	1,114	1,301	0,966	2,39%	0,15%	-10,47%
L	30	0,88	1,574	0,681	0,907	1,574	0,717	3,07%	0,00%	5,29%

Para los edificios reales, es posible apreciar que en la mayoría de los casos (a excepción del Edificio I de 15 niveles en la dirección "X") se mantiene la tendencia observada con los edificios ficticios, ya que para los modelos de elementos tipo barra de sección transversal rectangular, los períodos en las direcciones "X" y "Y" son mayores a los obtenidos con modelos construidos a través de elementos de tipo área, siendo un +6,54% la mayor diferencia encontrada. Esto reafirma el hecho de que los elementos tipo barra de sección transversal rectangular conforman modelos más flexibles en dichas direcciones, en comparación con los de tipo área.

En general, los períodos principales del modo rotacional "RZ" en edificios reales, aumentan (a excepción del Edificio K) cuando se utiliza elementos tipo barra de sección transversal regular, llegando a una diferencia máxima de +12,77% para el Edificio I.

Por otro lado, el Cuadro 22 muestra los resultados obtenidos para los modelos de elementos tipo área contra los modelos de elementos tipos barra de sección transversal irregular.

Cuadro 22. Períodos para modelos de elementos tipo barra irregular (reales)

Valor del período principal de oscilación (s)										
Edificio	Cantidad de niveles	Modelo: Área			Modelo: Barra irregular			% Diferencia		
		X	Y	RZ	X	Y	RZ	X	Y	RZ
G	5	0,148	0,112	0,128	0,129	0,096	0,099	-12,84%	-14,29%	-22,66%
H	10	0,260	0,308	0,247	0,224	0,249	0,218	-13,85%	-19,16%	-11,74%
I	15	0,306	0,466	0,235	0,257	0,375	0,225	-16,01%	-19,53%	-4,26%
J	20	0,605	0,759	0,543	0,55	0,632	0,488	-9,09%	-16,73%	-10,13%
K	25	1,088	1,299	1,079	0,879	1,007	0,914	-19,21%	-22,48%	-15,29%
L	30	0,88	1,574	0,681	0,804	1,278	0,625	-8,64%	-18,81%	-8,22%

De la misma forma que sucedió en el caso de los edificios ficticios, el modelado de estructuras reales a través de elementos tipo barra con sección transversal irregular, arroja períodos menores en las direcciones "X" y "Y" en comparación con los obtenidos en modelos elaborados con elementos tipo área, llegando a diferencias máximas de -22,48%. Anteriormente, el análisis de edificios ficticios mostró que esta técnica de modelado arrojó diferencias menores al -5% para estructuras de 5, 10 y 15 niveles respectivamente, sin embargo para los edificios reales, se obtuvieron diferencias de hasta -19,16% en estructuras con la misma cantidad de niveles en estas direcciones.

Finalmente, se observa que para edificios reales, los períodos principales del modo rotacional "RZ", disminuyen cuando se utilizan elementos tipo barra de sección transversal irregular en comparación con los de área, llegando a una diferencia máxima de -22,66% para el Edificio G.

En la Figura 75 y Figura 76 se aprecian las diferencias porcentuales existentes entre los períodos obtenidos a través de cada técnica en las direcciones "X" y "Y". En estas se observa que las diferencias porcentuales son mayores cuando se utilizan elementos tipo barra de sección transversal irregular que cuando definen dichas secciones con formas rectangulares.

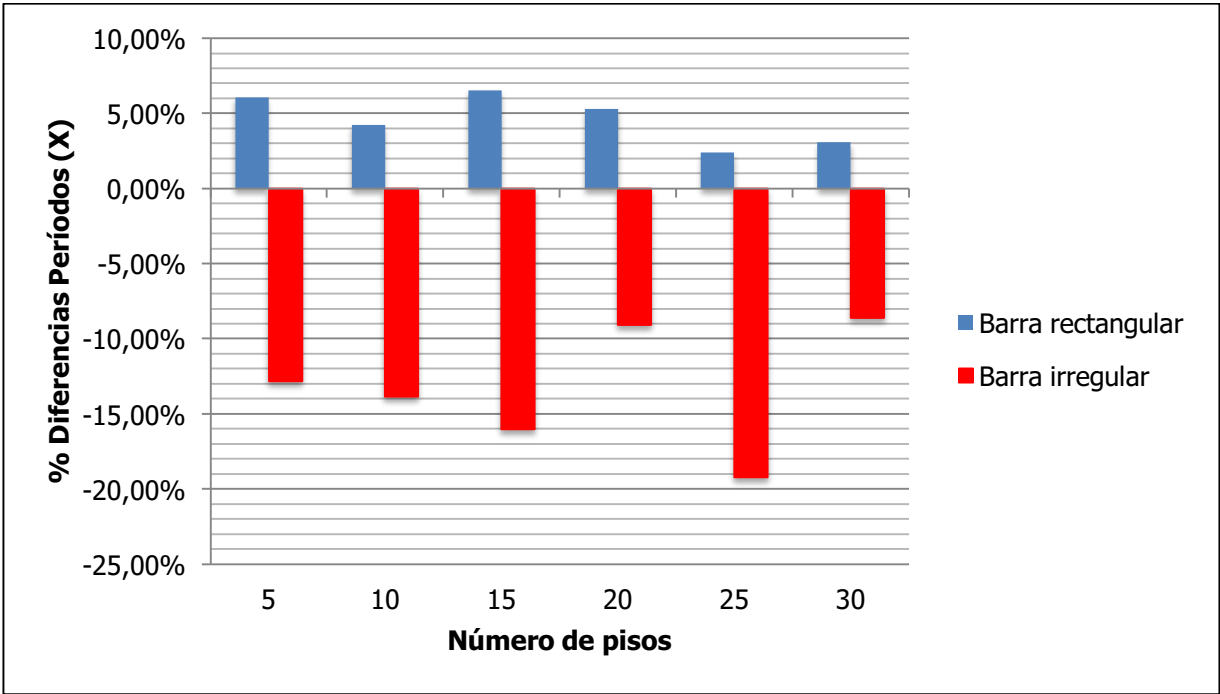


Figura 75. Diferencias porcentuales para períodos en la dirección "X" (modelos de geometría real)

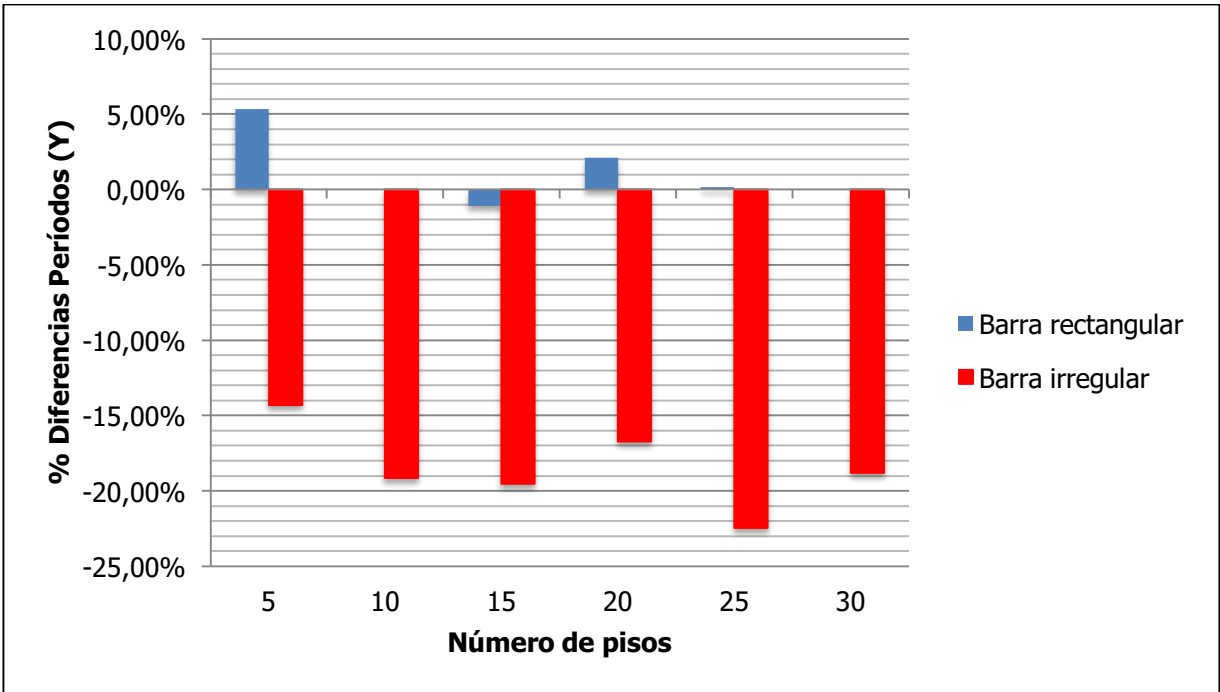


Figura 76. Diferencias porcentuales para períodos en la dirección "Y" (modelos de geometría real)

▪ **Masas participativas**

El Cuadro 23 muestra las masas participativas correspondientes a los primeros modos de oscilación en las direcciones "X", "Y", "RZ" (modo rotacional en el eje vertical) para edificios reales. En este se realiza la comparación entre modelos de elementos tipo área y modelos de elementos tipo barra con sección transversal rectangular para edificios reales.

Cuadro 23. Masa participativa para modelos de elementos tipo barra rectangular (reales)

Masa participativa del primer modo de oscilación (%)										
Edificio	Cantidad de niveles	Modelo: Área			Modelo: Barra rectangular			% Diferencia		
		X	Y	RZ	X	Y	RZ	X	Y	RZ
G	5	0,746	0,755	0,737	0,800	0,813	0,796	7,28%	7,73%	8,02%
H	10	0,732	0,704	0,710	0,775	0,730	0,740	5,93%	3,70%	4,24%
I	15	0,746	0,696	0,787	0,787	0,710	0,808	5,51%	1,92%	2,59%
J	20	0,722	0,676	0,710	0,719	0,678	0,706	-0,32%	0,25%	-0,66%
K	25	0,650	0,679	0,681	0,720	0,686	0,726	10,80%	1,11%	6,52%
L	30	0,635	0,662	0,680	0,661	0,667	0,700	4,05%	0,73%	2,96%

Como puede observarse, las diferencias arrojadas entre ambas técnicas aumentaron en comparación con las diferencias obtenidas para los edificios ficticios, llegando a alcanzar un valor de 10,80% para el Edificio K en la dirección "X".

