IMPLEMENTACIÓN DEL LABORATORIO ESTRUCTURAL CON TRES MODELOS DIDÁCTICOS ESTRUCTURALES, PARA COMPRENDER RESPUESTAS MECÁNICAS ANTE DIFERENTES FUERZAS

DANIEL FELIPE GUZMÁN OVALLE
DAVID FERNANDO RAMÍREZ CHOCONTÁ

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2017

IMPLEMENTACIÓN DEL LABORATORIO ESTRUCTURAL CON TRES MODELOS DIDÁCTICOS ESTRUCTURALES, PARA COMPRENDER RESPUESTAS MECÁNICAS ANTE DIFERENTES FUERZAS

DANIEL FELIPE GUZMÁN OVALLE
DAVID FERNANDO RAMÍREZ CHOCONTÁ

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniero civil

Directora Proyecto
Ing. Marisol Nemocón Ruiz

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2017

creative commons

Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)
Para leer el texto completo de la licencia, visita:
http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/co/

Usted es libre de:

Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:

Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).

No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Compartir bajo la Misma Licencia — Si altera o transforma esta obra, o genera una obra derivada, sólo puede distribuir la obra generada bajo una licencia idéntica a ésta.

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado **“**IMPLEMENTACIÓN DEL LABORATORIO ESTRUCTURAL CON TRES MODELOS DIDÁCTICOS ESTRUCTURALES, PARA COMPRENDER RESPUESTAS MECÁNICAS ANTE DIFERENTES FUERZAS**”** Presentado por Daniel Guzmán Ovalle y, David Ramírez Chocontá en cumplimiento del requisito para optar el título de “Ingeniero Civil” fue aprobado por la directora.

_____
Firma del presidente del Jurado

_____
Firma del Jurado

_____
Firma del Jurado

Bogotá, Mayo de 2017

“Dedico esta tesis a mi mamá, Ana Celia Ovalle, y mi papá, Flavio Enrique Guzmán, quienes han sido mi apoyo para formarme en mi vida profesional, sentaron mis bases de responsabilidad y deseos de superación. A toda mi familia, hermanos y sobrinos, quienes siempre con su amor de familia me han apoyado para lograr esta y muchas metas más en mi vida. A mi novia Ivonne, quien siempre estuvo a mi lado para lograr esta meta.

Doy gracias a Dios por permitirme poder llegar a este nuevo logro, con mucha fortaleza, dedicación y sabiduría. A mi tutora de tesis, la ingeniera Marisol Nemocón, quien con su sabiduría, me ayudaron a lograr este proyecto.”

Daniel Felipe Guzmán Ovalle

“A la familia, quienes gracias a ellos me apoyaron en la culminación de mi carrera, a la Ingeniera Marisol Nemocón Ruiz por su ayuda en la elaboración de este documento.”

David Fernando Ramírez Chocontá

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios por permitirme tener una buena experiencia en la mi universidad y en la vida profesional, a la Universidad Católica de Colombia por permitirme convertir en un ser profesional en el campo de la ingeniería civil que es lo que más me apasiona, gracias a la Ingeniera Marisol, quien con su ayuda es parte integral de la formación de este proyecto. Gracias a mi padre, Flavio Enrique Guzmán, quien con su ayuda y sabiduría, me colaboro en parte del desarrollo de esta tesis.

Daniel Felipe Guzmán Ovalle.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por su ayuda en la educación que me brindaron, a la universidad Católica de Colombia donde pude convertirme en el profesional de hoy, a la Ingeniera Marisol Nemocón Ruiz, por su aporte a la elaboración de este documento, al Ingeniero Flavio Enrique Guzmán quien de manera desinteresada colaboró en la elaboración de este proyecto.

David Fernando Ramírez Chocontá.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 1
1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN 2
2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 4
3. OBJETIVOS 5
3.1 GENERAL 5
3.2 ESPECÍFICOS 5
4. ALCANCES Y LIMITACIONES 6
4.1 ALCANCE 6
4.2 LIMITACIÓN 6
5. MARCO DE REFERENCIA 7
5.1 MARCO HISTÓRICO 7
5.2MARCO TEÓRICO 16
5.2.1 Dinámica. 16
5.2.2 Acciones estructurales dinámicas. 17
5.2.3 Grados de libertad 18
5.2.4 Características dinámicas de una estructura 20
5.3 MARCO CONCEPTUAL 21
5.3.1 Análisis modal. 21
5.3.2 Respuesta a cargas variables en el tiempo. 22
5.3.3 Deformaciones de las estructuras 23
5.3.4 Elementos estructurales 25
5.4 MARCO LEGAL 28
5.4.1 Análisis sísmico de una estructura 29
5.4.2 Métodos de análisis 29
5.4.3 Efectos sísmicos en los elementos estructurales 31
6. METODOLOGÍA 32
6.1 DIMENSIONAMIENTO 32
6.2 CONSTRUCCIÓN PROTOTIPOS 32
6.3 SELECCIÓN Y MANIPULACIÓN DE EQUIPO 32

6.4 ANÁLISIS Y ELABORACIÓN DE GUÍAS DE LABORATORIO 32
7. DISEÑO GEOMÉTRICO PROTOTIPOS 34
7.1 PROTOTIPO MODOS DE VIBRACIÓN 34
7.2 PROTOTIPO BIDIMENSIONAL 36
7.3 PROTOTIPO TRIDIMENSIONAL 42
8. ANÀLISIS CONCEPTUAL DE LOS MODELOS 43
CONCLUSIONES 44
RECOMENDACIONES 45
BIBLIOGRAFIA 46
ANEXOS 48

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Historia de la ingeniería estructural.....7

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de única masa.....19
Figura 2. Modelo con tres grados de libertad.....20
Figura 3. Estructuras con múltiples grados de libertad 20
Figura 4. Modos de vibración.....21
Figura 5. Diagrama respuesta de una estructura.....22
Figura 6. Procedimiento verificación de derivas (NSR-10).....25
Figura 7. Armadura tipo Pratt.....26
Figura 8. Cables soportando cargas a tensión.....27
Figura 9. Arcos soportando cargas a compresión.....27
Figura 10. Pórtico o marco estructural 27
Figura 11. Estructura de 5 Niveles con rigidez tipo 1.....34
Figura 12. Estructura de 5 Niveles con rigidez tipo 2.....35
Figura 13. Pórtico bidimensional hipostático.....36
Figura 14. Pórtico bidimensional con riostras 37
Figura 15. Pórtico bidimensional con conexiones rígidas. 38
Figura 16. Pórtico bidimensional hiperestático configuración 1 39
Figura 17. Pórtico bidimensional hiperestático configuración 2 40
Figura 18. Pórtico bidimensional isostático.....41
Figura 19. Pórtico tridimensional Hiperestático.....42

GLOSARIO

APOYO ARTICULADO: Apoyo que restringe los desplazamientos de traslación, pero se permiten los giros de la estructura respecto de los ejes que pasan por ese punto.

APOYO EMPOTRADO: Apoyo que restringe todos los desplazamientos de traslación y todos los giros de la estructura respecto de los ejes que pasan por ese punto.

CARGA: Fuerza vertical que equivale a la suma del peso propio de la estructura y todos los elementos permanentes del edificio o estructura y/o fuerza a la que está sometida una estructura, que recibe cambios de intensidad y de posición.

DEFORMACIÓN: Cualquier magnitud relacionada de una u otra manera con cambios de la longitud de un cuerpo.

DERIVA: Deformación o desplazamiento horizontal entre dos puntos colocados en la misma línea vertical, en dos pisos o niveles consecutivos de la edificación.

DINÁMICA: Parte de la mecánica que estudia la relación entre el movimiento y las causas que lo producen (las fuerzas). El movimiento de un cuerpo es el resultado de las interacciones con otros cuerpos que se describen mediante fuerzas.

ESTÁTICA: Parte de la mecánica que estudia los cuerpos sobre los que actúan fuerzas y momentos cuyas resultantes son nulas, de forma que permanecen en reposo o en movimiento no acelerado.

ELEMENTO ESTRUCTURAL: Cualquier componente que conforma una estructura, el cual soporta cargas, como lo es la viga, losa, columna entre otras.

ESTRUCTURA HIPERESTÁTICA: Estructura para la cual las ecuaciones de estática son insuficientes para determinar las tensiones y reacciones, siendo necesario resolver el problema completo de desplazamientos incluyendo el comportamiento del material.

ESTRUCTURA HIPOSTÁTICA: Estructura para la cual las ecuaciones de estática son suficientes para determinar las tensiones y reacciones, con un grado de determinación inferior a cero.

ESTRUCTURA ISOSTÁTICA: Estructura para la cual las ecuaciones de estática son suficientes para determinar las tensiones y reacciones, con un grado de determinación igual a cero.

GRADO DE INDETERMINACIÓN: También llamado grado de hiperestaticidad es el número de fuerzas redundantes de la estructura, es decir, el número de fuerzas incógnita independientes que no pueden determinarse mediante las ecuaciones de equilibrio de la estructura, dado que el número de incógnitas estáticas excede el número total de ecuaciones de equilibrio disponibles.

GRADO DE LIBERTAD: Corresponde al número mínimo de parámetros para determinar cualquier movimiento posible de los nodos de los elementos en una dirección no restringida para un análisis.

HIPOCENTRO: Punto de origen de un terremoto situado en una zona profunda de la corteza terrestre. También llamado foco.

INERCIA: Tendencia que tiene un cuerpo a permanecer en reposo o a seguir en movimiento, sin fuerza alguna que actúe sobre él.

MODO DE VIBRACIÓN: Forma de vibración la cual presenta una estructura en la cual se evidencia una deformación singular debido a la acción de un sismo.

PERÍODO: Tiempo requerido para dar una oscilación en la dirección que se está considerando; una estructura rígida tiende a oscilar rápidamente y con un período de vibración corto, mientras que una flexible tiende a oscilar más lentamente y su período es más largo.

PROTOTIPO: Modelo adecuado para utilizar en la valoración completa de forma, proyecto y funcionamiento.

RIGIDEZ: Propiedad de un material, componente o sistema estructural que caracteriza la dificultad para deformarlo. Es la relación entre la fuerza aplicada y el desplazamiento en la misma dirección y sentido.

SISMO: Es el deslizamiento repentino de sectores de la corteza terrestre a lo largo de las fracturas que ésta presenta en las llamadas fallas geológicas y en las zonas de subducción de placas tectónicas.

SISMORRESISTENTE: Se aplica a una edificación diseñada y construida con una adecuada configuración estructural, con componentes de dimensiones apropiadas y materiales con una proporción y resistencia suficientes para soportar la acción de fuerzas causadas por sismos frecuentes.

RESUMEN

Para el aprendizaje de estudiantes de ingeniería civil, es de vital importancia el estudio y análisis de estructuras. Es por ello que mediante tres prototipos a escala se estableció como objetivo comprender los modos de vibración de una estructura, así como también la deformación de pórticos, con su respectiva clasificación. Todo lo anterior como complemento para el laboratorio de estructuras, con el fin de brindar un concepto teórico práctico. Para tal propósito, la construcción de los modelos fueron hechos con diseños acordes a la finalidad de ser estructuras didácticas, también se contempló el tipo de material, puesto que, en la demostración de los modos de vibración, es un parámetro importante a la hora evidenciar la deformada de la estructura de 5 niveles, igualmente para los modelos dimensionales y tridimensionales. Por otra parte, para la manipulación de dichos prototipos se implementaron guías y manuales de laboratorio, esto como ayuda para la apropiada manipulación de éstos. Lo anterior en concisión como concepto básico para la introducción de dinámica estructural con respecto a la forma de cómo se comporta el modelo ante la simulación de un sismo, además del entendimiento de diferentes factores como rigidez, módulo de elasticidad, longitud de los elementos, entre otros, los cuales están en función de la deformación de una estructura, del mismo modo, la relación que tienen los diferentes tipos de apoyos y uniones, puesto que estos, son un punto de partida para clasificar las estructuras.

Palabras clave: deformación, dinámica estructural, modo de vibración, sismo.

ABSTRACT

For the learning of civil engineering students is vital importance the study and analysis of structures. It's for this reason that through three prototypes at scale, it's stablished as objective to understand the vibration modes of one structure, as well as the deformation shape of frameworks, with their respective classification. All of the above as a complement to the structures laboratory, in order to provide a practical theoretical concept. For this purpose, the construction of the models were made with designs according to the intention of being didactic structures, also it's considered the type of material, since, in the demonstration of vibration modes, is an important parameter when it comes to evidence the deformed shape of structure of 5 levels, likewise for dimensional and three-dimensional models. Furthermore, laboratory guides and manuals were implemented, for the manipulation of those prototypes, this as an aid for the appropriate manipulation of those. The above in concision as a basic concept for the introduction of structural dynamics with regard to the way the model behaves in the simulation of an earthquake, in addition to the understanding of different factors such as stiffness, modulus of elasticity, frames length, among others, which are in function of the structure deformation, in the same way, the different relation about the types of supports and unions, since these are a starting point to classify the structures.

Key words: deformation, earthquake, structure, vibration mode.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, en la formación de ingenieros civiles, se establecen fórmulas, códigos, normas y la gran importancia del software de diseño, que ayuden diariamente a encontrar soluciones necesarias a cada aspecto de la ingeniería. Lo anterior, aunado a la experimentación en laboratorio del comportamiento de una estructura ante fuerzas sísmicas, hace que se identifique claramente la respuesta y posible solución ante la flexibilidad o baja redundancia de la estructura.

Este proyecto tiene como fin, implementar el laboratorio de estructuras de la Universidad Católica de Colombia, con tres prototipos que permitan entender el comportamiento de las estructuras con ciertas cualidades, la cuales consisten en ver su comportamiento ante un evento sísmico. La forma en que se desarrollará en este trabajo, será realizar varios modelos a escala, para una mejor interpretación de los pórticos hiperestáticos, en forma bidimensional y tridimensional, con conexiones rígidas y articuladas, en donde se podrá estudiar y enseñar el comportamiento de las estructuras civiles en edificaciones. Se pueden realizar, visualizar y observar distintas estructuras de forma experimental y sus comportamientos al ser sometidas a ciertas fuerzas.

Otro componente de esta implementación del laboratorio estructural de la universidad, es la realización de un modelo tridimensional soportado en una base movible con un motor, el cual tendrá el fin de demostrar los modos de vibración que se pueden tener en una estructura al momento de un sismo y ver el comportamiento de las estructuras, además entender de una manera más sencilla este fenómeno.

1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

Las causas de los terremotos, según como lo explica el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (AIS, 2010), dice: La corteza terrestre es relativamente delgada. Se extiende hasta profundidades del orden de 70 km en los océanos y de más 150 km bajo los continentes, y además está en un estado permanente de cambio. Es muy válida la analogía de que, al comparar la tierra con un huevo duro, la corteza tendría un espesor semejante a la cáscara y ésta estaría fracturada en una serie de fragmentos que en la tierra se conocen con el nombre de placas tectónicas.

Colombia está localizada dentro de una de las zonas sísmicamente más activas de la tierra, la cual se denomina Anillo Circumpacífico y corresponde a los bordes del Océano Pacífico. El emplazamiento tectónico de Colombia es complejo pues en su territorio convergen la placa de Nazca, la placa suramericana y la placa Caribe. El límite entre las placas suramericanas y Caribe está relativamente indefinido (AIS, 2010). La geología estructural del país ha sido estudiada con diferentes grados de detalle. En general, los sistemas principales de fallamiento han sido identificados gracias a estudios mineros y de exploración petrolera. Además, se han realizado exploraciones geológicas detalladas para los grandes proyectos hidroeléctricos y existen numerosos trabajos sobre tectónica colombiana realizados por el INGEOMINAS y otras instituciones.

El primer evento sísmico en el país, del cual se tiene registro escrito ocurrió en 1566, causando daños graves en las recientemente fundadas ciudades de Popayán y Cali. Existen registros de numerosos sismos históricos desde la colonia y hasta que en 1922 se instaló el primer sismógrafo en el país, este grupo de sismos del catálogo, (Reyes, 1998), consiste en 293 eventos. La información sobre ellos es de calidad variada, algunos están muy bien documentados, de otros simplemente se menciona la fecha.

Históricamente, y tal como se encuentra registrado en el estudio de microzonificación sísmica (FOPAE, 2010), Colombia está expuesto a eventos sísmicos, que ponen en riesgo a las estructuras y a la población. Estos estudios son necesarios porque uno de los objetivos del análisis de estructuras ante eventos de esta naturaleza, es poder generar edificaciones que respondan adecuadamente ante las solicitaciones, y que con ellas se pueda dar cumplimiento al artículo 2° de la Constitución Nacional,(expedida en 1991), la cual señala que son fines esenciales del Estado "... garantizar la efectividad de los principios, derechos y deberes consagrados en la Constitución", y agrega que las autoridades de la República están

instituidas para proteger a todas las personas residentes en Colombia, "en su vida, honra y bienes y para asegurar el cumplimiento de los deberes sociales del Estado y de los particulares". (AIS, 2010).

De acuerdo a lo anterior y ante el interés de evaluar las fuerzas que afectan una estructura, una de ellas que para Colombia reviste gran importancia es el sismo, el cual es una vibración del suelo (un conjunto de fuerzas horizontales que se aplican sobre la rasante de un edificio). Como tal, tiene una frecuencia y aceleración máxima características. De hecho, todos los estudios de mapas de riesgo (Alonso, 2013), estadísticos e históricos permiten la determinación de un valor de aceleración básica del suelo, representativo de la acción dinámica sísmica.

La importancia de analizar estos fenómenos, consiste en dar y brindar seguridad en diseños estructurales, como se menciona anteriormente, en proteger vidas ya que en la actualidad estos eventos están dejando pérdidas económicas millonarias y un número inaceptable de víctimas mortales. Diversos análisis de sensibilidad han permitido constatar, una vez más, la importancia de una correcta y ajustada definición de la acción sísmica.

2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo en un ambiente didáctico se puede dar a conocer la respuesta mecánica de una estructura al estar expuesta a fuerzas de sismo y cargas gravitacionales?

3. OBJETIVOS

3.1 GENERAL

Demostrar mediante un prototipo los modos de vibración de una estructura, así como también la flexión de un modelo bidimensional y tridimensional de pórticos, como complemento para el laboratorio, con el fin de brindar un concepto teórico práctico acerca del comportamiento de las estructuras, a la comunidad estudiantil.

3.2 ESPECÍFICOS

- Establecer el modo de vibración de las estructuras de acuerdo al tipo de material empleado (metal y madera).

- Reconocer cómo es la deformación de la estructura, teniendo en cuenta el tipo de apoyo (articulado o fijo) empleado en los pórticos.

- Realizar guías de laboratorio para cada ensayo a ejecutar en el laboratorio.

4. ALCANCES Y LIMITACIONES

4.1 ALCANCE

Los prototipos se desarrollaron en un tiempo máximo de tres (3) meses, así como también el documento físico en un máximo plazo de tres meses y medio (3.5), La elaboración y el seguimiento del proyecto se desarrolló en la Universidad Católica de Colombia, dentro de los cuales se contempló una semana de elaboración para cada informe a entregar. Los recursos a empleados fueron suministrados y financiados por los autores.

4.2 LIMITACIÓN

Las restricciones fueron la calibración idónea del motor a emplear, ya que se necesita controlar de forma precisa, la frecuencia y la aceleración para la demostración en la mesa vibratoria los modos de vibración de la estructura. Así mismo se contempló los tipos de material (metal y madera) para la construcción de los prototipos, ya que de éstos depende la deformación. Por otra parte, la manipulación de la mesa ya establecida tuvo el aval de la universidad para poder modificarla y transportarla fuera y dentro de las instalaciones de la universidad.

5. MARCO DE REFERENCIA

5.1 MARCO HISTÓRICO

El estudio y/o análisis de las estructuras se ha dado gracias a la necesidad del hombre por mejorar su entorno, es por ello que las construcciones a través del tiempo se han ido modificando o mejorando con el fin de dar una funcionalidad idónea. A continuación, se presenta la historia de unos de los hechos más relevantes en todo lo relacionado con el análisis estructural y la ingeniería estructural.

Tabla 1. Historia de la ingeniería estructural

Conocimiento desarrollado	**Autor**	**Año/época**	**Fuente**
Empleo de vigas y columnas como elementos estructurales, se evidencia gracias a la pirámide escalonada de Sakkara y la pirámide de Gizeh.	Imhotep	3000 a.c.	(Jaramillo,2004)
Uso del arco, fue implementado en conjunto con la viga y la columna. Sin embargo el uso de adobe en construcciones no pudo resistir el paso del tiempo. Por tal motivo el desarrollo mecánico que implicaban dichas construcciones sólo existen teorías.	Imperio Asirio	1500 a.c	(Jaramillo,2004)
Muralla China, El sistema constructivo para esta estructura robusta consistió en la compactación de tierra y el uso de rocas, dicha tierra era encofrada, creando un muro tan sólido como el concreto. Esta tierra apisonada se revestía por el exterior de arcilla para protegerla de la erosión.	Dinastía Hang y Ming	500 a.c.	(Prieto,2012)

Análisis y prueba de la ley de la palanca, un punto de partida para entender la estática (Beer, 2013) como el equilibrio de las fuerzas que actúan sobre un cuerpo rígido en reposo.	Arquímedes	212 a.c	(Beer,2013)
Conexiones estructurales por medio de caja y espigo, Fue una alternativa viable, puesto que no existía algún tipo de pegamento o elemento mecánico para las unir elementos estructurales. Estas conexiones eran de madera, las cuales tenían un comportamiento semirrígido, permitiendo resistencia a torsión, flexión y compresión.	Lie Jie	1103	(Shatzman,2004)
Momento de una fuerza, Cabe decir que la inquietud de este genio lo llevó a estudiar la flexión de las vigas apoyadas en sus extremos y la resistencia de vigas en voladizo; la resistencia de alambres de varias longitudes; y la resistencia de las columnas, estableciendo que ésta varía inversamente con la longitud y directamente con alguna relación de su sección transversal. También, desarrolló leyes, aún imperfectas, en relación, por ejemplo, con la línea elástica en vigas con secciones diferentes para eliminar el módulo elástico y el momento de fuerza.	Leonardo Da Vinci	Siglo XV	(Jaramillo,2004)
Uso de las primeras cerchas, implementadas, ya que solo se usaban vigas y columnas así como los arcos y cúpulas. Sin embargo, se necesitaron dos siglos más para que los constructores se dieran cuenta	Andrea Palladio	Siglo XVI	(Jaramillo,2004)

de la importancia de esta nueva forma estructural y fuera usada masivamente.			
Resistencia de materiales, En su libro Diálogos sobre dos nuevas ciencias. La segunda nueva ciencia se ocupa de la mecánica del movimiento; la primera contiene el primer tratamiento matemático de un problema de ingeniería estructural, intenta calcular la resistencia a la rotura de una viga en voladizo bajo su peso propio y una carga concentrada en el extremo. Inauguró el análisis estructural.	Galileo Galilei	1638	(Heyman,2001)
Los principios fundamentales de la mecánica, los cuales constituyen la base de gran parte de la ingeniería moderna (Beer, 2013), impartiendo así las tres (3) leyes fundamentales, la ley de la gravitación y la aplicación del cálculo infinitesimal.	Isaac Newton	1687	(Beer,2013)
Ley de Hooke, demuestra el estudio sobre la elasticidad. En su obra "De potencia restitutiva", publica resultados sobre el comportamiento de lo que él llama "springybodies" (esto es resortes y objetos de similar comportamiento), y consta que si se dobla la carga impuesta a un resorte se obtiene doble desplazamiento. Este hecho se conoce como linealidad entre cargas y desplazamientos, y se verá que en realidad sólo es válido cuando los desplazamientos son pequeños.	Robert Hooke	1678	(Romero,2002)

Eje "Neutro" de una viga, Es la primera afirmación que la viga en voladizo propuesta por Galilei soporta el peso colgado de su extremo porque algunas de sus fibras se estiran y otras se contraen, estableciendo, así como limite la profundidad media de la viga. Este resultado se obtiene gracias al mismo desarrollo de Hooke acerca de la linealidad y es aplicado al estudio de la viga de Galileo.	Mariotte	1686	(Romero,2002)
Ecuación diferencial de la elástica, el desarrollo de ésta involucra la deformación elástica de una viga, mediante consideraciones de equilibrio.	Jacob Bernoulli	1744	(Romero,2002)
Pandeo de las Columnas, estudio acerca de los problemas de las curvas elásticas de vigas y columnas; empleando el método del trabajo mínimo. Cuando una viga o columna deja de ser recta por la flexión, se almacena energía (que puede recuperarse al retirar la carga), y la viga o columna elástica cargada toma una forma tal que la energía de deformación es mínima.	Leonhard Euler	XVIII	(Heyman,2001)

Estado de esfuerzos en vigas sometidas a flexión (teoría de la flexión), aplicando la Ley de Hooke a las fibras, situando la superficie neutra en su posición correcta y desarrollando el equilibrio de las fuerzas en la sección con las fuerzas externas, se evalúa correctamente los esfuerzos. También se contempla la etapa plástica, e indicación que en la falla, bajo ciertas condiciones, la superficie neutra debería moverse a otra posición. Columb junto con Navier son los que llevaron la mecánica de materiales a un nivel más complejo con el estudio de cuerpos elásticos.	Charles Coulomb y Claude-Louis Henri Navier	1776 y 1787	(Romero,2002) (Jaramillo,2004)
Módulo de elasticidad, aplicado para entender la deformación unitaria que sufre un elemento cuando se incrementa el esfuerzo, tiene el mismo valor para una tensión que para una compresión, siendo una constante independiente del esfuerzo siempre que no excede de un valor máximo denominado límite elástico.	Thomas Young	XVIII	(Martínez, 1997)
Teorema tres (3) momentos, se introdujo el concepto de igualdad del trabajo externo e interno en una estructura deformada. También se introdujo el equilibrio de solidos homogéneos y cálculo de la estática de las vigas muy útil en el cálculo de vigas continuas hiperestáticas. Se dice que a partir de este momento se inicia el desarrollo de una verdadera Teoría de las Estructuras.	ClausiusClapeyron	XIX	(Jaramillo,2004)