Por otro lado, el Cuadro 24 muestra la comparación entre modelos elaborados con elementos tipo área y elementos tipo barra de sección transversal irregular.

Cuadro 24. Masa participativa para modelos de elementos tipo barra irregular (reales)

Masa participativa del primer modo de oscilación (%)										
Edificio	Cantidad de niveles	Modelo: Área			Modelo: Barra irregular			% Diferencia		
		X	Y	RZ	X	Y	RZ	X	Y	RZ
G	5	0,746	0,755	0,737	0,157	0,129	0,784	6,08%	0,78%	6,42%
H	10	0,732	0,704	0,710	0,308	0,271	0,719	0,00%	4,23%	1,30%
I	15	0,746	0,696	0,787	0,461	0,326	0,783	-1,07%	6,54%	-0,48%
J	20	0,722	0,676	0,710	0,775	0,637	0,641	2,11%	5,29%	-9,78%
K	25	0,650	0,679	0,681	1,301	1,114	0,732	0,15%	2,39%	7,46%
L	30	0,635	0,662	0,680	1,574	0,907	0,721	0,00%	3,07%	6,03%

Al igual que en los edificios ficticios, observados en los Cuadros 21 y 22, se puede observar que la masa participativa tiene cierta tendencia a aumentar en las direcciones "X" y "Y" cuando se utilizan técnicas de modelado alternas al modelado a través de elementos tipo área.

▪ **Factor espectral dinámico (FED)**

A continuación se muestran las Figuras 77, 78, 79, 80, 81 y 82, en estas se muestra el espectro de respuesta y los diferentes valores de FED asociados a los períodos principales en la direcciones indicadas para cada metodología de modelado empleado en estructuras reales.

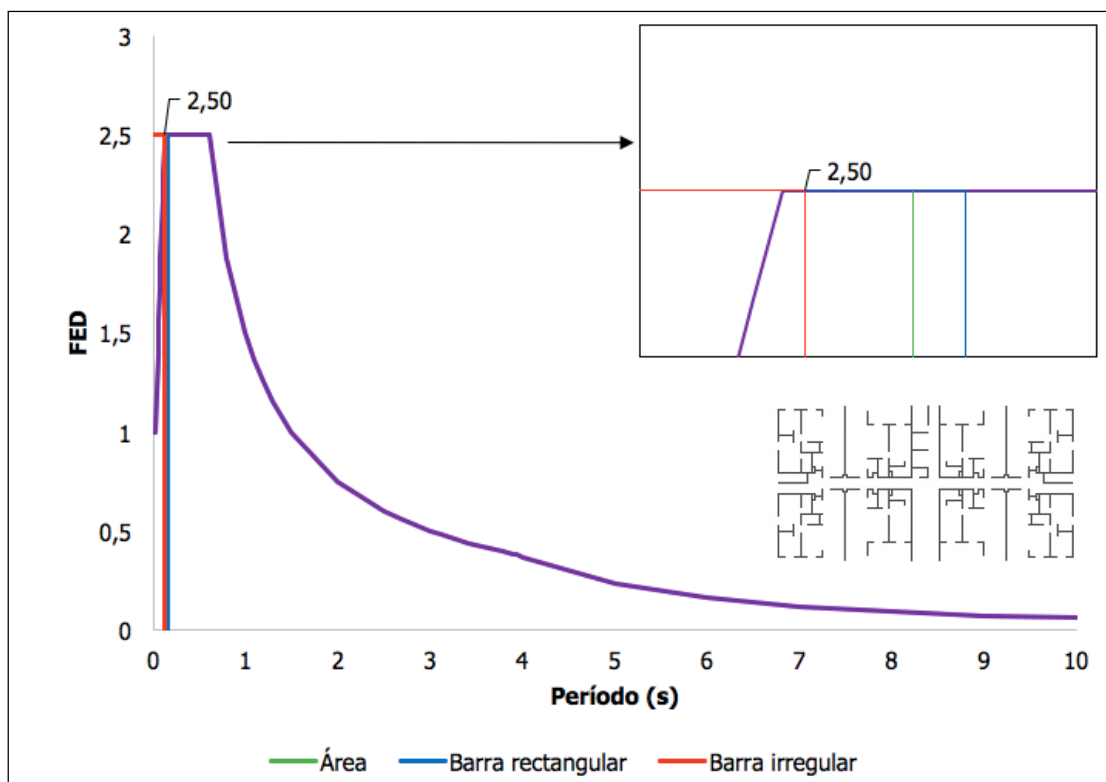


Figura 77. Factor espectral dinámico para Edificio G (5 niveles) en la dirección "X"

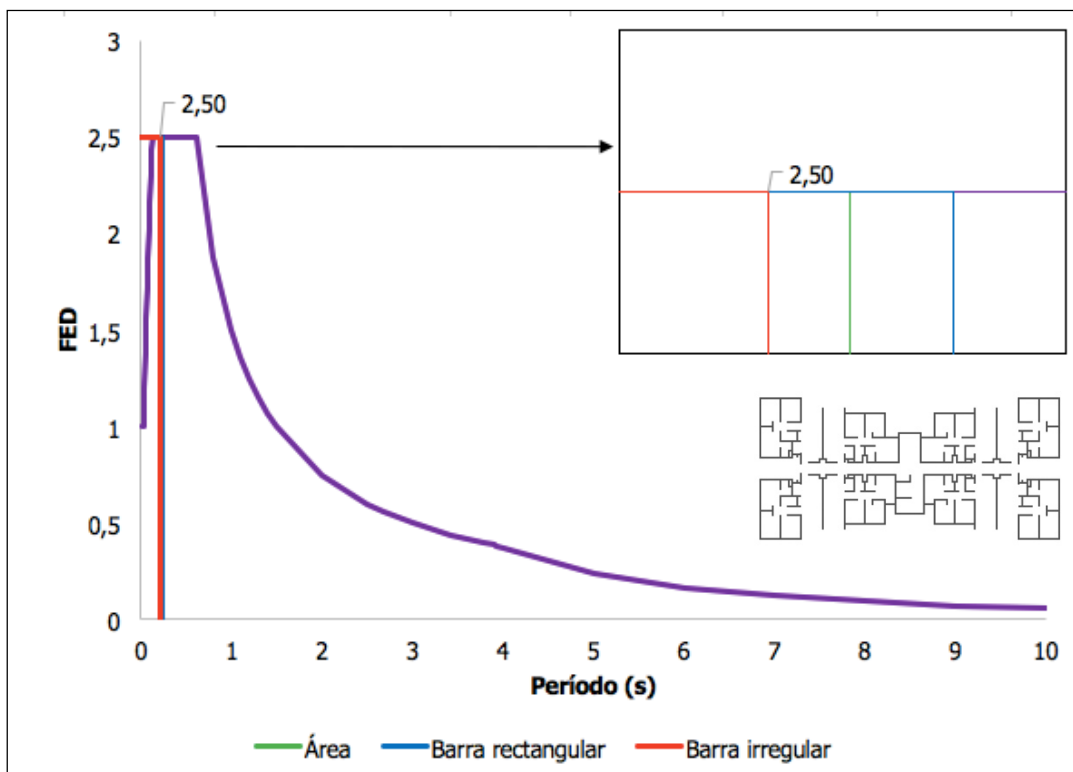


Figura 78. Factor espectral dinámico para Edificio H (10 niveles) en la dirección "X"

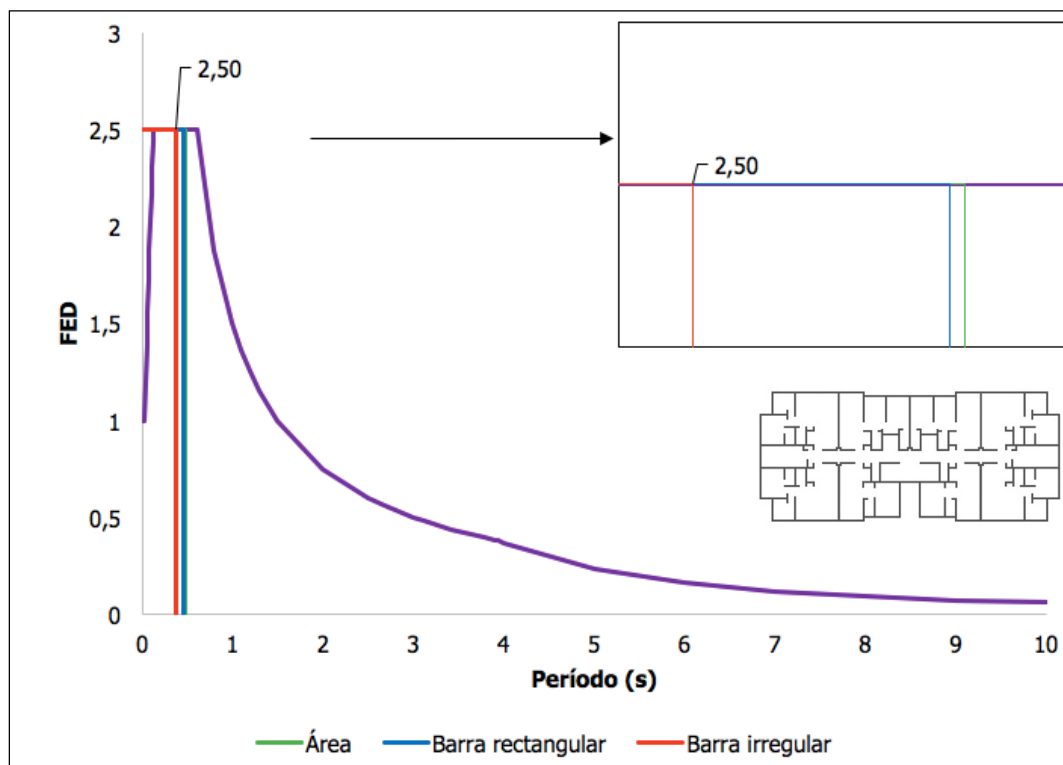


Figura 79. Factor espectral dinámico para Edificio I (15 niveles) en la dirección "X"