Aporte a la formulación de la teoría de la elasticidad sobre la flexión de vigas curvas, las vibraciones y las deformaciones plásticas. Se presenta su famosa Memoria sobre la Torsión que además contenía todo lo que en esa época se conocía sobre la Teoría de la Elasticidad	Barré de Saint-Venant	1853	
Teoría de la vibración de los cuerpos elásticos, demostración acerca que los desplazamientos producidos por una fuerza variable que se representa por una integral, subdividiendo los intervalos infinitesimales con el fin de obtener el movimiento forzado como la suma de los movimientos de los intervalos. Esta ecuación es conocida como la Integral de Duhamel y es usada hoy en día en la Dinámica de Estructuras para el caso sísmico.	Jean-Marie Duhamel	XIX	
Línea de Influencia. Otro gran avance fue el estudio de cargas móviles en puentes y ferrocarriles, por otra parte, también hizo contribuciones importantes a la Resistencia de Materiales, especialmente en la teoría de flexión de vigas curvas y flexión de vigas apoyadas en medios elásticos.	Emil Winkler	XIX	

Análisis de estructuras estáticamente indeterminadas, se innovó el primer método sistemático de análisis. Estaba basado en la igualdad que había establecido Clapeyron de la energía interna de deformación de una estructura cargada y el trabajo externo realizado por las cargas aplicadas. En su análisis, Maxwell presentó el Teorema de las Deformaciones Recíprocas, en el cual se demostró que un problema de geometría de deformación podía reemplazarse por un problema mucho más sencillo de equilibrio de fuerzas.	James Clerk Maxwell	1864	(Heyman,2001) (Jaramillo,2004)
Viga conjugada o método de las cargas elásticas, fue un gran aporte a la teoría de las estructuras. Así mismo, presentó una derivación más simple y más extensa del método general de Maxwell para el análisis de estructuras indeterminadas, usando los principios del trabajo virtual.	Otto Mohr	XIX	(Jaramillo,2004)
Teoremas de Castigliano, se presenta el principio de trabajo mínimo sugerido por Menabrea y conocido como Primer Teorema de Castigliano. El Segundo Teorema de Castigliano para encontrar deflexiones, deducido de lo demostrado en el primero. En 1879 se publica el libro Teorema del Equilibrio de Sistemas Elásticos y sus Aplicaciones. Éste destaca por su originalidad y es muy importante en el	Alberto Castigliano	1873	(Jaramillo,2004)

desarrollo del análisis hiperestático de estructuras.			
Resistencia de una viga biempotrada (Las tres (3) Rótulas plásticas), la resistencia es siempre el doble que la de la misma viga biapoyada. Esta afirmación precisa que la restricción geométrica, debe ser suficientemente fuerte como para que la viga pueda desarrollar toda su resistencia (que resista al menos el valor del momento plástico último). Se establece que cuando las rótulas en los extremos y en el centro aparecen causan el colapso, siendo así un determinante de la resistencia límite o resistencia global final de una estructura.	Kazinczy	1914	(Heyman,2001)
Teoría de las vigas, se impone un análisis de vigas curvas en estado plano de tensiones. La teoría resuelve las flexiones e hiperestaticidades con el teorema de Castigliano, así mismo se realiza un estudio para resolver problemas bi-dimensionales en coordenadas polares. Por otra parte se recopila toda la doctrina en torno a la resistencia de materiales y la divulgación internacionalmente.	Timoshenko	1920	(Romero,2002) (Caballero,2014)
Distribución de momentos, se innova con un método famoso sistemático de distribución de momentos, considerado uno de los mayores aportes al análisis de estructuras indeterminadas y según los expertos, una revolución en el análisis de estructuras de pórticos	Hardy Cross	1930	(Jaramillo,2004)

continuos de concreto reforzado. Es un método de aproximaciones sucesivas que evita la resolución de sistemas de ecuaciones como las presentadas en los métodos de Mohr y Maxwell.			
Factor de Carga, se establece el hipotético caso de colapso de una estructura bajo cargas exteriores crecientes, definiendo así la proporción entre la carga de colapso y la carga especificada para el proyecto. Mayorando la carga real de la estructura, suponiendo que el peso propio, sobrecargas, carga de viento, entre otras, actúan al mismo tiempo.	Bleich	1936	(Heyman,2001)
Elementos Finitos, utilizando el Método Ritz de análisis numérico y minimización de las variables de cálculo, se obtienen soluciones aproximadas a un sistema de vibración. Se podría decir que Courant introdujo matemática firme, para el análisis de estructuras.	Richard Courant	1943	(Cervantes,2013)
Stiffness and deflectionanalysis of complexstructures, se establece una definición más amplia del análisis numérico. Con la llegada de los primeros ordenadores comienza la aplicación de los métodos matriciales de la rigidez a las estructuras, muy populares en la actualidad.	Turner, Ray W. Clough, H.C. Martin y L. J. Topp	XX	(Jaramillo,2004)

Fuente. Autores.

5.2 MARCO TEÓRICO

5.2.1 Dinámica.

Para entender el comportamiento del modelo estructural es importante tener en cuenta el estudio de las vibraciones, ya que la estructura se puede comportar como un elemento flexible (García, 2005), es por ello que, aunque en muchos casos las deformaciones relativas entre algunas partes de la estructura son de un orden de magnitud tan pequeño, es necesario que se apliquen los principios de la dinámica de cuerpos rígidos en algunas partes de la estructura. De igual forma en la dinámica se debe tener en cuenta los siguientes dos aspectos: la cinemática, la cual estudia la geometría del movimiento, relacionando el desplazamiento, la velocidad, la aceleración y el tiempo, sin hacer referencia a las causas del movimiento; y la cinética, la cual estudia la relación entre las fuerzas que actúan sobre un cuerpo, la masa del cuerpo y su movimiento, permitiendo predecir los movimientos que causan las fuerzas, o determinar las fuerzas necesarias para producir un movimiento dado.

Sin embargo, para el diseño de estructuras es prioritario saber distinguir las cargas estáticas de las dinámicas, ya que, aunque la mayoría de las estructuras pueden diseñarse considerando sólo cargas estáticas (García, 2005), hay importantes excepciones que requieren del calculista la posibilidad de diseñar una estructura contemplando cargas en movimiento. A decir verdad, las cargas móviles, a diferencia del peso propio, rara vez son estrictamente estáticas porque su aplicación sobre la estructura requiere de un cierto tiempo que en definitiva debe ser analizado para establecer si se trata de una carga estática o dinámica. No obstante, se puede considerar correcto que si la magnitud de la fuerza varia en forma suficientemente lenta no causará efectos dinámicos y podrá tratarse como estática.

En efecto para la identificación de una carga dinámica de una estática se debe establecer de qué forma varía ésta, ya sea “lenta” o “rápida”, el valor como parámetro inicial para la comparación es el “periodo natural de la estructura” (Ruiz,2005). El cual establece el tiempo que tarda la estructura en recorrer un ciclo de vibración libre, es decir la vibración que ocurre después que finaliza la excitación externa o después que la carga deja de variar y se mantiene constante. El periodo natural depende directamente de la masa, de la rigidez y de las condiciones de vínculo, todas éstas características son propias de la estructura. La importancia para analizar las cargas dinámicas ha ido teniendo avances con el pasar del tiempo, en parte debido al crecimiento de la tecnología, puesto que ha hecho posible realizar diseños más apropiados, y que las herramientas computacionales actuales

permiten hacer con carácter Las fuerzas internas que actúan sobre las componentes de una estructura dependen de los desplazamientos o deformaciones específicas. Cuando se quiere conocer una fuerza en función de la deformación se procede en primer lugar a calcular la deformación, y luego se obtienen los esfuerzos por medio de la ley de Hooke.

5.2.2 Acciones estructurales dinámicas.

5.2.2.1 Sismos. Son causados por el deslizamiento repentino de sectores de la corteza terrestre a lo largo de las fracturas que ésta presenta en las llamadas fallas geológicas y en las zonas de subducción de placas tectónicas (Hurtado, 2000). La energía liberada se presenta en un periodo tal que el deslizamiento entre partes de la corteza (hipocentro) irradia energía cinética, en la que se transforma en energía de deformación acumulada, la cual se libera en todas las direcciones del espacio. Las ondas se manifiestan de forma desordenada tal que al tiempo se reflejan y se refractan a través de diversas capas de rocas y suelos, hasta llegar a la superficie terrestre, donde se manifiestan en forma de un movimiento del suelo, cuya aceleración se debe a las diferentes frecuencias que presentan las ondas, puesto que éstas se sobreponen unas a otras de manera caótica.

5.2.2.2 Vientos. Solo si los vientos son fuertes (determinada por su velocidad), se puede establecer que hay presiones dinámicas. En general, (Hurtado, 2000), la velocidad se percibe a mayor altura puesto que los obstáculos, ya sean naturales o urbanos solo frenan dicho fenómeno a cierta altura, es por ello que la velocidad promedio tiende a incrementarse, cabe considerar que dicha acción es aleatoria y no es constante siempre.

Por tal motivo, la estimación de la velocidad básica del viento, se da en su mayoría, (NSR-10, B.6.5.4), mediante registros de información climática regional, utilizando procedimientos estadísticos aprobados para el análisis de valores, dentro de los cuales están, tiempo promedio, altura del anemómetro y la exposición del terreno.

5.2.2.3 Oleaje. Esta acción solo debe ser tenida en cuenta cuando la estructura es sometida a empujes del agua en mares y ríos (Hurtado, 2000). La fuerza ejercida por el oleaje es variable puesto que depende estrechamente de la altura de las olas, la cual tiene una vicisitud con el tiempo.

Cabe agregar que todas aquellas edificaciones a construir en zonas inundables, (NSR-10, B.5.4), deben diseñarse para que sean capaces de resistir los efectos de flotación y de desplazamiento lateral causados por los efectos hidrostáticos, hidrodinámicos y de impacto de objetos flotantes.

5.2.2.4 Impacto. Se puede considerar todo tipo de acciones que afecten directamente las estructuras de manera súbita, surgen principalmente de accidentes, (Hurtado, 2000), tales como los causados por choque de vehículos contra soportes de edificios, pilas de puentes, entre otros.

5.2.2.5 Paso de vehículos o personas. Esta acción, aunque generalmente es tenue, (Hurtado, 2000), puede ser consecuencia de provocar problemas de fatiga en los materiales estructurales a largo plazo, por lo cual puede considerarse relevante a la hora de analizar o evaluar la estructura. Así mismo, como se estipula en la NSR-10, B.4.6, se deben tener en cuenta además los efectos dinámicos por carga viva, producidos por publico en edificaciones tales como: estadios, coliseos, teatros, gimnasios, pistas de baile, centros de reunión o similares.

5.2.2.6 Explosiones. Esta acción se caracteriza, en general, por ser de muy corta duración, (Hurtado, 2000), en la cual se presentan dos fases claramente diferentes, una de expansión y otra de contracción.

5.2.3 Grados de libertad.

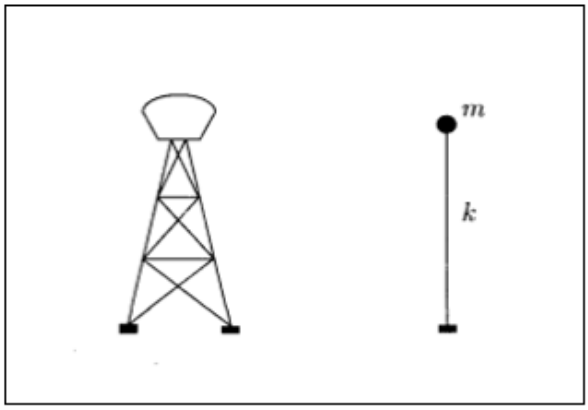
Gracias a la implementación matricial de elementos finitos y/o modelo de barras, es posible calcular o analizar las estructuras de forma precisa, (Hurtado, 2000). En vista de ello es que el significado de grado de libertad corresponde a cualquier movimiento posible de los nodos de los elementos en una dirección no restringida para un análisis estático.

Sin embargo, los grados de libertad en el ámbito de la dinámica, (García, 2005), son todas las partículas de masa del sistema las cuales se les definen la posición en el tiempo y en el espacio con un número mínimo de coordenadas. Cuando se trata de sistemas rígidos, en los cuales no puede haber desplazamiento relativo entre las partículas de masa, las propiedades de la masa se pueden describir referidas a su centro de masa. No obstante se puede establecer un número infinito de grados de

libertad cuando la masa hace parte de un elemento flexible, ya que, se tiene un sistema de masa distribuida.

Los grados de libertad se pueden establecer para la correspondiente masa de un nivel en una estructura siendo así un modelo dinámico discreto (diagrama de masas o masas concentradas), por ejemplo, un modelo razonablemente preciso (ver figura 1) tendría como única masa la correspondiente al depósito más la de la estructura, (Hurtado, 2000), mientras que la rigidez estaría dada por la fuerza estática que habría que aplicar en el punto de colocación de la masa para causar un desplazamiento unitario de la estructura. De esta manera, a pesar de que desde el punto de vista estático la estructura presente un elevado número de grados de libertad, desde el punto de vista dinámico se puede calcular con suficiente precisión como un sistema sencillo.

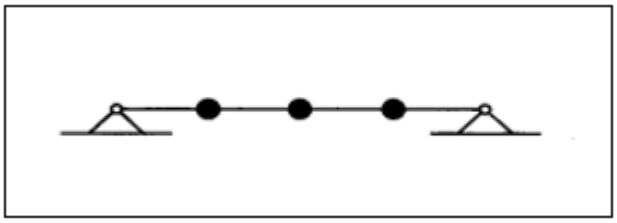
Figura 1. Modelo de única masa



Fuente: Hurtado, J.E (2000).

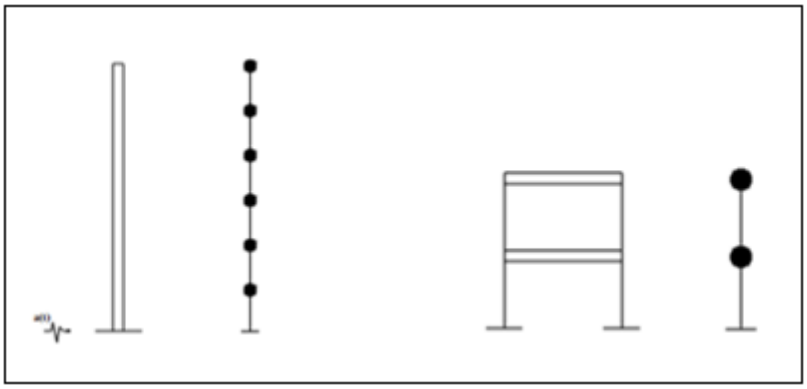
Por otra parte los sistemas que no pueden ser caracterizados como sencillos se denominan sistemas de varios grados de libertad o, simplemente, sistemas múltiples. Por ejemplo, en una viga simplemente apoyada cada infinitésimo de su longitud tiene las propiedades de masa y rigidez distribuidas de manera continua. Sin embargo, siempre resulta posible discretizar la estructura en elementos finitos como en la que se muestra en la figura 2, la cual presenta un modelo que tendría tres grados de libertad.

Figura 2. Modelo con tres grados de libertad



Fuente: Hurtado, J.E (2000).

Figura 3. Estructuras con múltiples grados de libertad



Fuente: Cassano, (2009)

En la figura 3, se puede evidenciar la representación de un modelo dinámico discreto con n grados de libertad y un modelo dinámico de dos pisos con 2 grados de libertad. De acuerdo a lo anterior es posible establecer una analogía sencilla para poder reconocer los grados de libertad, ya sean dinámicos o no. En el análisis estructural, (Cassano, 2009), se puede definir que los grados de libertad (GL) son los puntos de la estructura en los cuales se identifica algún desplazamiento y permiten brindar una deformada de la estructura, mientras que los grados de libertad dinámicos (GLD), tienen asociada masa y para los cuales puede conocerse las vibraciones o movimientos a lo largo del tiempo.

5.2.4 Características dinámicas de una estructura

La reacción dinámica que presenta una estructura cuando ocurre un sismo, conlleva a que se presenten dos características fundamentales a la hora de analizarla. Una de ellas son los periodos naturales de vibración, los cuales son parámetros fundamentales para estudiar las cargas dinámicas (Ruiz, 2005). Así mismo, a la hora de evaluar la disipación de energía y el cese de movimiento de los elementos que componen el sistema se debe contemplar el amortiguamiento, el cual en

algunos casos no se puede dar y en otros casos si, esto dependiendo de la velocidad con la que las cargas actúan.

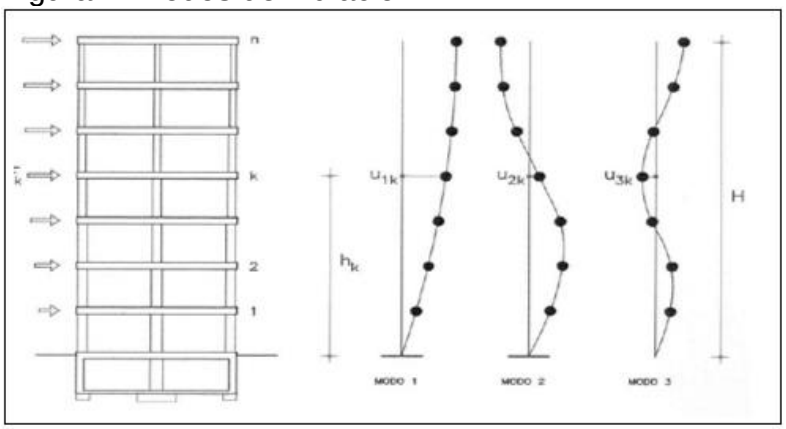
5.3 MARCO CONCEPTUAL

5.3.1 Análisis modal.

El implemento de involucrar satisfactoriamente el estudio de la dinámica con la sismología y todo lo que conlleva con respecto a las estimaciones estadísticas en la historia de los sismos, es en si el uso más necesario y común que se emplea para las respectivas normas sismoresistentes, puesto que el cálculo modal espectral, es un punto de partida para obtener las fuerzas actuantes sobre las plantas de la estructura, que se consideran aplicadas en el centro de masas de cada planta (Alonso, 2013). Además, de estimar las tensiones y esfuerzos en los elementos de un sistema estructural, este método de análisis también permite el cálculo de los valores máximos de los desplazamientos y aceleraciones, en cada modo de vibración, todo esto posible al momento de tener un espectro de diseño, el cual representa la envolvente de espectros de respuesta para diversos sismos (Tejada, 2011).

Por otra parte, el tipo o la forma de deformación de una estructura se amplifica en el espectro normalizado de respuesta con respecto a las solicitaciones planteadas, (Alonso, 2013). Esto, teniendo en cuenta los rangos de periodos fundamentales de la estructura, además otros parámetros a considerar para dichas deformaciones son las capacidades elásticas y la rigidez que tienen los elementos estructurales.

Figura 4. Modos de vibración



Fuente: Alonso, F. M. (2013).

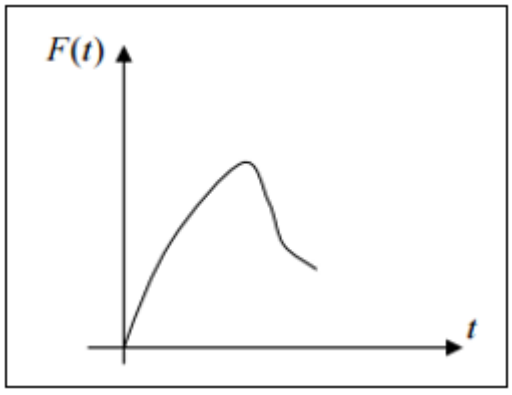
De acuerdo a la acción dinámica específica, la estructura puede vibrar u oscilar de diferentes modos o formas, (ver figura 4), además de su respectiva deformación característica, esto dado a que la vibración tiene asociada una frecuencia singular (Alonso, 2013). De esta manera los distintos modos de vibración se producirán de acuerdo a cómo el sismo induce la vibración en la estructura.

Así mismo, se puede obtener el desplazamiento de cada planta de la estructura de acuerdo al modo de vibración obtenido por la inducción del sismo (Alonso, 2013). Se puede relacionar las fuerzas horizontales equivalentes, una vez identificado el desplazamiento en el respectivo modo de vibración. Se tiene en cuenta que, para el dimensionamiento de los elementos estructurales, se contempla la respectiva combinación de fuerzas sísmicas para cada modo de vibración, esto con el fin de calcular la estructura correctamente, puesto que de acuerdo a lo anterior se puede estimar una hipótesis de cálculo de sismo en los sentidos "*x*" y "*y*", teniendo en cuenta a la vez las demás fuerzas o cargas actuantes sobre estructura (gravitatorias, sobrecargas, entre otras).

5.3.2 Respuesta a cargas variables en el tiempo.

La metodología central de un análisis dinámico, (Ruiz, 2005), es calcular los desplazamientos y las respectivas deformaciones de la estructura bajo un sistema de cargas exteriores variables con el tiempo F(t). Este tipo de proceso de carga ocurre de acuerdo a las acciones estructurales dinámicas presentes.

Figura 5. Diagrama respuesta de una estructura



Fuente: Ruiz (2005).

Debido a los tipos o acciones dinámicas que pueden afectar una estructura, éstas con el tiempo disminuyen a través del tiempo, tal como se muestra en la figura 5,

estas reducciones de energía se producen por fuerzas de amortiguamiento o de fricción que se presenta en la estructura (García, 2005), dentro de los cuales, los fenómenos de amortiguamiento se pueden clasificar en viscoso, de Coulomb e histerético.

5.3.3 Deformaciones de las estructuras

Todo cuerpo sobre la Tierra está sometido a la acción de fuerzas. Una de ellas es intrínseca al mismo cuerpo, (Alonso, 2013), es su peso, y salvo que el cuerpo sea alejado de la Tierra no puede abstraerse a esta fuerza.

Así mismo, al peso del cuerpo, se le suman otras fuerzas, y los elementos estructurales en una obra civil (Morales, 2013), están ideados para resistir esta suma de fuerzas. Por la acción de las cargas (fuerzas) un elemento estructural se deforma. Esta deformación en magnitud y sentido, depende de la fuerza que la origina, de las dimensiones del elemento y del material usado.

Los elementos estructurales que componen un sistema, en general se deforman y esto es debido a la acción de cargas sobrepuestas en ellos, aunque la mayoría son imperceptibles debido a la inercia y la rigidez que presentan, se puede definir que la deformación de un elemento estructural es una alteración del estado físico debido a una fuerza mecánica externa (Morales, 2013), así como también a una variación de temperatura, a un cedimiento de apoyos, entre otras. La deformación puede ser elástica, cuando desaparece al cesar la acción que lo produce, por lo que las partículas elementales del cuerpo vuelven a su posición inicial; y permanente, cuando persiste después de desaparecer la causa que lo ha producido. El elemento en el primer caso tiene un comportamiento elástico y en el segundo un comportamiento plástico o inelástico.

Así pues, en la naturaleza no existen deformaciones exclusivamente elásticas o exclusivamente plásticas, debido a que cualquier cuerpo estructural, después de ser deformado, al cesar la acción, no vuelve nunca a las condiciones iniciales; así, aplicando un esfuerzo pequeño a un cuerpo muy poco elástico, la deformación tiende a anularse al menos en parte. En la práctica el cuerpo se comporta elásticamente cuando la deformación permanente que sufre es casi imperceptible (Morales, 2013).

5.3.3.1 Clasificación de las deformaciones. Corresponden a las siguientes relaciones:

a) A mayor carga, mayor deformación.
b) A mayor dimensión longitudinal (luz), mayor deformación.
c) A mayor sección resistente, menor deformación.
d) A mejor material (mayor módulo E), menor deformación.

Como se menciona antes, las deformaciones tienen relaciones de acuerdo a ciertos factores determinantes, ya que es de estos que se puede evitar el cambio físico de los elementos tal como:

5.3.3.2 La rigidez. La cual es la relación entre las fuerzas externas (sean estáticas o dinámicas) y las deformaciones que estas inducen en el elemento. También puede definirse como la fuerza que debe aplicarse al sistema para obtener una deformación unitaria en la misma dirección y sentido de la carga (García, 2005).

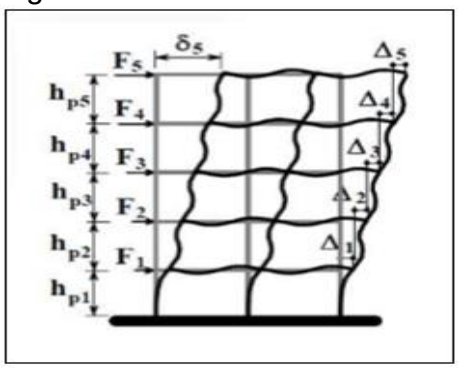
5.3.3.3 Segundo momento o momento de inercia de un área. La capacidad del elemento de impedir la deformación depende en gran parte de la geometría del elemento, y es por ello que a la hora de establecer una geometría transversal para el elemento, ya sea rectangular, cuadrada, circular, etc. Se debe cumplir con un mínimo valor de inercia para poder dar más rigidez a la estructura y así evitar una deformación mayúscula.

5.3.3.4 Resistencia del material. El comportamiento del material, es en sí uno de los factores más importantes para evitar las deformaciones de una estructura, ya que el módulo de elasticidad o de Young puede determinar hasta qué punto el material se comporta de forma elástica, y es un punto de partida que permite al ingeniero estructural seleccionar el respectivo material, ya sea acero, madera, concreto entre otros.

5.3.3.5 Longitud de vigas y columnas. El pandeo de estos elementos tienen relación con que éstos sean cortos, longitud intermedia o largos, puesto que la fuerza axial en estos elementos sean vigas o columnas, determinan si el comportamiento de los elementos sean elásticos o inelásticos, esto con base en la teoría de Euler, sin embrago, cabe aclarar que en el caso de las columnas estas pueden deformarse por aplastamiento si se tratan de longitudes cortas siendo así un comportamiento inelástico.