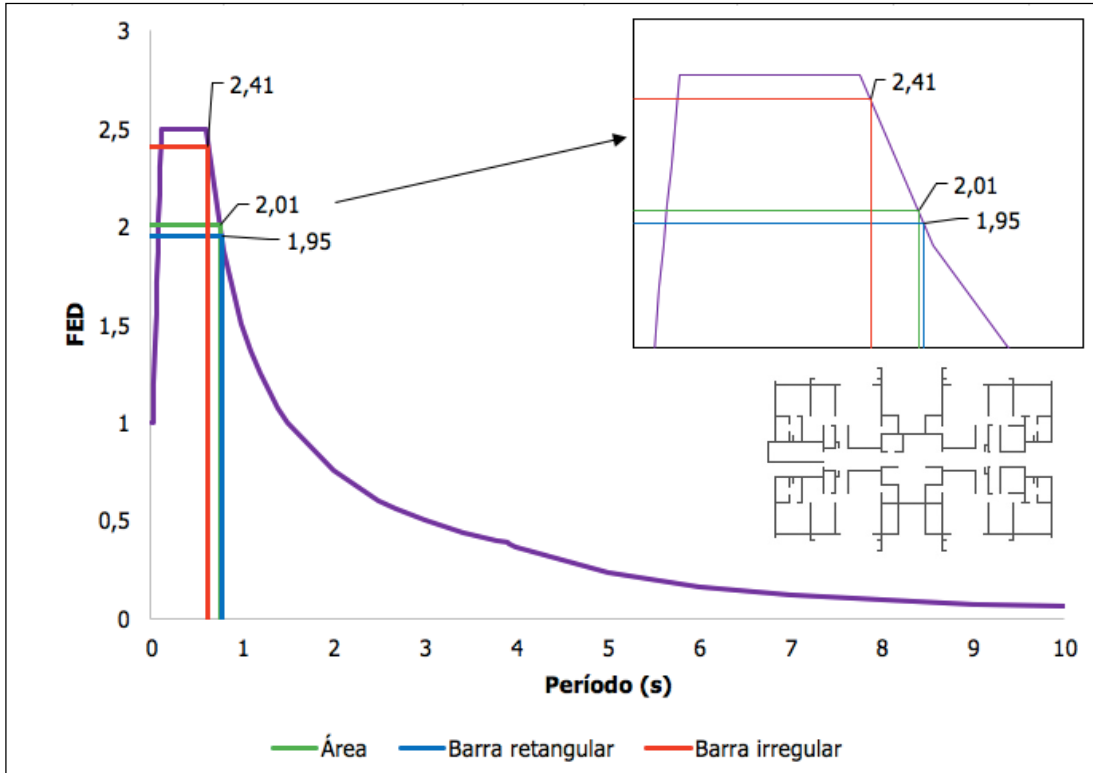


Figura 80. Factor espectral dinámico para Edificio J (20 niveles) en la dirección "Y"

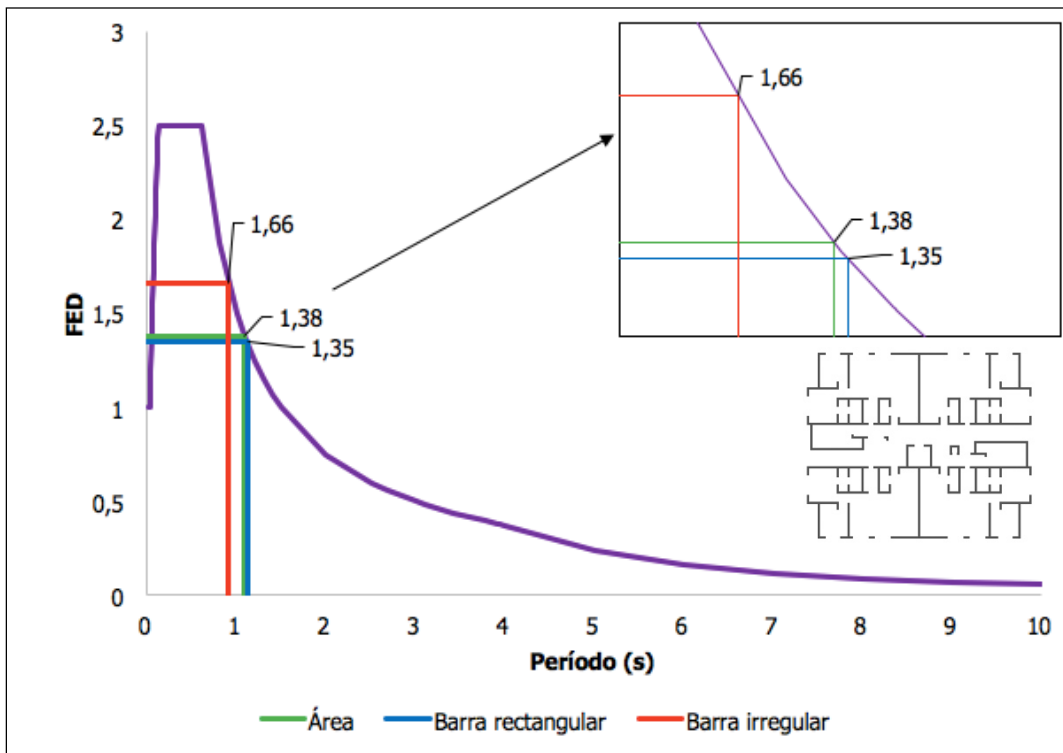


Figura 81. Factor espectral dinámico para Edificio K (25 niveles) en la dirección "X"

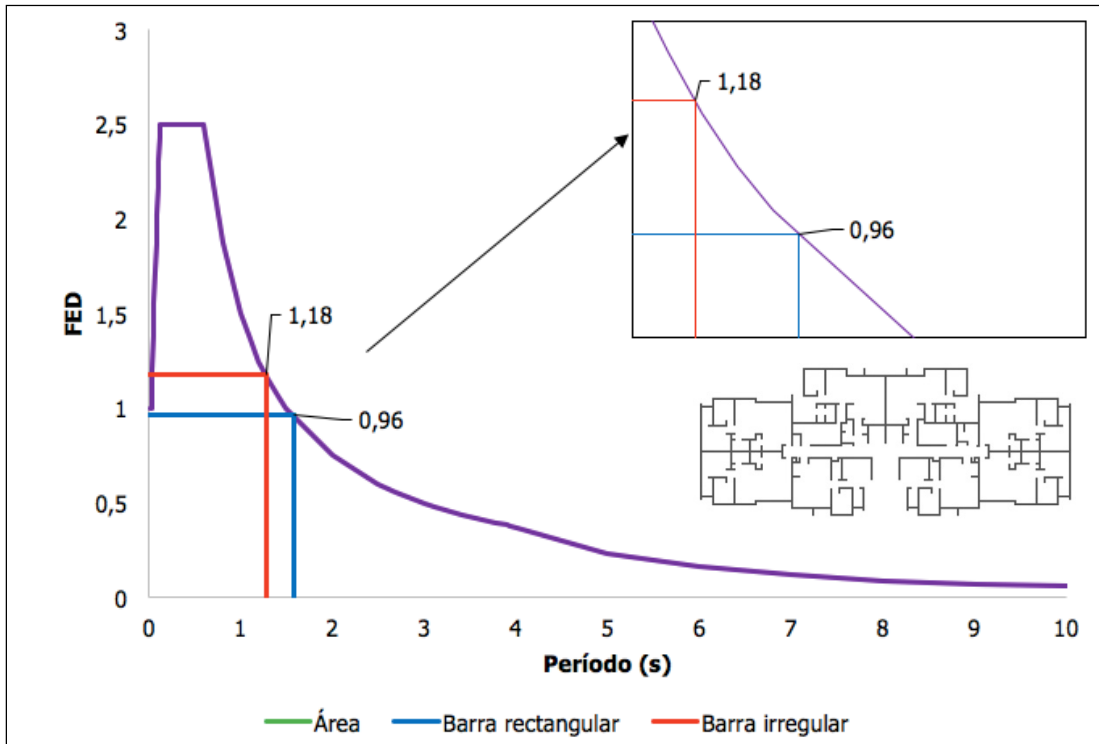


Figura 82. Factor espectral dinámico para Edificio L (30 niveles) en la dirección "Y"

Como puede observarse, para el caso de los Edificios G, H e I (Figuras 77, 78 y 79) los valores del período se encuentran dentro de la zona del plató del espectro, por lo que las diferencias porcentuales obtenidas para los períodos a través de cada técnica no inciden en el valor del FED.

En contraparte, para el Edificio J (Figura 80), se muestra un valor de FED de 2,41 para el modelo construido a través de elementos tipo barra de sección transversal irregular, mientras que el modelo elaborado con elementos tipo área se alcanzó un valor de FED de 2,01. Finalmente, se observa un valor de FED de 1,95 para el modelo construido con elementos tipo barra de sección transversal rectangular, es decir a través de esta última técnica se obtuvo un valor más cercano al valor considerado como "real" (FED obtenido para modelo de elementos tipo área), la cual es una tendencia que se repite en las Figuras 81 y 82 y que también se presentó en los edificios ficticios. Los Cuadros 25 y 26 resumen estos valores.

Cuadro 25. FED para modelos de elementos tipo barra rectangular (reales)

Factor espectral dinámico (FED)							
Edificio	Cantidad de niveles	Modelo: Área		Modelo: Barra rectangular		% Diferencia	
		X	Y	X	Y	X	Y
G	5	2,50	2,33	2,50	2,41	0,00%	3,43%
H	10	2,50	2,50	2,50	2,50	0,00%	0,00%
I	15	2,50	2,50	2,50	2,50	0,00%	0,00%
J	20	2,49	2,01	2,39	1,95	-4,02%	-2,99%
K	25	1,38	1,15	1,35	1,15	-2,17%	0,00%
L	30	1,73	0,96	1,67	0,96	-3,47%	0,00%

Cuadro 26. FED para modelos de elementos tipo barra irregular (reales)

Factor espectral dinámico (FED)							
Edificio	Cantidad de niveles	Modelo: Área		Modelo: Barra rectangular		% Diferencia	
		X	Y	X	Y	X	Y
G	5	2,50	2,33	2,5	2,1	0,00%	-9,87%
H	10	2,50	2,50	2,5	2,5	0,00%	0,00%
I	15	2,50	2,50	2,5	2,5	0,00%	0,00%
J	20	2,49	2,01	2,5	2,41	0,40%	19,90%
K	25	1,38	1,15	1,73	1,49	25,36%	29,57%
L	30	1,73	0,96	1,87	1,18	8,09%	22,92%

- **Cortantes y momentos basales**

Los Cuadros 27 y 28 muestran la comparación de cortantes y momento basales obtenidos a través de los modelos de elementos tipo área y elementos tipo barra de sección transversal rectangular.

Cuadro 27. Cortantes basales para modelos de elementos tipo barra rectangular (reales)

Cortantes basales (ton)							
Edificio	Cantidad de niveles	Modelo: Área		Modelo: Barra rectangular		% Diferencia	
		Vx	Vy	Vx	Vy	Vx	Vy
G	5	4041	3754	4223	4002	4,51%	6,59%
H	10	7974	7626	8253	7769	3,49%	1,88%
I	15	9150	8708	9514	8782	3,98%	0,86%
J	20	13130	10200	12583	9944	-4,16%	-2,52%
K	25	5731	4935	5700	4959	-0,54%	0,50%
L	30	13704	9224	13762	9390	0,42%	1,81%

Cuadro 28. Momentos basales para modelos con elementos tipo barra rectangular (reales)

Momentos basales (ton-m)										
Edificio	Cantidad de niveles	Modelo: Área			Modelo: Barra irregular			% Diferencia		
		Mx	My	Mz	Mx	My	Mz	Mx	My	Mz
G	5	40482	43457	77830	42842	44761	83180	5,83%	3,00%	6,87%
H	10	160420	164718	158537	162242	167830	161251	1,14%	1,89%	1,71%
I	15	268271	277199	161308	269402	283730	162973	0,42%	2,36%	1,03%
J	20	412599	533015	204939	399106	507237	204767	-3,27%	-4,84%	-0,08%
K	25	227514	276427	59736	227971	272591	59476	0,20%	-1,39%	-0,44%
L	30	470575	802873	212747	473778	799644	216780	0,68%	-0,40%	1,90%

Como puede apreciarse, al igual que en los edificios ficticios, las diferencias en cortantes y momentos basales obtenidos para estructuras reales a través del modelado con elementos tipo barra de sección transversal rectangular poseen valores que son aceptables tomando en cuenta la incertidumbre que posee el cálculo de la fuerza sísmica y las magnitudes manejadas en el ámbito de la ingeniería civil, llegando a una diferencia máxima de +6,59% y +5,83% para el cortante y momento basal respectivamente.

Por otro lado, en los Cuadros 29 y 30 se muestran los resultados de cortantes y momentos basales para los modelos construidos a través de elementos tipo barra de sección transversal irregular.

Cuadro 29. Cortantes basales para modelos de elementos tipo barra irregular (reales)

Cortantes basales (ton)							
Edificio	Cantidad de niveles	Modelo: Área		Modelo: Barra irregular		% Diferencia	
		Vx	Vy	Vx	Vy	Vx	Vy
G	5	4041	3754	4017	3497	-0,59%	-6,87%
H	10	7974	7626	7709	7768	-3,32%	1,87%
I	15	9150	8708	8971	8713	-1,96%	0,06%
J	20	13130	10200	13048	11582	-0,62%	13,55%
K	25	5731	4935	6985	6051	21,89%	22,63%
L	30	13704	9224	15343	10472	11,96%	13,53%

Cuadro 30. Momentos basales para modelos de elementos tipo barra irregular (reales)

Momentos basales (ton-m)										
Edificio	Cantidad de niveles	Modelo: Área			Modelo: Barra irregular			% Diferencia		
		Mx	My	Mz	Mx	My	Mz	Mx	My	Mz
G	5	40482	43457	77830	37169	43449	72629	-8,18%	-0,02%	-6,68%
H	10	160420	164718	158537	162079	161229	160108	1,03%	-2,12%	0,99%
I	15	268271	277199	161308	268271	271645	161408	0,00%	-2,00%	0,06%
J	20	412599	533015	204939	474487	527340	251551	15,00%	-1,06%	22,74%
K	25	227514	276427	59736	292936	344494	68894	28,76%	24,62%	15,33%
L	30	470575	802873	212747	568834	910271	241070	20,88%	13,38%	13,31%

Para el modelado de edificios reales a través de elementos tipo barra de sección transversal irregular, se observa que en el caso específico de los Edificios G, H e I pese a que se obtuvieron períodos con diferencias de hasta un -22,66%, dichos períodos se encuentran en la zona del plató del espectro de respuesta, por lo que finalmente dicha variable no incide significativamente en las fuerzas de sismo como sucede en otros modelos, donde se observan diferencias de hasta +22,63% y +28,76% para el cortante y momento basal respectivamente. Por lo que, al igual que para los edificios ficticios, el modelado de edificios reales a través de elementos tipo barra de sección transversal irregular provoca que se sobreestimen las fuerzas basales en la estructura.

Finalmente, en las Figuras 83, 84, 85 y 86 se aprecia gráficamente las diferencias anteriormente expuestas, obsérvese como en los edificios de 20, 25 y 30 niveles, las diferencias en las fuerzas de la base se incrementan sustancialmente, alcanzando valores cercanos al +30% cuando se utiliza elementos tipo barra de sección transversal irregular.

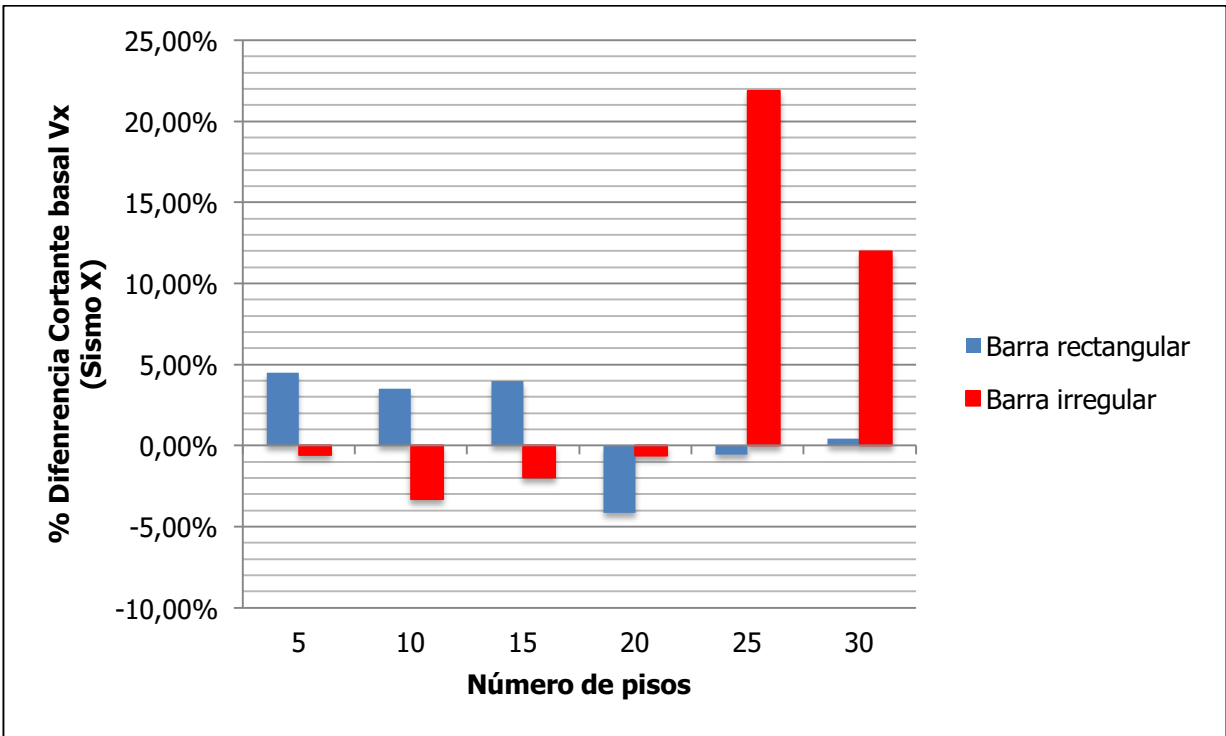


Figura 83. Diferencias porcentuales para cortante "Vx" (modelos de geometría real)