Por otra parte la NSR-10 (A.6.1.2) contempla un requisito en cuanto a deformaciones o desplazamientos horizontales entre dos puntos colocados en la misma línea vertical, en dos pisos o niveles consecutivos de la edificación, la cual es llamada deriva. Ésta debe ser máximo 1% con respecto a la altura del piso, (ver los desplazamientos en la figura 6), se acepta este valor con el fin de evitar daños considerables en los elementos no estructurales.

Figura 6. Procedimiento verificación de derivas (NSR-10)



Fuente: (Araque, 2015).

“La deriva está asociada con los siguientes efectos durante un temblor:

a) Deformación inelástica de los elementos estructurales y no estructurales.

b) Estabilidad global de la estructura.

c) Daño a los elementos estructurales que no hacen parte del sistema de resistencia sísmica y a los elementos no estructurales, tales como muros divisorios, particiones, enchapes, acabados, instalaciones eléctricas, mecánicas, etc.” (A.6.1.3).

5.3.4 Elementos estructurales

Para la buena funcionalidad de una estructura se debe considerar que todos los elementos trabajan en conjunto, es por ello que se define como elemento estructural a cualquiera de sus componentes como lo es la, viga, losa, columna, etc. (Morales, 2013), para un correcto análisis se debe conocer el comportamiento de cada uno de los elementos. Se puede clasificar los elementos estructurales según su forma:

a) Elementos con una dimensión dominante. Por ejemplo: vigas, columnas, pilares, pilotes.

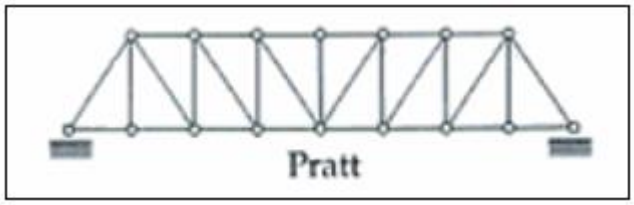
b) Elementos con dos dimensiones dominantes. Por ejemplo: losas, láminas, bóvedas, etc.

c) Elementos con las tres dimensiones semejantes. Por ejemplo: bloques de cimentación, cabezales de pilotes.

5.3.4.1 Tipos de estructura. El conjunto de elementos estructurales, así como también los materiales son conocidos como sistemas estructurales (Hibbeler, 2012). Cada sistema está constituido con uno o más de los cuatro tipos básicos de estructuras. De acuerdo a la complejidad a la hora de hacer un análisis de fuerzas se clasifican de la siguiente manera:

a) Armaduras. Consisten en elementos delgados que forman triángulos entre sí, se utilizan para cubiertas, torres, grúas y puentes en general, (Hibbeler, 2012), debido a la geometría que presentan, (ver figura 7), las fuerzas de los elementos son en tensión o compresión, esto causado por la carga aplicada sobre dicha armadura.

Figura 7. Armadura tipo Pratt



Fuente: (Meriam, 2004)

b) Cables y arcos. Se emplean por lo general en puentes, aunque para estructuras como cúpulas, es necesario la implementación del arco. La diferencia relevante es que los cables además de ser flexibles, soportan cargas en tracción, siendo estos elementos los soportes del tablero de un puente, mientras que los arcos son rígidos y estos están sometidos a cargas de compresión, tal y como se muestra en las figuras 8 y 9 respectivamente.

Figura 8. Cables soportando cargas a tensión

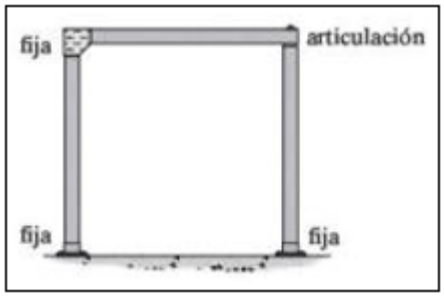
Fuente: (Hibbeler, 2012)

Figura 9. Arcos soportando cargas a compresión

Fuente: (Hibbeler, 2012).

c) Marcos. Es el tipo de estructura más común en lo referente a edificios y demás estructuras verticales, están compuestos por vigas y columnas conectadas rígidamente o mediante articulaciones. Al igual que las vigas, los marcos se extienden en dos o tres dimensiones y su resistencia se deriva de las interacciones de momento entre vigas y las columnas en las uniones rígidas.

Figura 10. Pórtico o marco estructural



Fuente: (Hibbeler, 2012).

En la figura 10, se evidencia un marco, en el cual los elementos están sometidos a cargas internas axiales, cortantes y de momento.

5.3.4.2 Clasificación estática de las estructuras.

Para clasificar una estructura, se debe tener en cuenta el grado de indeterminación estática, ya que es este factor un punto de partida para clasificar la estructura, según (Basset, 2012), “el grado de indeterminación estática (GIE) o grado de hiperestaticidad es el número de fuerzas redundantes de la estructura, es decir, el número de fuerzas incógnita independientes que no pueden determinarse mediante las ecuaciones de equilibrio de la estructura, dado que el número de incógnitas estáticas excede el número total de ecuaciones de equilibrio disponibles”. De acuerdo a lo anterior se establece que el GIE se obtiene descontando del número total de incógnitas estáticas el número de ecuaciones de equilibrio.

A continuación se clasifican las estructuras, según el grado de indeterminación estática:

a) Estructuras isostáticas: GIE=0 (estáticamente determinada y adecuada, con una única configuración).

b) Estructuras hiperestáticas: GIE>0 (estáticamente indeterminada y adecuada, con infinitas configuraciones).

c) Estructuras hipostáticas: GIE<0 (estructura inestable que no puede equilibrarse).

5.4 MARCO LEGAL

Para entender la implementación del modelo didáctico en el laboratorio se debe comprender la analogía de éste con una estructura a escala real, es por ello, que se deben tener en cuenta los criterios y normas que un ingeniero civil debe tener a la hora de diseñar una estructura.

De acuerdo con la normativa actual (NSR-10), “el diseño, construcción y supervisión técnica de edificaciones en el territorio de la República de Colombia debe someterse a los criterios y requisitos mínimos que se establecen en la Norma:

a) La Ley 400 de 1997, NSR-98

b) La Ley 1229 de 2008

c) NSR-10.

d) Las resoluciones expedidas por la “Comisión Asesora Permanente del Régimen de Construcciones Sismo Resistentes” del Gobierno Nacional, adscrita al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, y creada por el Artículo 39 de la Ley 400 de 1997.

Así mismo, los siguientes apartados de la NSR-10, son indispensables para el desarrollo del proyecto, ya que, se establecen requisitos especiales para el diseño y construcción sismo resistente de edificaciones.”

5.4.1 Análisis sísmico de una estructura

“El análisis sísmico de la estructura se lleva a cabo aplicando los movimientos sísmicos de diseño prescritos, a un modelo matemático apropiado de la estructura, tal como se define en el Capítulo A.3. Este análisis se realiza para los movimientos sísmicos de diseño sin ser divididos por el coeficiente de capacidad de disipación de energía, R. Deben determinarse los desplazamientos máximos que imponen los movimientos sísmicos de diseño a la estructura y las fuerzas internas que se derivan de ellos.” (NSR-10, A.1.3-1).

5.4.2 Métodos de análisis

Los métodos de análisis, que se describen a continuación, son tomados de la NSR-10.

*“*5.4.2.1 Método de la fuerza horizontal equivalente.

Puede utilizarse el método de la fuerza horizontal equivalente en las siguientes edificaciones (NSR-10, A.3.4.2.1):

a) Todas las edificaciones, regulares e irregulares, en las zonas de amenaza sísmica baja.

b) Todas las edificaciones, regulares e irregulares, pertenecientes al grupo de uso I, localizadas en zonas de amenaza sísmica intermedia.

c) Edificaciones regulares, de 20 niveles o menos y 60 m de altura o menos medidos desde la base, en cualquier zona de amenaza sísmica, exceptuando edificaciones localizadas en lugares que tengan un perfil de suelo tipo D, E o F, con periodos de vibración mayores de 2TC.

d) Edificaciones irregulares que no tengan más de 6 niveles ni más de 18 m de altura medidos a partir de la base.

5.4.2.2 Método del análisis dinámico elástico.

Debe utilizarse el método del análisis dinámico elástico en todas las edificaciones que no estén cubiertas por el método de fuerza horizontal equivalente, incluyendo las siguientes (NSR-10, A.3.4.2.2):

a) Edificaciones de más de 20 niveles o de más de 60 m de altura, exceptuando las edificaciones mencionadas en la fuerza horizontal equivalente a) y b).

b) Edificaciones de más de 5 niveles o de más de 20 m de altura, localizadas en zonas de amenaza sísmica alta, que no tengan el mismo sistema estructural en toda su altura.

c) Estructuras, regulares o irregulares, localizadas en sitios que tengan un perfil de suelo D, E o F y que tengan un período mayor de 2TC. En este caso el análisis debe incluir los efectos de interacción suelo-estructura, cuando se realice un análisis de la estructura suponiéndola empotrada en su base.

5.4.2.3 Método del análisis dinámico inelástico.

El método del análisis dinámico inelástico se usa en aquellos casos que se presenten variaciones en la capacidad de disipación de energía en el rango inelástico que solo sea posible identificar por este procedimiento (NSR-10, A.3.4.2.3).

5.4.2.4 Método de análisis no lineal estático de plastificación progresiva.

Puede utilizarse el método del análisis no lineal estático, conocido como procedimiento “push-over” o de plastificación progresiva, en aquellos casos que la capacidad de disipación de energía en el rango inelástico por este procedimiento. Cuando se utilice este método de análisis deben cumplirse los requisitos dados y además se deben confrontar con otro de los métodos de análisis permitidos por el Reglamento, utilizando en el diseño lo más exigente (NSR-10, A.3.4.2.4).

5.4.3 Efectos sísmicos en los elementos estructurales

Tal como lo establece la NSR-10, todos los elementos estructurales deben diseñarse para los efectos de los movimientos sísmicos de diseño que actúen sobre ellos.

Es incuestionable que las edificaciones son resistentes ante un sismo solo si todos sus componentes estructurales se comportan como una sola estructura monolítica, es por ello que, (NSR-10, A.3.6.1), solamente los elementos que pertenezcan al sistema estructural de resistencia sísmica pueden contribuir a la resistencia sísmica de la edificación y deben diseñarse de acuerdo con los requisitos propios de su material estructural y para el grado de capacidad de disipación de energía requerido.”

6. METODOLOGÍA

6.1 DIMENSIONAMIENTO

Para la realización del proyecto de grado, en primera instancia, se hicieron diseños preliminares para los prototipos de los pórticos a construir, teniendo en cuenta los materiales a emplear, así como también el tiempo requerido.

Se tomó como referencia parámetros establecidos en investigaciones previas, para ser consideradas en todo lo relacionado con la construcción de modelos didácticos en estructuras.

6.2 CONSTRUCCIÓN PROTOTIPOS

En la demostración de los modos de vibración se construyó una estructura en metal de 5 niveles, siendo todos los nodos fijos o rígidos, estimando las dimensiones de la mesa vibratoria. Por otra parte, el pórtico bidimensional y tridimensional son con apoyos fijos y empotrados, con el fin de poder evidenciar y/o comparar la deformación que se presentan en ellos.

6.3 SELECCIÓN Y MANIPULACIÓN DE EQUIPO

Para la demostración de los modos de vibración se calibró la potencia del motor para generar el periodo, la aceleración y frecuencia adecuada, con el fin de demostrar el comportamiento de la estructura.