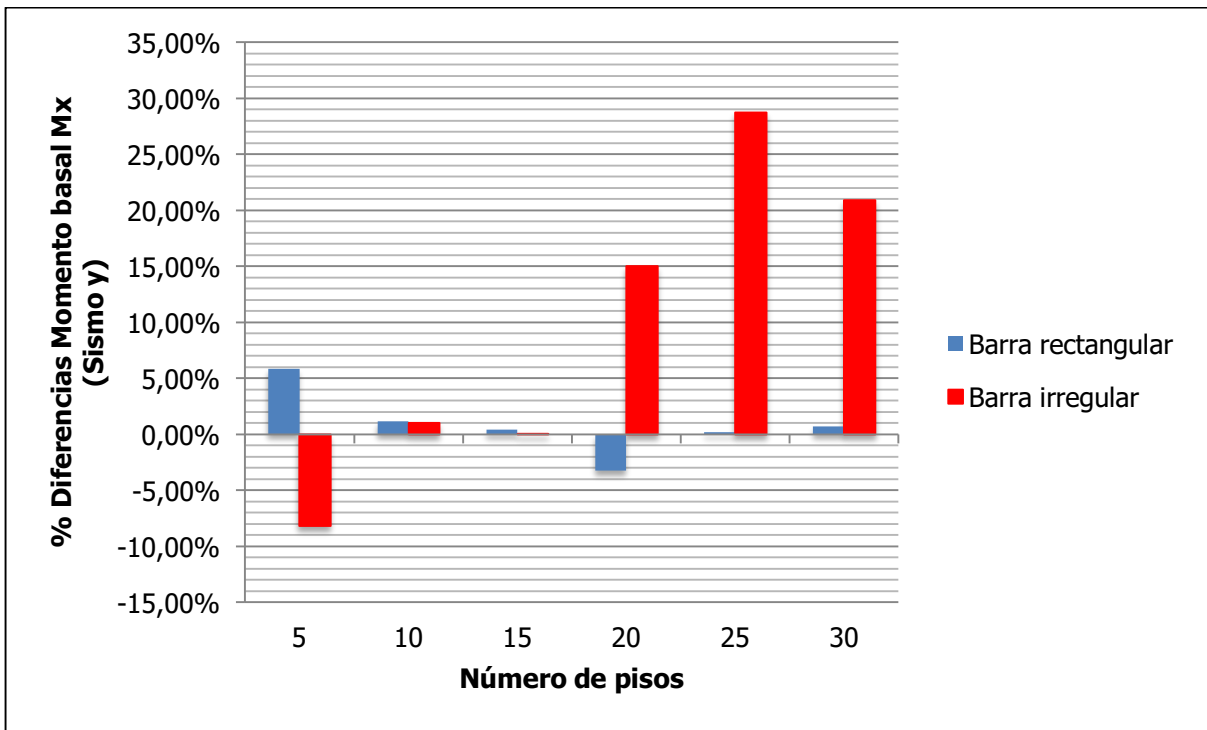


Figura 84. Diferencias porcentuales para flexión "Mx" (modelos de geometría real)

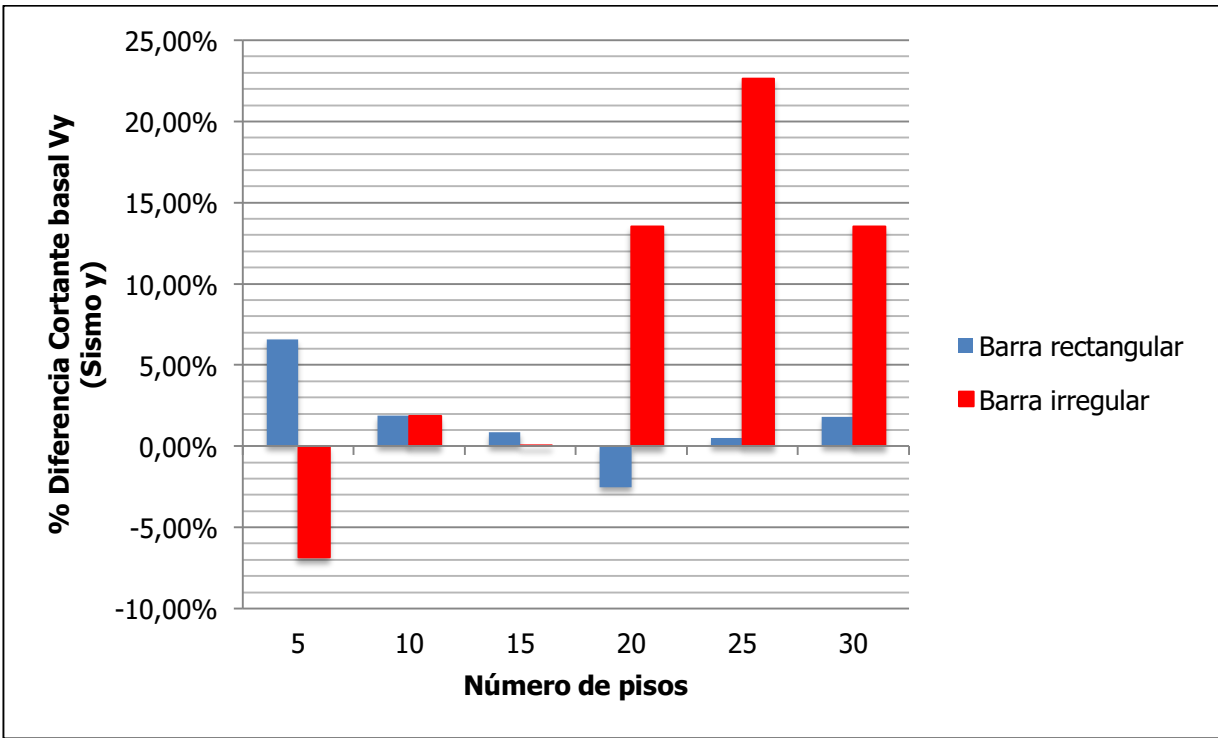


Figura 85. Diferencias porcentuales para cortante "Vy" (modelos de geometría real)

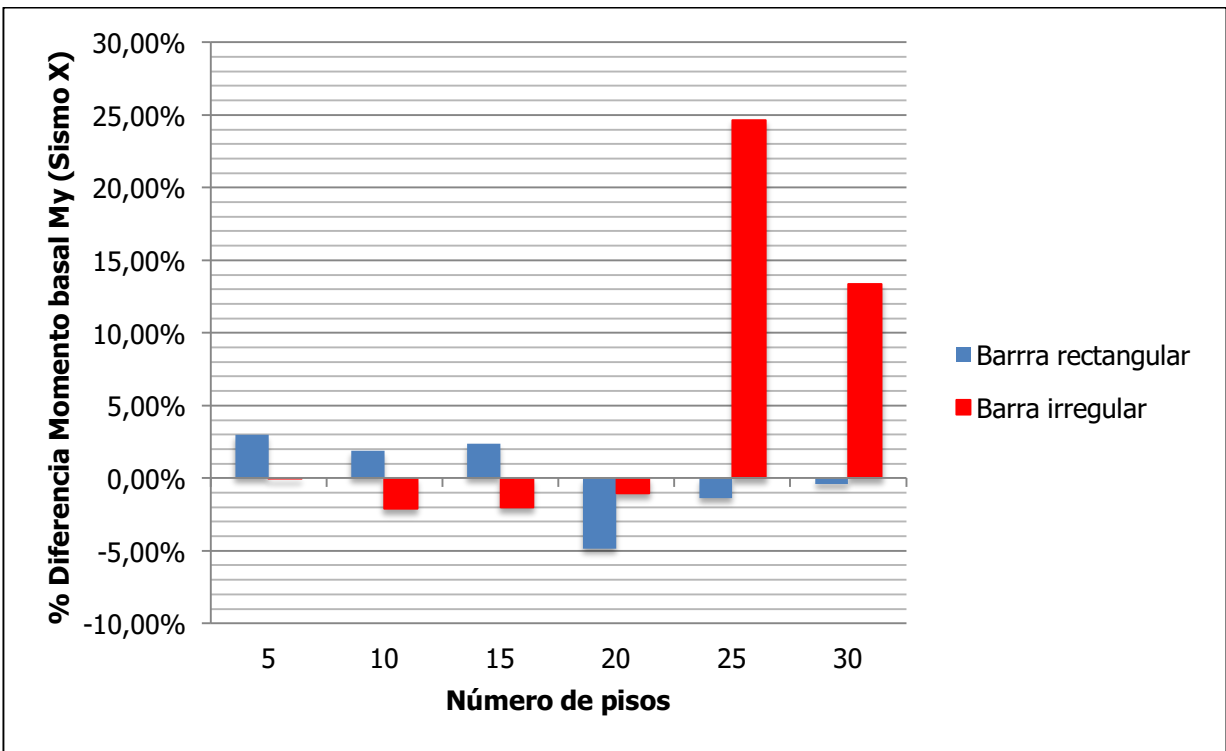


Figura 86. Diferencias porcentuales para flexión "My" (modelos de geometría real)

- **Deformadas y derivas**

Al igual que sucedió en los edificios ficticios, la deformada mostrada para los modelos de elementos tipo barra de sección transversal irregular presenta un comportamiento más rígido, mientras que el caso de los modelos de elementos tipo barra de sección transversal rectangular se muestran como modelos más flexibles (ver Figuras 87, 88, 89, 90, 91 y 92).

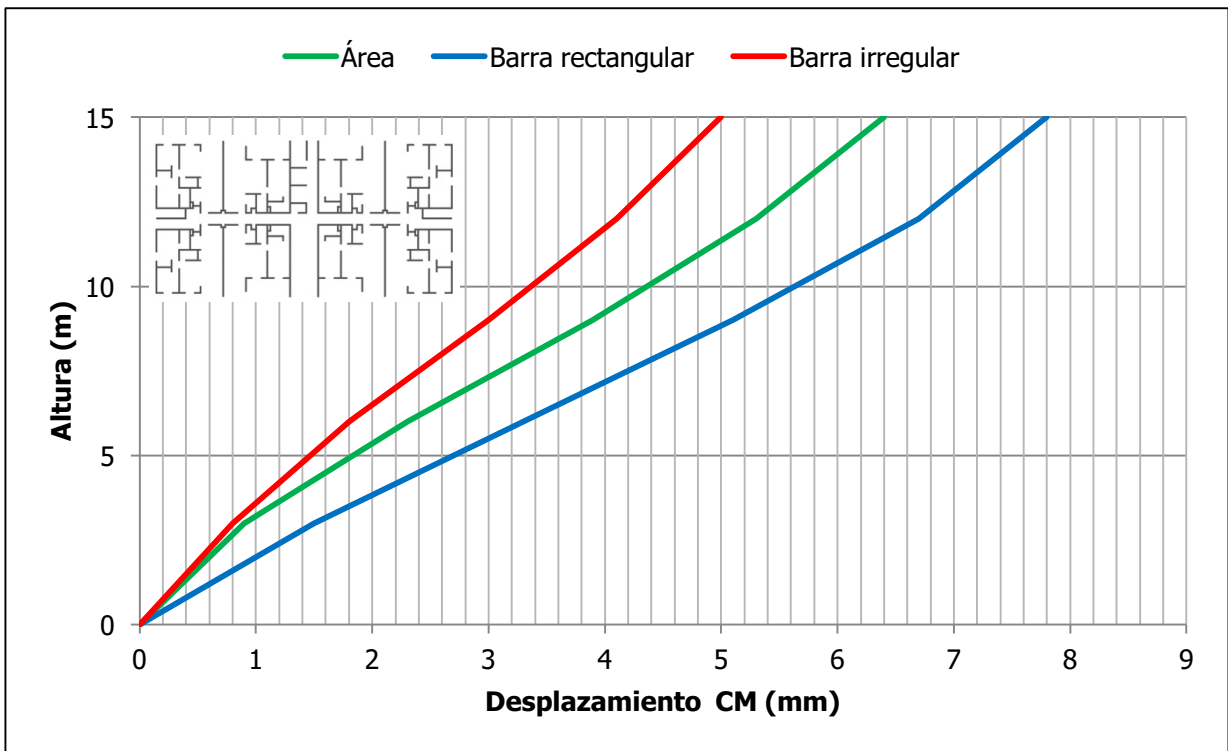


Figura 87. Deformada en X para Edificio G (5 niveles)

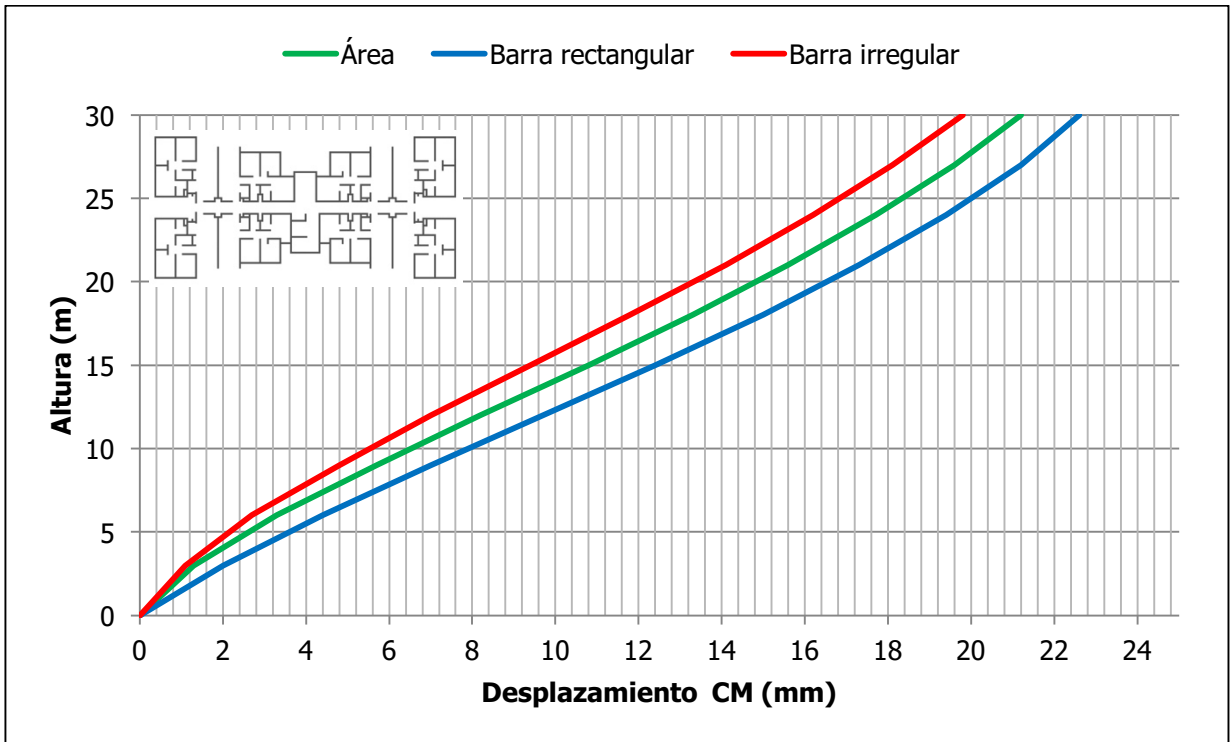


Figura 88. Deformada en X para Edificio H (10 niveles)

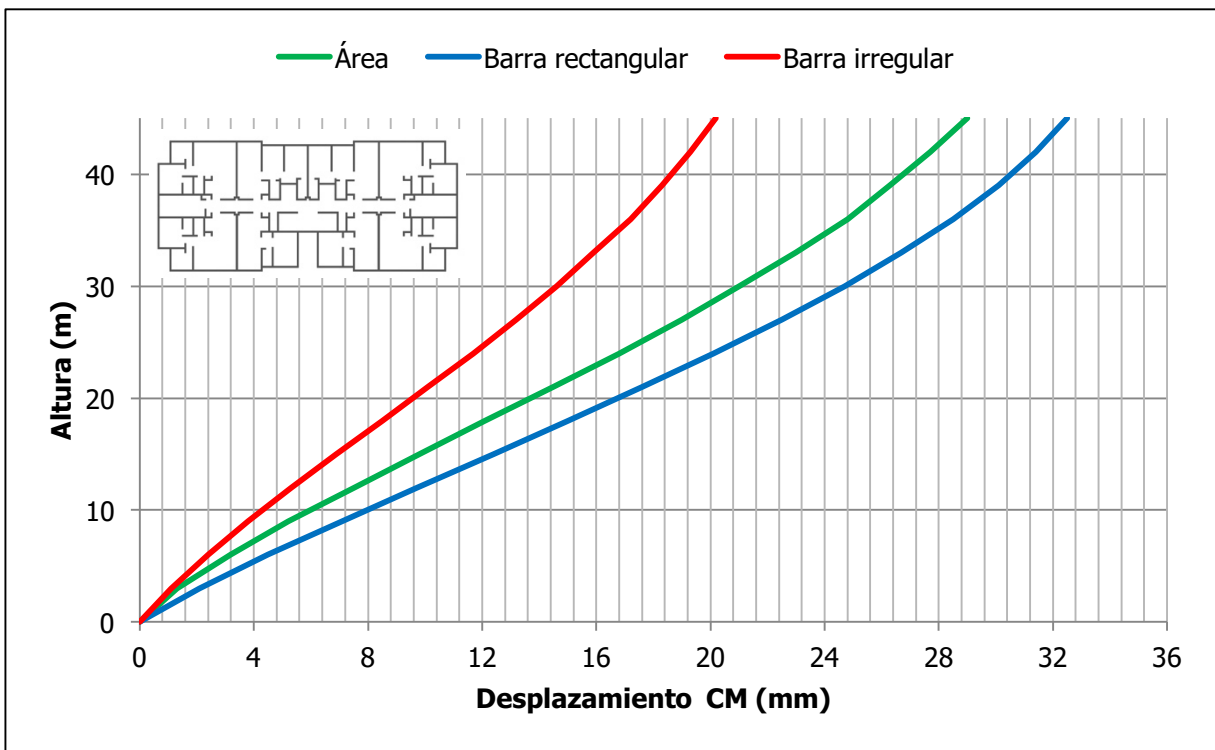


Figura 89. Deformada en X para Edificio I (15 niveles)

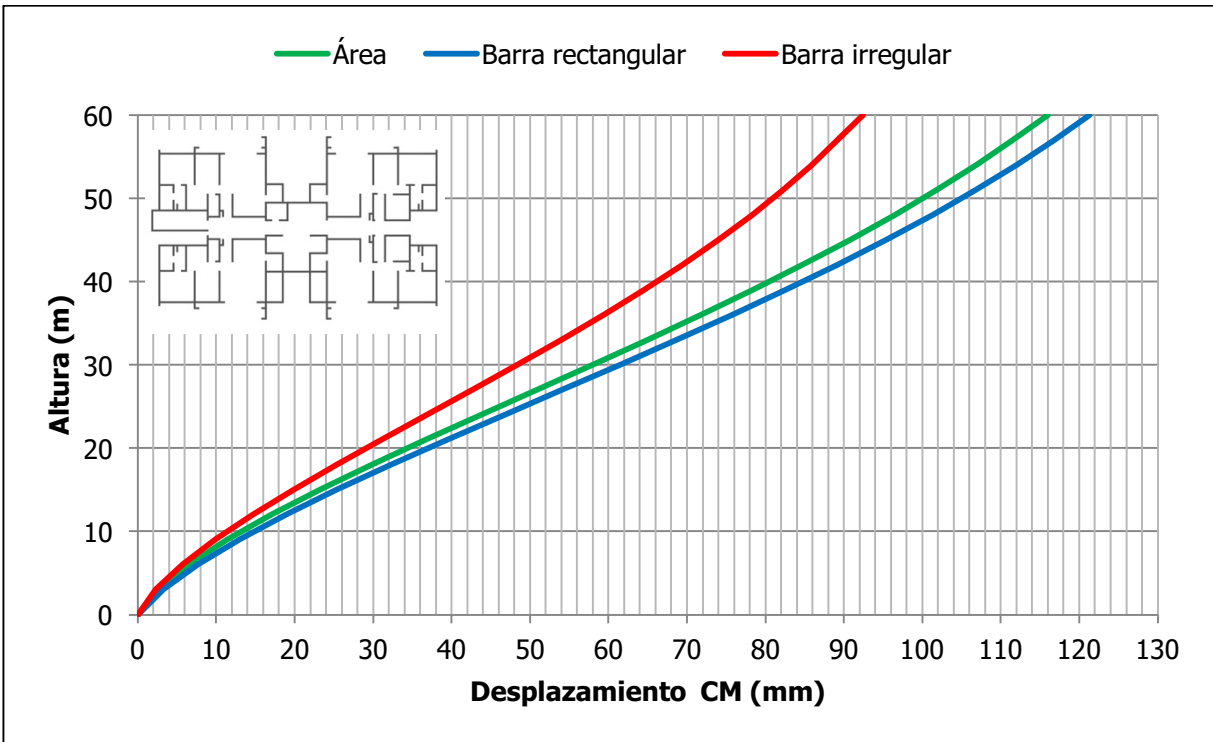


Figura 90. Deformada en X para Edificio J (20 niveles)