6.4 ANÁLISIS Y ELABORACIÓN DE GUÍAS DE LABORATORIO

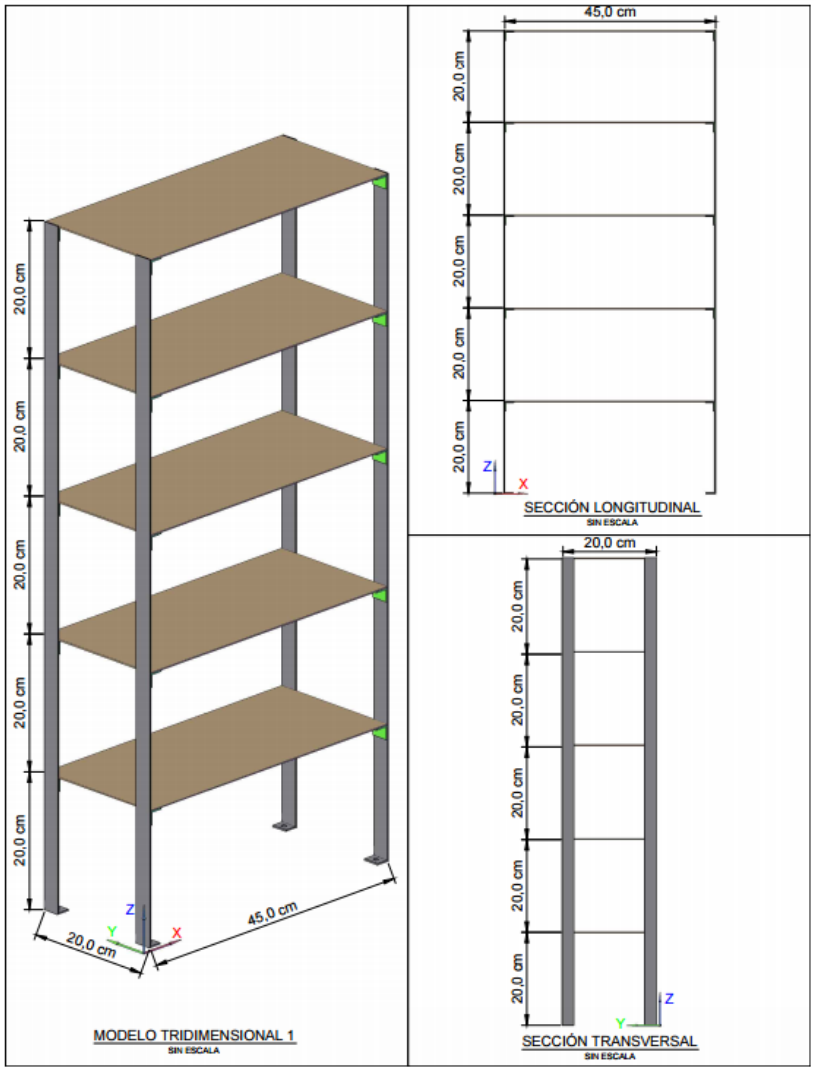
Se compararon los comportamientos obtenidos en los diferentes modos de vibración, con el fin de poder evaluar cómo es el periodo y la aceleración al momento de aplicar y/o aumentar progresivamente las revoluciones del motor. Por otra parte,

se tuvo un análisis cualitativo de la teoría y conceptos empleados, con el fin de evaluar los apoyos y los nodos de los prototipos, para verificar que dichos pórticos son apropiados como elementos adicionales de aprendizaje en el laboratorio de estructuras, por otra parte se tiene en cuenta la elaboración de guías para el laboratorio de estructuras, siendo así un aporte para la comunidad estudiantil, en lo relacionado con la introducción a la dinámica y las deformaciones de las estructuras.

7. DISEÑO GEOMÉTRICO PROTOTIPOS

7.1 PROTOTIPO MODOS DE VIBRACIÓN

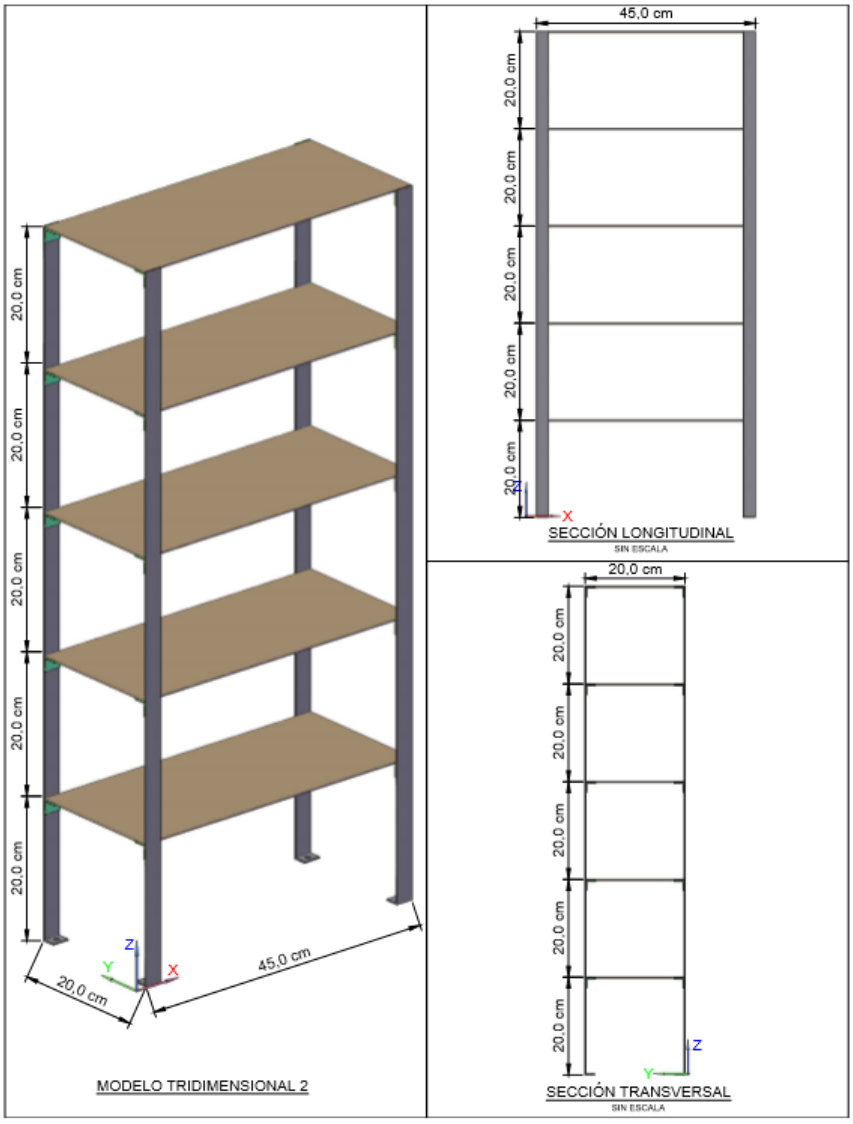
Figura 11. Estructura de 5 Niveles con rigidez tipo 1



Fuente: Autores

En la figura 11, se muestra la primera opción para simular el sismo en la mesa vibratoria, las medidas propuestas de piso a piso son suficientes para mostrar los modos de vibración. Paralela al eje “Y” se encuentra la dimensión de mayor magnitud de la columna.

Figura 12. Estructura de 5 Niveles con rigidez tipo 2



Fuente: Autores

En la figura 12, a diferencia del anterior modelo propuesto, se presentan las columnas en diferente posición (diferente medida en cuanto la base), con lo cual se logra diferente inercia, en este caso, se coloca la dirección más larga de la columna paralela a la dirección “X”.

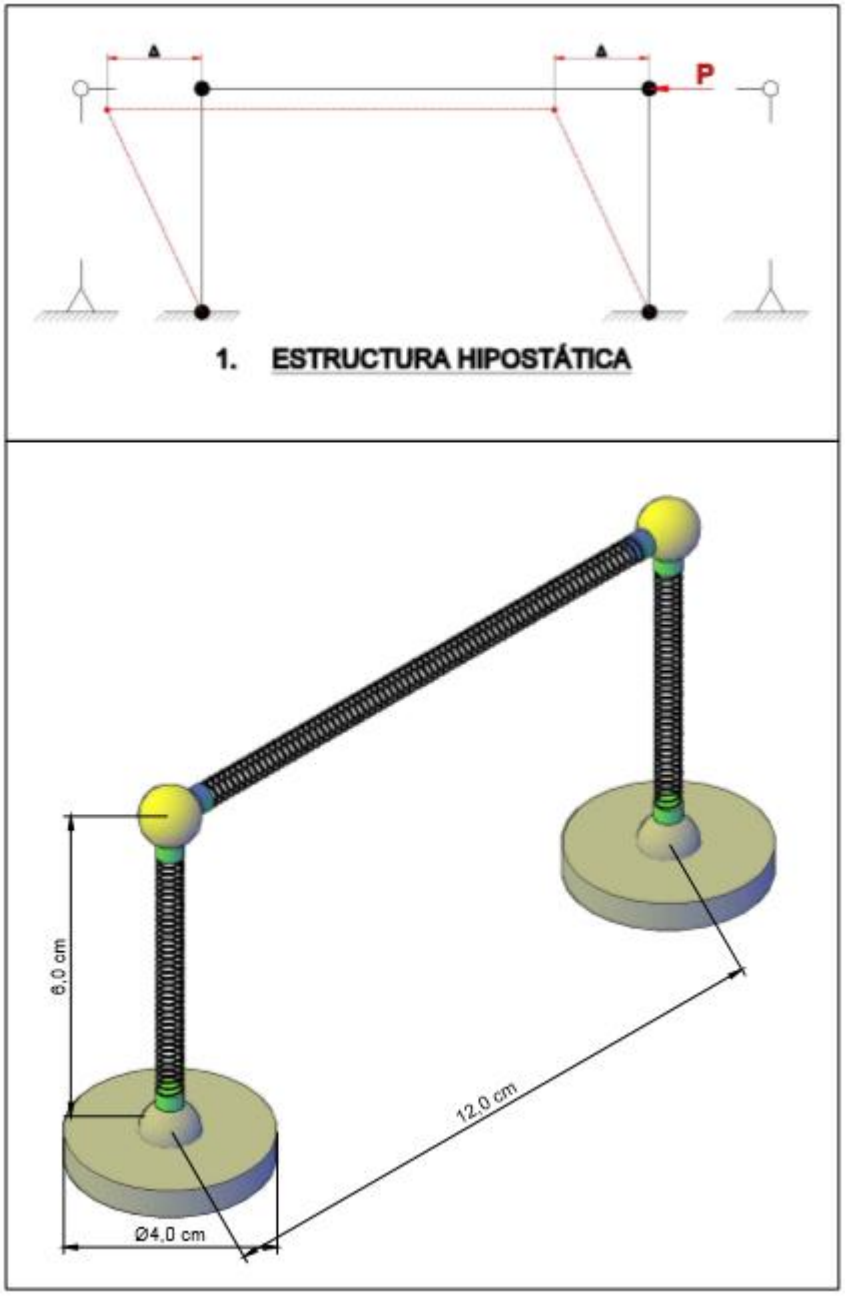
Para los anteriores modelos se emplearon los siguientes materiales con los siguientes módulos de elasticidad:

a) Lámina Galvanizada: 28 Kg/mm^2

b) Placas de madera: 24.532 kg/m^2

7.2 PROTOTIPO BIDIMENSIONAL

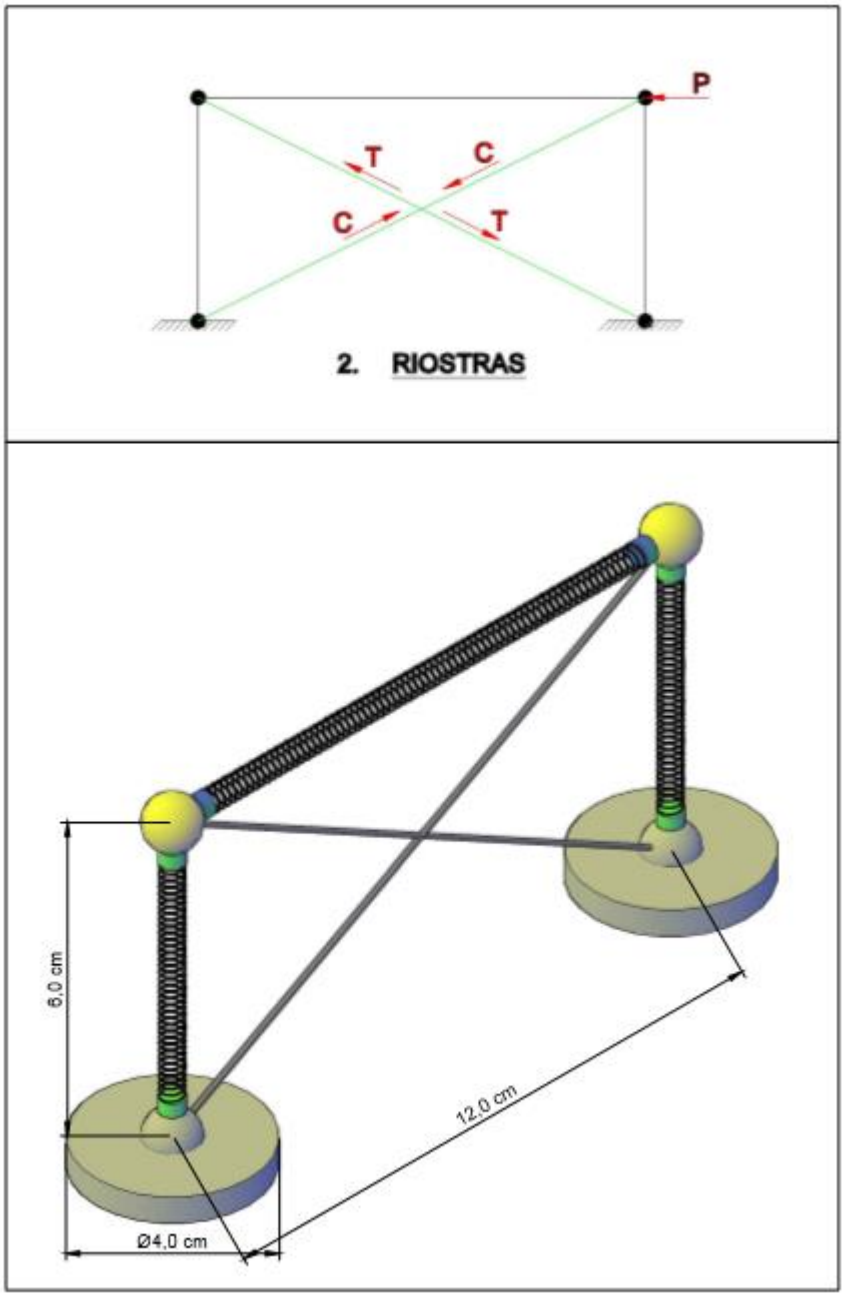
Figura 13. Pórtico bidimensional hipostático



Fuente: Autores

En la figura 13, se presenta la deformada de un pórtico inestable, se consideró medidas de 6cm de altura y 12cm distancia entre columnas.