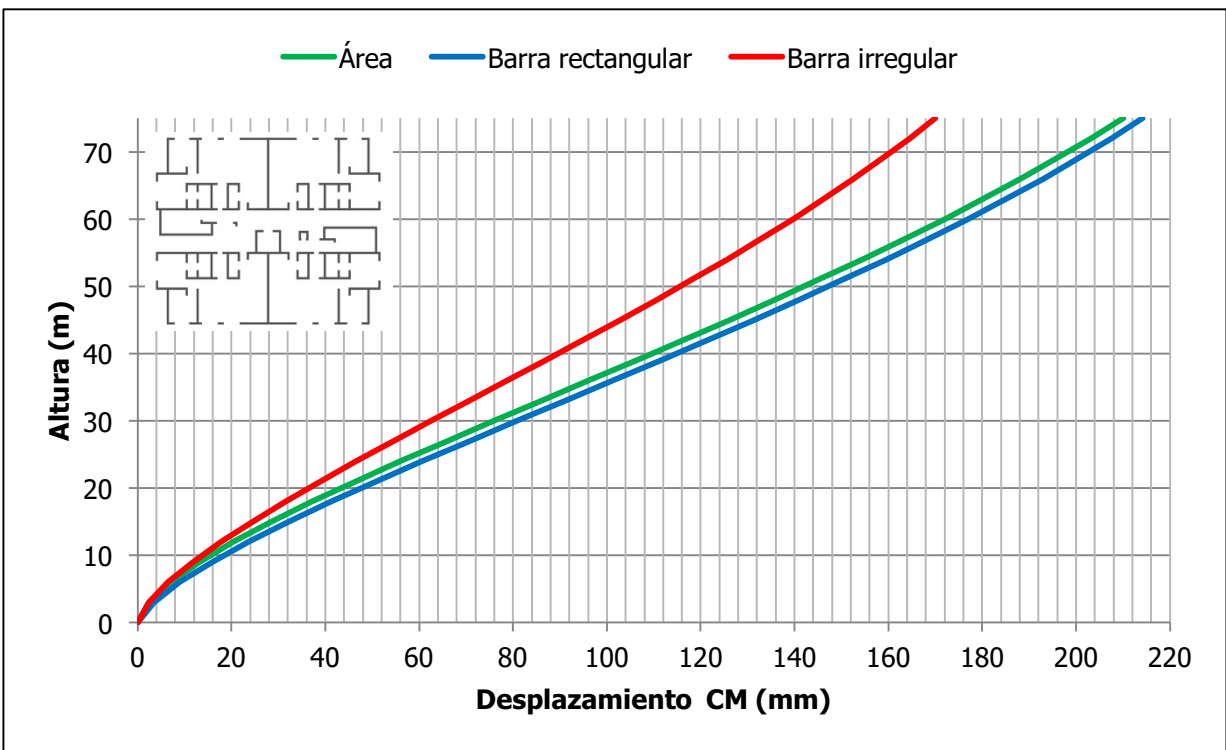


Figura 91. Deformada en X para Edificio K (25 niveles)

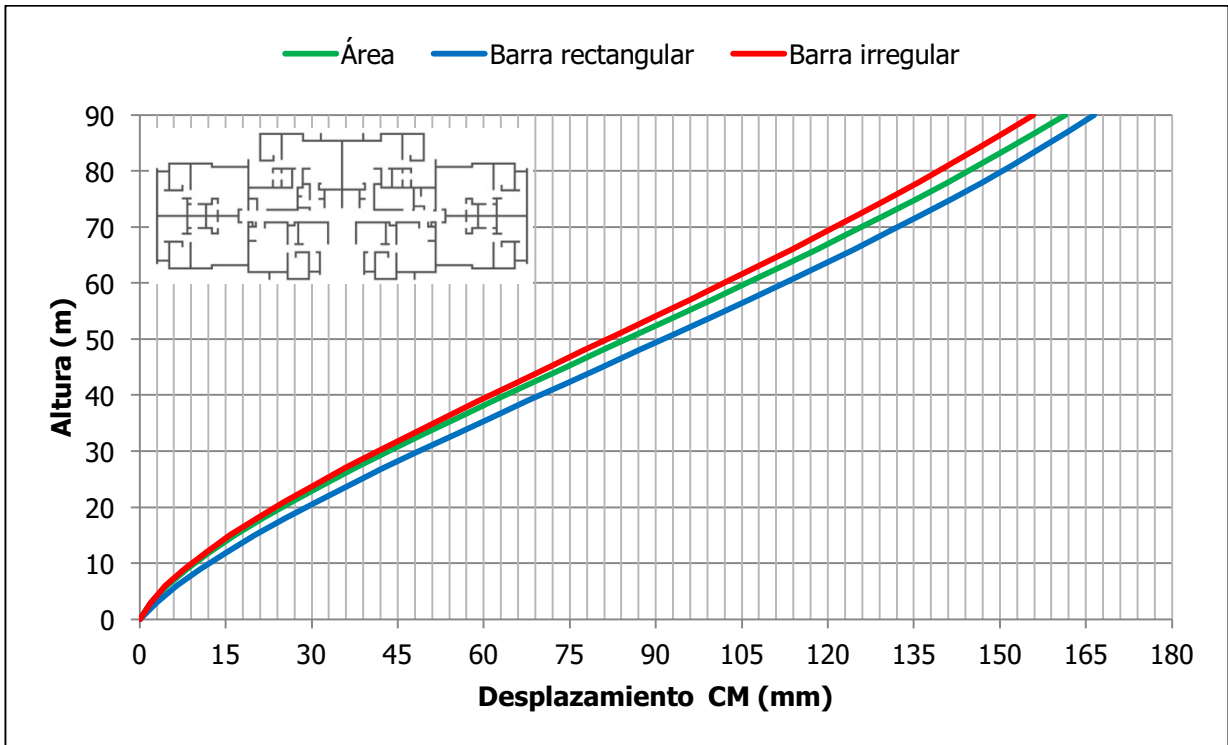


Figura 92. Deformada en X para Edificio L (30 niveles)

Finalmente, los Cuadros 31 y 32 muestran las derivadas arrojadas por los modelos de elementos tipo barra de sección transversal rectangular e irregular en comparación con los modelos de elementos tipo área.

Cuadro 31. Derivas para modelos con elementos de tipo barra rectangular (reales)

Derivas							
Edificio	Cantidad de niveles	Modelo: Área		Modelo: Barra rectangular		% Diferencia	
		X	Y	X	Y	X	Y
G	5	0,00053	0,00017	0,00060	0,00020	12,50%	20,00%
H	10	0,00087	0,00027	0,00090	0,00027	3,85%	0,50%
I	15	0,00080	0,00023	0,00090	0,00027	12,50%	14,29%
J	20	0,00237	0,00073	0,00247	0,00074	4,23%	0,34%
K	25	0,00337	0,00107	0,00340	0,00107	0,99%	0,25%
L	30	0,00213	0,00063	0,00217	0,00067	1,56%	5,26%

Cuadro 32. Derivas para modelos con elementos de tipo irregular (reales)

Derivas							
Edificio	Cantidad de niveles	Modelo: Área		Modelo: Barra irregular		% Diferencia	
		X	Y	X	Y	X	Y
G	5	0,00053	0,00017	0,00040	0,00013	-25,00%	-20,00%
H	10	0,00087	0,00027	0,00080	0,00023	-7,69%	-12,50%
I	15	0,00080	0,00023	0,00053	0,00017	-33,33%	-28,57%
J	20	0,00237	0,00073	0,00193	0,00060	-18,31%	-18,18%
K	25	0,00337	0,00107	0,00270	0,00093	-19,80%	-12,50%
L	30	0,00213	0,00063	0,00207	0,00063	-3,13%	0,00%

Como puede apreciarse, para el caso de los edificios reales las diferencias que se pueden obtener entre las derivas cuando se utiliza una metodología u otra aumentaron significativamente en comparación con los edificios ficticios. En el caso de los elementos tipo barra de sección transversal rectangular se obtienen diferencias de hasta +20,00%, mientras que en el caso de modelos elaborados con elementos tipo barra de sección transversal irregular arrojan diferencias de hasta -33,33%, en cuyo caso se estaría subestimando significativamente la flexibilidad de la estructura en comparación con modelos de elementos tipo área.