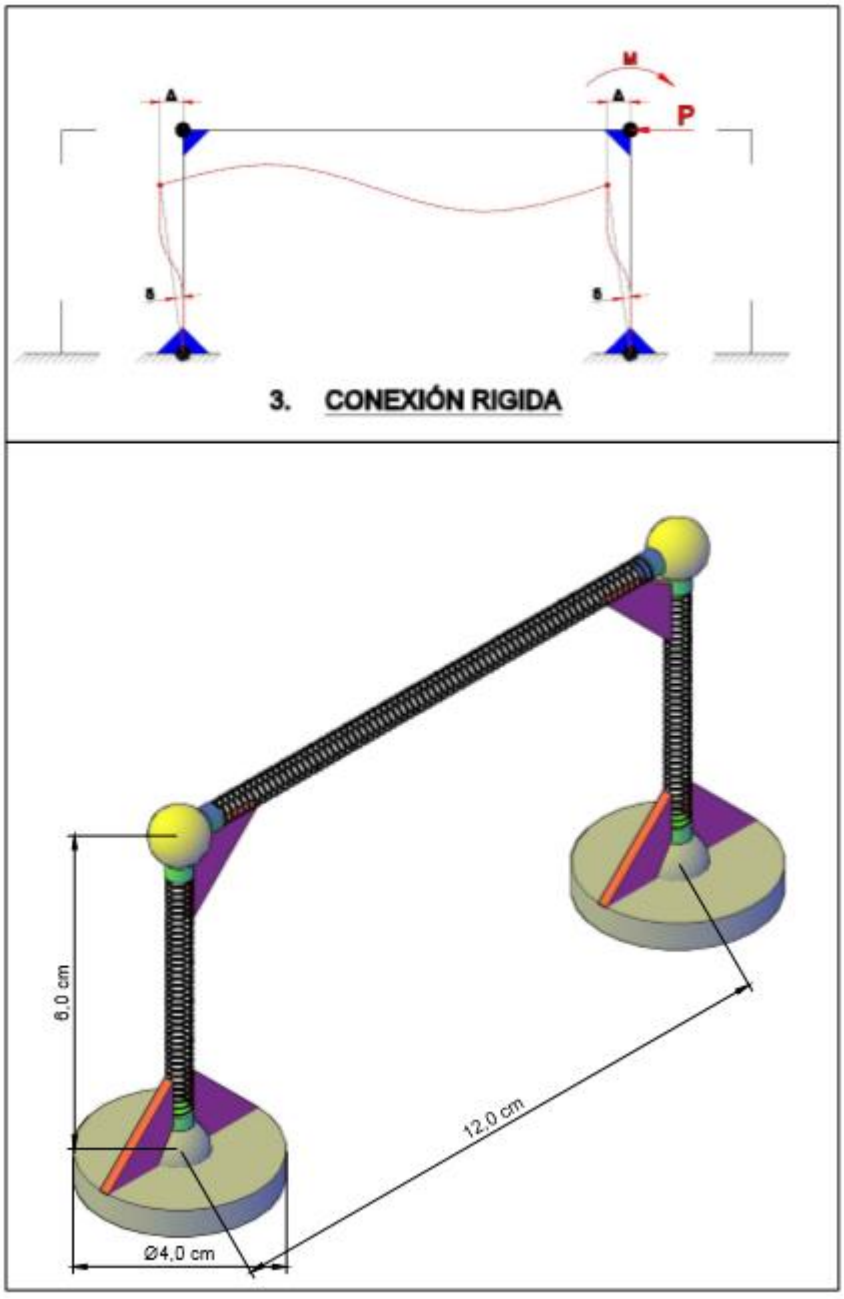
Figura 14. Pórtico bidimensional con riostras



Fuente: Autores

En la figura 14, se establece una forma de rigidizar la estructura por medio de riostras, las cuales están sometidas a fuerzas de tracción y compresión.

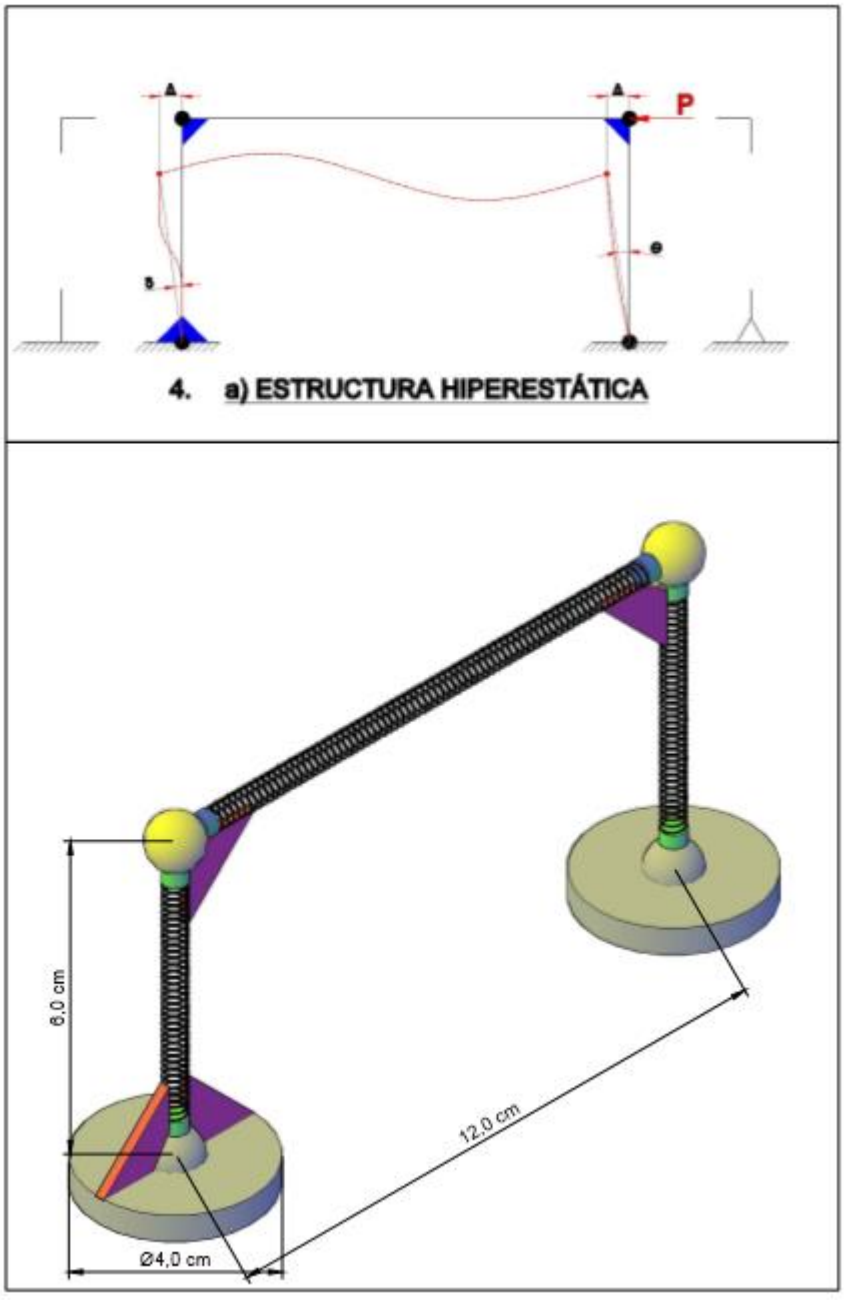
Figura 15. Pórtico bidimensional con conexiones rígidas.



Fuente: Autores.

En la figura 15, se simula apoyos empotrados, así como también las uniones rígidas columna-viga.

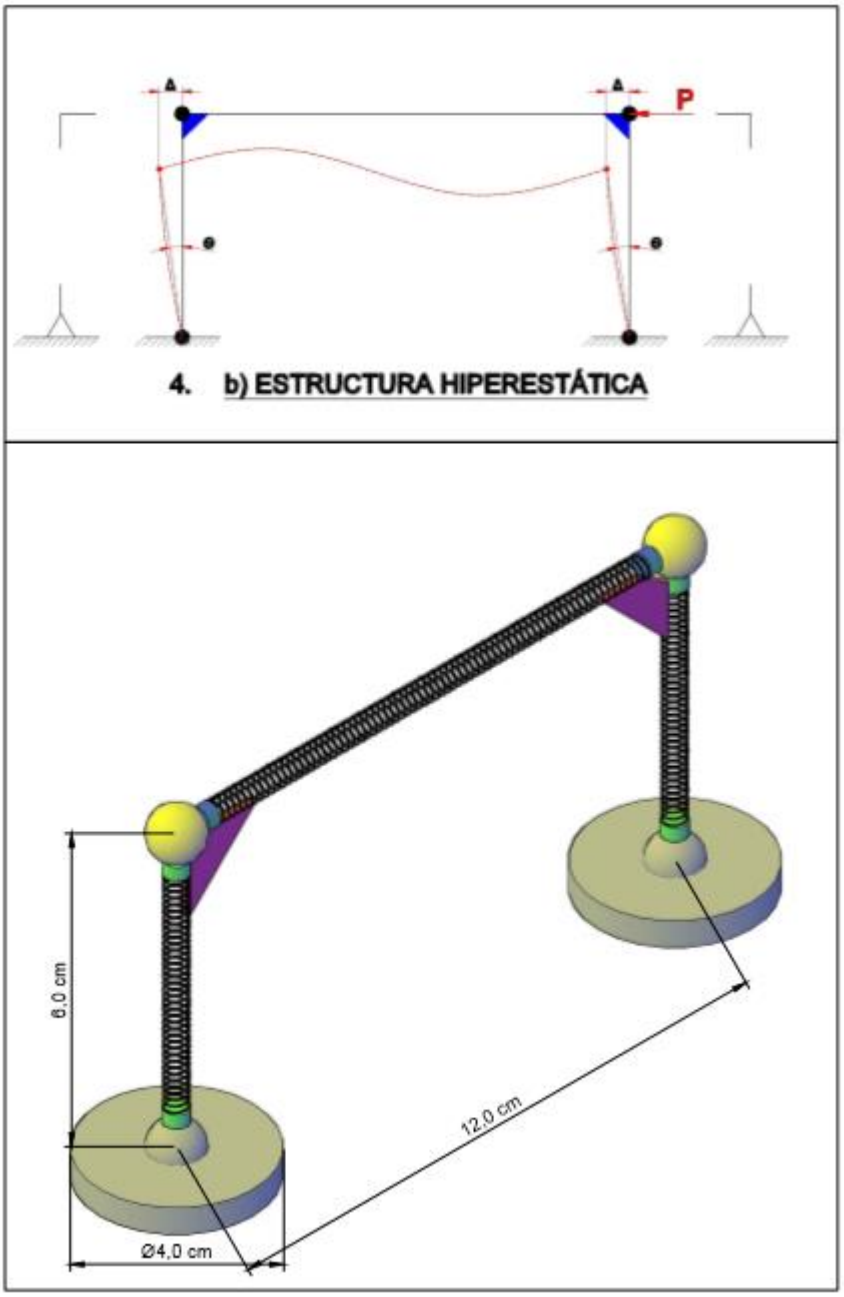
Figura 16. Pórtico bidimensional hiperestático configuración 1



Fuente: Autores

En la figura 16, se implementa un apoyo articulado y otro fijo o empotrado, conservando las uniones rígidas.