Como se mencionó anteriormente, usualmente las razones de derivas de los edificios tipo muro no son el parámetro que rige el diseño de estas estructuras, por lo que los resultados anteriores no serían significativos en el diseño de dichas edificios a partir de los tipos de modelado estudiados en este trabajo.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones para edificios ficticios

- Los períodos obtenidos para las direcciones "X" y "Y" a través de los modelos de elementos tipo barra con sección transversal rectangular, arrojan una diferencia máxima de +6,33% en comparación con valores arrojados por modelos elaborados con elementos tipo área. Este es un indicativo de la rigidez, de modo que ambos modelos tienen una rigidez global lateral similar.
- En el caso de los modelos compuestos por elementos tipo barra con sección transversal irregular, se pueden llegar a obtener reducciones del período hasta en un -25,41% en las direcciones "X" y "Y" en comparación con modelos de elementos tipo área, lo que implica que los modelos con barra irregular son más rígidos lateralmente.
- No existen tendencias en cuanto a la estimación del período principal del modo rotacional "RZ" a través de ambas técnicas.
- En general las masas participativas que se pueden obtener en las direcciones "X" y "Y" utilizando elementos tipo barra de sección transversal rectangular e irregular son mayores que cuando se construyen los modelos a partir de elementos tipo área, llegando a diferencias máximas de +3,30% y +5,76% respectivamente. En el caso del primer modo rotacional se puede obtener diferencias de hasta -4,72% y -5,52% a través de ambas técnicas.
- En términos de fuerzas cortantes y momentos basales, los modelos de elementos tipo barra con sección transversal rectangular arrojan fuerzas de sismo cuyos porcentajes de diferencia respecto a modelos elaborados con elementos tipo área son aceptables, tomando en cuenta la incertidumbre manejada en el cálculo de la fuerza sísmica, obteniéndose diferencias de -1,41% y -2,46% en el cortante y momento basal respectivamente, por lo que para fines prácticos los valores de cortantes y momentos en la base obtenidos con estos modelos son iguales.
- Si se analizan edificios de tipo muro a través de elementos de tipo barra de sección transversal irregular se pueden obtener fuerzas de sismo mayores hasta en un +18,00% y +34,52% para cortante y momento basal, lo que repercutiría en mayores costos constructivos. Recordando que debe comprobarse que los elementos tipo área son los adecuados para modelar muros, garantizando que por el contrario con este tipo de

modelado no se estén subestimando las fuerzas de sismo ni provocando el incumplimiento de factores de seguridad contra vuelco y deslizamiento.

5.2. Conclusiones para edificios reales

- Los períodos obtenidos para las direcciones "X" y "Y" a través de los modelos de elementos tipo barra con sección transversal rectangular, arrojan una diferencia máxima de +6,54% en comparación con valores arrojados por modelos elaborados con elementos tipo área. Este es un indicativo de la rigidez, de modo que ambos modelos tienen una rigidez global lateral similar.
- En el caso de los modelos compuestos por elementos tipo barra con sección transversal irregular, se pueden llegar a obtener reducciones del período en las direcciones "X" y "Y" hasta en un -22,48% en comparación con modelos de elementos tipo área, lo que implica que los modelos con barra irregular son más rígidos lateralmente.
- En general, los períodos principales del modo rotacional "RZ" aumentan cuando se utiliza elementos tipo barra de sección transversal regular, llegando a una diferencia máxima de 12,77%.
- Los períodos principales del modo rotacional "RZ" disminuyen cuando se utilizan elementos tipo barra de sección transversal irregular, llegando a una diferencia máxima de -22,66%.
- En general las masas participativas que se pueden obtener en las direcciones "X" y "Y" utilizando elementos tipo barra de sección transversal rectangular e irregular son mayores que cuando se construyen los modelos a partir de elementos tipo área, llegando a diferencias máximas de +10,80% y +6,08% respectivamente. En el caso del primer modo rotacional se puede obtener diferencias de hasta +8,02% y -9,78% a través de ambas técnicas.
- En términos de fuerzas cortantes y momentos basales, los modelos de elementos tipo barra con sección transversal rectangular arrojan fuerzas de sismo cuyos porcentajes de diferencia respecto a modelos elaborados con elementos tipo área son aceptables, tomando en cuenta la incertidumbre manejada en el cálculo de la fuerza sísmica, obteniéndose diferencias de +6,59% y +5,83% en el cortante y momento basal respectivamente, por lo que para fines prácticos los valores de cortantes y momentos en la base obtenidos con estos modelos son iguales.
- Si se analizan edificios de tipo muro a través de elementos de tipo barra de sección transversal irregular se pueden obtener fuerzas de sismo mayores hasta en un +22,63% y

+28,76% para cortante y momento basal, lo que repercutiría en mayores costos constructivos. Recordando que debe comprobarse que los elementos tipo área son los adecuados para modelar muros, garantizando que por el contrario con este tipo de modelado no se estén subestimando las fuerzas de sismo ni provocando el incumplimiento de factores de seguridad contra vuelco y deslizamiento.

5.3. Conclusiones generales

- Tomando como "correcta" la metodología de modelado con elementos tipo área, la estimación de períodos principales en las direcciones "X" y "Y" al utilizar elementos tipo barra con sección transversal irregular es menos precisa que cuando se definen dichos elementos con secciones transversales rectangulares.
- A nivel de desplazamientos y deformadas, la metodología de modelado a través de elementos tipo barra con sección transversal rectangular conforman modelos más flexibles que los de área, mientras que en el caso de los elementos tipo barra con sección transversal irregular el modelo adquiere mayor rigidez.
- Las razones derivadas obtenidas en modelos de elementos tipo barra con sección transversal rectangular son mayores que cuando se utilizan elementos de tipo área, caso contrario sucede cuando se utilizan elementos de tipo irregular. Pese a que en ambos casos las diferencias pueden llegar a ser considerables y no es un parámetro que usualmente rijan el diseño, no se aconseja el uso de elementos irregulares para la obtención de estas respuestas debido a que se estaría subestimando la flexibilidad de la estructura.
- Los factores espectrales dinámicos (FED) y fuerzas de sismo obtenidos a través de modelos elementos de tipo barra con sección transversal irregular son mayores que en modelos de elementos tipo barra con sección transversal rectangular o de tipo área.
- En general, las respuestas estructurales que se pueden obtener a través de elementos de tipo barra con sección transversal rectangular se aproximan considerablemente a los resultados obtenidos a través de modelos de elementos tipo área, por lo que se podrían modelar edificios de tipo muro de hasta 30 niveles con ambas metodologías sin esperar diferencias significativas entre ambas técnicas.

5.4. Recomendaciones para el modelado de edificios de tipo muro

- Desde el punto de vista práctico, se recomienda el modelado a través de elementos de tipo área para la construcción de modelos de edificios de tipo muro en el programa computacional *ETABS*. Por otro lado, teóricamente el uso de elementos tipo área representa mejor la realidad del comportamiento de muros, debido a las limitaciones que presenta la teoría de Euler-Bernoulli en cuanto a estos elementos.
- Si por algún motivo particular, durante el análisis de un edificio de tipo muro no se puede hacer uso de elementos tipo área, se recomienda utilizar elementos de tipo barra con secciones transversales regulares con el fin de obtener las respuestas estructurales, considerando que se obtuvieron diferencias menores al 7% entre las respuestas estructurales.
- No se recomienda el modelado a través de elementos tipo barra con secciones transversales irregulares, dado que representa estructuras de mayor costo para edificios de más de 15 niveles.
- Durante la etapa de ejecución de cada una de las técnicas se sugiere el acompañamiento de una herramienta de dibujo CAD para la agilización del modelado.

5.5. Recomendaciones generales del trabajo

- Se recomienda continuar la línea de investigación desarrollada, enfocándola al impacto que tiene el uso de estas técnicas en una etapa posterior de diseño, de manera que se puedan comparar cuantías de refuerzo necesarias en muros cuando se utilizan cada una de las técnicas para la obtención de fuerzas.
- Se sugiere que este proyecto se complemente con el modelado de más edificios, de manera que se puedan consolidar las conclusiones ya obtenidas durante la realización de este trabajo.
- Así mismo se insta a estudiar la incidencia del grado de discretización de los elementos tipo área en los resultados obtenidos a partir de un análisis modal, de forma que se pueda comparar las respuestas estructurales de modelos sin discretizar, y modelos que vayan aumentando progresivamente el grado de discretización hasta que los resultados converjan.

5. Referencias Bibliográficas

- Cook, R., Malkus, D., & Plesha, M. (1988). *Concepts and applications of finite element analysis*. Wisconsin: Wiley.
- Sergio, L., & Andrea, P. (2013). An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings. *Engineering Structures Journal*, 56, 2-13.
- Computers and Structures Inc. (2002). *Concrete shear wall design manual*. California.
- Computers and Structures Inc. (2015). *CSI Analysis reference manual*. California.
- Ali, A., & Hassan, J. (2011). Shear wall analysis using framework method: comparison with shell element method and column analogy. *Engineering and tech journal*, 31, 3-13.
- Chelariu, O., & Budescu, M. (2011). *Errors in concrete shear wall elastic structural modeling*. Iași: Institutio Politécnico de Iași.
- Bolander, J. (1991). Finite element modeling of shear wall-dominant buildings. *Journal of Structural Engineering*, 117, 1-21.
- Galal, K., & Sokkary, E. (2008). Advancement in modeling of shear walls. *14th World Conference on Earthquake Engineering*, (págs. 1-12). Beijing.
- Marijana, H., & Dragan, M. (2015). Comparison of fundamental periods of reinforced shear wall dominant building models with empirical expressions. *Tehnički Vjesnik Journal*, 22, 1-10.
- Sedgh, R., & A, C. (2015). State of the art: challenges in analytical modelling of multi-storey shear wall buildings. *Annual Technical Conference.*, (págs. 1-7). Rotorua.
- Tan, M., & Kubin, J. (2008). Comparison of practical approaches for modelling shearwalls in structural analyses of buildings. *14th World Conference on Earthquake Engineering*, (págs. 1-8). Beijing.
- Chocano, A. (2003). *Análisis estructural por el método matricial. Conceptos y aplicaciones*. San José. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. (Revisión 2014). *Código Sísmico de Costa Rica 2010*. San José: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Jiménez, A. (2004). *Análisis y optimización con interacción de Dummy, de la carrocería del automóvil "Tubolare SAND CAR" de Tecnoidea SA de CV, en impacto frontal empleando el método de elementos finitos en ALGOR FEA, mediante la simulación de eventos mecánicos*. Puebla, México. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de las Américas Puebla.

Hibbeler, R. (2012). *Análisis estructural*. México: Pearson Educación.

Chopra, A. (2011). *Dinámica de estructuras*. California: Prentice Hall.

Chandrupatla, T., & Belegundu, A. (2011). *Introducción al Elemento Finito en Ingeniería*. Pennsylvania: Pearson.