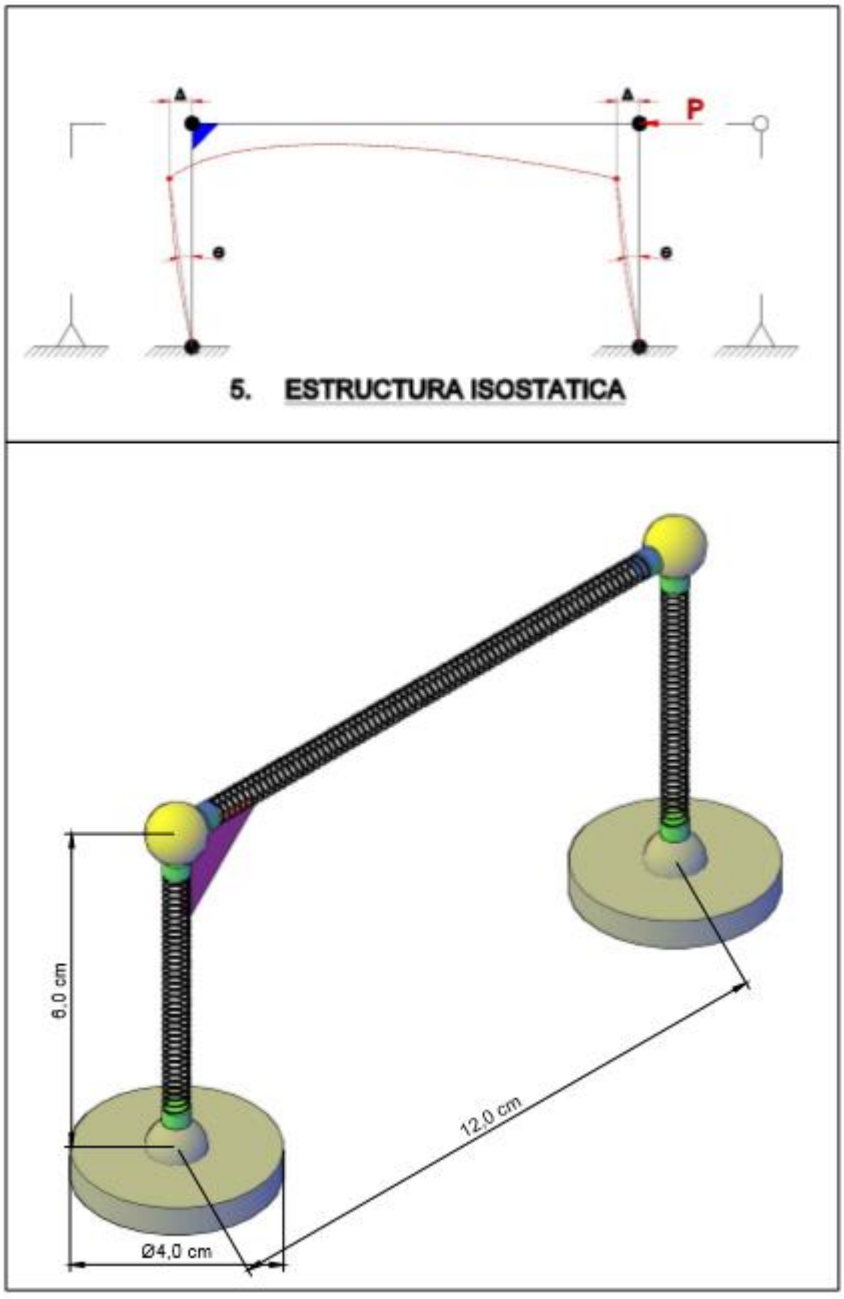
Figura 17. Pórtico bidimensional hiperestático configuración 2



Fuente: Autores

En la figura 17, se consideró como parámetro de comparación un marco con apoyos articulados y uniones rígidas.

Figura 18. Pórtico bidimensional isostático

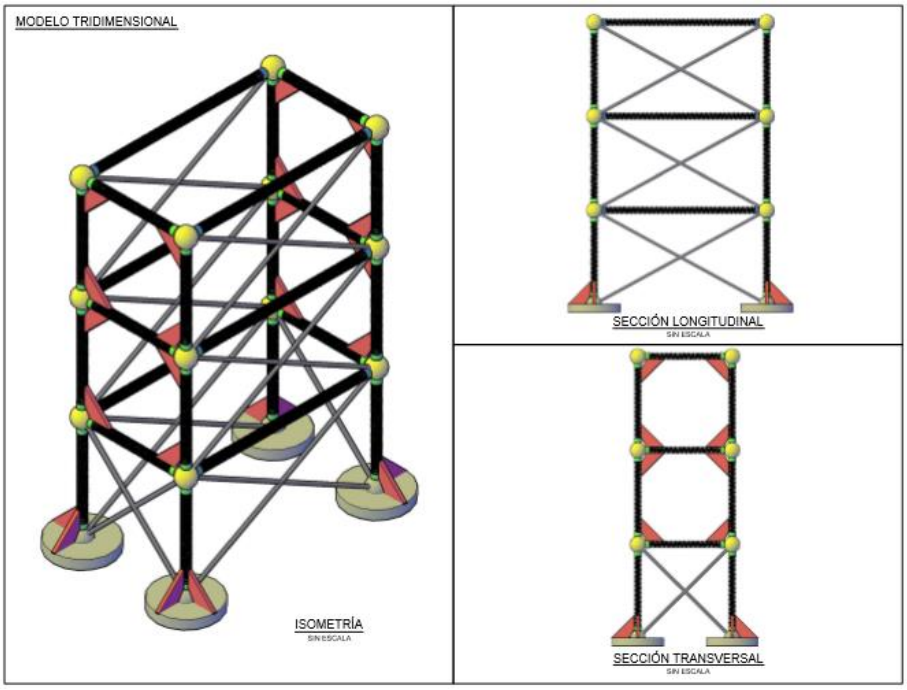


Fuente: Autores.

En la figura 18, el pórtico presenta una configuración admisible con un apoyo rígido, esto como una forma de configuración isostática.

7.3 PROTOTIPO TRIDIMENSIONAL

Figura 19. Pórtico tridimensional Hiperestático.



Fuente: Autores.

En la figura 19, se muestra una configuración con todos los elementos disponibles para lograr una estructura adecuada en cuanto a estabilidad, siendo así hiperestática de 3 niveles.

Para los anteriores modelos se emplearon los siguientes materiales con los siguientes módulos de elasticidad:

a) Resortes alambre de 1 mm: 67.6 MPa

b) Acero ridigizadores: 2100000kg/cm²

8. ANÁLISIS CONCEPTUAL DE LOS MODELOS

Para la demostración de los modos de vibración, se emplean dos modelos (ver figuras 11 y 12), esto con el fin de que, el estudiante pueda determinar cómo la inercia en función de las bases de las columnas establece un criterio para la resistencia de la estructura.

Por otra parte, se puede comprender de forma eficaz cómo es la deformación de cada una de las estructuras, además de brindar al estudiante un hecho relevante a la hora de contemplar el diseño y/o la geometría de los elementos para la realización o evaluación de una estructura idónea.

Para el análisis de estructuras se contempló todo lo relacionado con la clasificación de estructuras, esto con el fin de que el estudiante pueda lograr determinar con certeza si una estructura es estable y adecuada, todo esto de acuerdo al tipo de configuración.

Es por ello, que en el primer modelo (ver figura 13), se establece una estructura con apoyos y uniones articuladas, con propósito de que, el estudiante experimentalmente se dé cuenta de la inestabilidad del pórtico. Así mismo se dispone a rigidizar dicha estructura con riostras (ver figura 14), para comparar como es la deformada de la estructura rigidizada con la estructura sin riostras.

Para el análisis de una estructura hiperestática, se asigna un modelo con apoyos y uniones rígidas (ver figura 15), con el objetivo de evidenciar cómo se impide el ladeo del pórtico, este tipo de marco es el más común en la construcción de estructuras verticales.

Por otra parte, se analiza la estabilidad de las estructuras siguientes quitando los ángulos, los cuales simulan un apoyo empotrado o una unión rígida, esto con el fin de ver cómo es la deformada de una estructura de hiperestática a isostática. (Ver figuras 16,17 y 18).

CONCLUSIONES

Se pudieron establecer satisfactoriamente los modos de vibración de un modelo didáctico, esto con el propósito de brindar un concepto básico acerca de la dinámica estructural. Con este punto de inicio se afianzaron conceptos teóricos como, la deformación en función de la rigidez, el material empleado y la afectación de estabilidad que se genera a causa de las longitudes de los elementos.

Así mismo, se tuvo en cuenta que para determinar los modos de vibración del modelo, se calibró la potencia del motor para alterar el periodo natural de la estructura y así evidenciar los modos.

Otro parámetro que se analizó, fue la diferencia de grados de libertad entre la estática y la dinámica, ya que, en el análisis estructural, los grados de libertad son los posibles desplazamientos en los nodos de los elementos, los cuales permiten brindar una deformada de la estructura, mientras que los grados de libertad en dinámica, tienen asociada la masa y permiten establecer vibraciones en función del tiempo.

Se reforzó el conocimiento en cuanto a las deformaciones de las estructuras, debido al tipo de apoyos o uniones empleados en los pórticos bidimensionales y tridimensionales, puesto que gracias a la clasificación estática de las estructuras se puede establecer si son isostáticas, hiperestáticas o hipostáticas, esto debido al grado de indeterminación estática la cual está ligada a los tipos de apoyos, elementos y uniones de una estructura.

Se implementó eficazmente el laboratorio de estructuras gracias a los prototipos, además de la elaboración de guías de laboratorio, ya que, es un aporte a la formación de estudiantes de ingeniería civil, y con esto una herramienta más a las materias de la línea de estructuras tales como: estática, mecánica de sólidos, análisis estructural, entre otras de la Universidad Católica de Colombia.

RECOMENDACIONES

Se sugiere, para poder implementar y realizar un análisis cuantitativo de los diferentes conceptos, implementar equipos de medición a los prototipos y/o software.

Para investigaciones futuras se propone complementar el modelo de la mesa vibratoria con disipadores, para poder evidenciar las reducciones de energía y así proporcionar conceptos en cuanto a fenómenos de amortiguamiento.

De acuerdo a los modelos didácticos, en los cuales se pueden formar diferentes tipos de pórticos, se propone, acrecentar los tipos de marcos, mediante diferentes tipos de arriostramientos, tales como: pórticos arriostrados concéntricamente (PAC), pórticos arriostrados excéntricamente (PAE) y pórticos arriostrados con barras de pandeo restringido (PAPR). Esto como apoyo a la materia de estructuras metálicas, ya que, estos tipos de estructuras son comunes en dicha área y serian de gran importancia considerar sus respectivos análisis.

BIBLIOGRAFIA

AIS. (180-13). *Recomendaciones para requisitos sísmicos de estructuras diferentes de edificaciones.* Bogotá: Asociación Colombiana De Ingenieria Sismica.

Alonso, F. M. (2013). *XFMA*. Obtenido de ESTRUCTURAS SISMORESISTENTES. ANALISIS MODAL ESPECTRAL. CAPÍTULO 2: [en línea] 20 de 03 de 2017. https://xfma.wordpress.com/2013/02/19/estructuras-sismoresistentes-analisis-modal-espectral-capitulo-2/.

Araque, Y. (2015). *Guía para el cálculo de la fuerza horizontal equivalente y derivas según título a4-a6 nsr-10.* Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.

Basset, L. (2012). *Clasificación estática de las estructuras.* España: Universidad Politécnica de Valencia.

Beer, F.P. (2013). *Mecánica vectorial para ingenieros*. 10ma edición. México: Mc Graw Hill.

Caballero, M. (2014).*Análisis de solicitaciones y deformaciones en vigas curvas*. Uruguay. Instituto de Estructuras y Transporte. Facultad de Ingeniería, Universidad de la Republica.

Cassano, A. M. (2009). *Análisis de estructuras bajo acciones dinámicas*. Paraná, Argentina: Universidad Tecnológica Nacional.

Cervantes, A. (2013). *Análisis de barra con un extremo empotrado*. Cartagena: Escuela politécnica de Cartagena.

Diccionario de Arquitectura y Construcción. Obtenido de http://www.parro.com.ar. [en línea] 20 de 03 de 2017.

FOPAE. (2010). *Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño resistente de edificaciones*. Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá.

García, L.E. (2005). *Notas de Dinámica estructural*. Bogotá: Universidad de los Andes.

Hibbeler, R.C. (2012). *Análisis estructural.* 8va edición. México: Pearson educación.

Heyman, J. (2001). *La ciencia de las estructuras.* España: Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.

Hurtado,J.E (2000). *Introducción a la dinámica de estructuras*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.

Jaramillo, J.O. (2004). *Análisis clásico de estructuras.* Bogotá: Unibiblios.

Martínez, P. (1997). *Medición del módulo de elasticidad de Young*. DTO de física Universidad de Buenos Aires.

Meriam, J.L. (2004). *Mecánica para ingenieros. Estática.* Vol. 1. 3ra edición. España: Editorial reverté.

Morales, R. F. (2013). *XFMA*. Obtenido de DEFORMACIONES DE LAS ESTRUCTURAS:[en línea] 20 de 03 de 2017. www.um.edu.ar/ojs-new/index.php/RUM/article/download/107/127.

Prieto, N. (2012). *La Gran Muralla China*. Obtenido de http://tectonicablog.com/?p=50622:[en línea] 20 de 03 de 2017.

Real Academia de Ingenieria. Obtenido de http://diccionario.raing.es.[en línea] 20 de 03 de 2017.

Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), Capitulo A.

Reyes, L. E. (1998). *Dinamica Estructural Aplicada al Diseño Sismico.*Bogotá: Universidad De Los Andes.

Ruiz, C.(2005). *Consideraciones generales sobre dinámica estructural*. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba.

Romero, M. (2002). *Resistencia de materiales*. España: Universidad Jaume I.

Shatzman, N. (2004). *The Tang Architectural Icon and the Politics of Chinese Architectural History*. The Art Bulletin (Volume 86, Number 2).

Tejada, M. (2011).*Análisis dinámico de estructuras en el dominio de la frecuencia*. España: Universidad politécnica de Madrid.

ANEXOS

Anexo A. Manual mesa vibratoria.

Anexo B. Manual elementos estructurales didácticos.

Anexo C. Guía de laboratorio para estudiante (Clasificación de estructuras).

Anexo D. Guía de laboratorio para estudiante (Introducción a la dinámica).