



UNIVERSIDAD LATINA DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL
TESIS DE GRADO

**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS DIAFRAGMAS DE
TECHO MODELADOS MEDIANTE EL MÉTODO DEL ELEMENTO
FINITO EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL SISMORESISTENTE DE
ESTRUCTURAS DE ACERO TIPO “NAVE INDUSTRIAL”**

Autor: Minor Gabriel Guadamuz Rojas

Tutor: Ing. Gerardo Chacón Rojas

Heredia, Enero 2019

TRIBUNAL EXAMINADOR

Este proyecto titulado: "EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS DIAFRAGMAS DE TECHO MODELADOS MEDIANTE EL MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL SISMORESISTENTE DE ESTRUCTURAS DE ACERO TIPO "NAVE INDUSTRIAL.", fue aprobado por el Tribunal Examinador de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad Latina, Sede Heredia, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil:



ING. GERARDO ENRIQUE CHACÓN ROJAS

TUTOR



ING. RONALD EUGENIO JIMENEZ CASTRO

LECTOR



ING. SIRLEY ALVAREZ GONZÁLEZ

REPRESENTANTE DE RECTORÍA

COMITÉ ASESOR

ING. GERARDO ENRIQUE CHACÓN ROJAS

TUTOR

ING. RONALD EUGENIO JIMENEZ CASTRO

LECTOR

ING. SIRLEY ALVAREZ GONZÁLEZ

REPRESENTANTE DE RECTORÍA

**CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL PROFESOR TUTOR DEL
TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN MODALIDAD TESIS DE GRADO**

Heredia, 16 de enero, de 2019

Sres.
Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación
SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, modalidad Tesis de Grado bajo el título "EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS DIAFRAGMAS DE TECHO MODELADOS MEDIANTE EL MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL SISMORESISTENTE DE ESTRUCTURAS DE ACERO TIPO "NAVE INDUSTRIAL" por parte del estudiante: Minor Gabriel Guadamuz Rojas, como requisito para que el citado estudiante puedan optar por la Licenciatura en Ingeniería Civil.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el Consejo Asesor.

Suscribe cordialmente,


Ing. Gerardo Chacón

**CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL PROFESOR LECTOR DEL
TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN MODALIDAD TESIS DE GRADO**

Heredia, 16 de enero, de 2019

Sres.
Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación
SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, modalidad Tesis de Grado bajo el título "EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS DIAFRAGMAS DE TECHO MODELADOS MEDIANTE EL MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL SISMORESISTENTE DE ESTRUCTURAS DE ACERO TIPO "NAVE INDUSTRIAL" por parte del estudiante: Minor Gabriel Guadamuz Rojas, como requisito para que el citado estudiante puedan optar por la Licenciatura en Ingeniería Civil.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el Consejo Asesor.

Suscribe cordialmente,


Ing. Ronald Jiménez

“Carta Autorización del autor(es) para uso didáctico del Trabajo Final de Graduación”

Vigente a partir del 31 de Mayo de 2016

Instrucción: Complete el formulario en PDF, imprima, firme, escanee y adjunte en la página correspondiente del Trabajo Final de Graduación.

Yo (Nosotros):

Escriba Apellidos, Nombre del Autor(s). Para más de un autor separe con " ; "

Guadamuz Rojas Minor Gabriel

De la Carrera / Programa: Licenciatura en Ingeniería Civil
autor (es) del (de la) *(Indique tipo de trabajo):* Tesis de Grado
titulado:

EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS DIAFRAGMAS DE TECHO MODELADOS MEDIANTE EL MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL SISMORESISTENTE DE ESTRUCTURAS DE ACERO TIPO "NAVE INDUSTRIAL"

Autorizo (autorizamos) a la Universidad Latina de Costa Rica, para que exponga mi trabajo como medio didáctico en el Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación (CRAI o Biblioteca), y con fines académicos permita a los usuarios su consulta y acceso mediante catálogos electrónicos, repositorios académicos nacionales o internacionales, página web institucional, así como medios electrónicos en general, internet, intranet, DVD, u otro formato conocido o por conocer; así como integrados en programas de cooperación bibliotecaria académicos dentro o fuera de la Red Laureate, que permitan mostrar al mundo la producción académica de la Universidad a través de la visibilidad de su contenido.

De acuerdo con lo dispuesto en la Ley No. 6683 sobre derechos de autor y derechos conexos de Costa Rica, permita copiar, reproducir o transferir información del documento, conforme su uso educativo y debiendo citar en todo momento la fuente de información; únicamente podrá ser consultado, esto permitirá ampliar los conocimientos a las personas que hagan uso, siempre y cuando resguarden la completa información que allí se muestra, debiendo citar los datos bibliográficos de la obra en caso de usar información textual o paráfrasis de esta.

La presente autorización se extiende el día *(Día, fecha)* Jueves 25 del mes Enero del año 2019 a las 12:00 pm . Asimismo declaro bajo fe de juramento, conociendo las consecuencias penales que conlleva el delito de perjurio: que soy el autor(a) del presente trabajo final de graduación, que el contenido de dicho trabajo es obra original del (la) suscrito(a) y de la veracidad de los datos incluidos en el documento. Eximo a la Universidad Latina; así como al Tutor y Lector que han revisado el presente, por las manifestaciones y/o apreciaciones personales incluidas en el mismo, de cualquier responsabilidad por su autoría o cualquier situación de perjurio que se pudiera presentar.

Firma(s) de los autores *Según orden de mención al inicio de ésta carta:*



San José, 24 de enero de 2019

Universidad Latina de Costa Rica
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Escuela de Ingeniería Civil
Comité Trabajos Finales de Graduación

A quien corresponda:

Por este medio hago constar que he sometido el documento *Evaluación de la influencia de los diafragmas de techo modelados mediante el Método del Elemento Finito en el diseño estructural sísmoresistente de estructuras de acero tipo "nave industrial"* del estudiante Minor Gabriel Guadamuz Rojas, a una corrección filológica que comprende aspectos de cohesión, coherencia, sintácticos y ortográficos.



Laura Godínez Rojas

Carnet 62230

Lic. Filología Española

Agradecimientos

A Dios, por tantas bendiciones.

A mis padres Mainor Guadamuz y Thais Rojas, por su apoyo incondicional y amor.

A mi hermana Pamela Guadamuz, por su motivación y consejo.

A mi tutor Gerardo Chacón, por compartirme sus conocimientos y brindarme su guía durante este proyecto.

A mis amigos, profesores y compañeros, por sus enseñanzas y gratos recuerdos.

Dedicatoria

A mis padres y hermana, por haber estado presentes en cada etapa de este proceso.

A mi familia y amigos, por todos sus gestos de amor y solidaridad con mi persona.

Epígrafe

“No es grande el que siempre triunfa, sino el que jamás se desalienta”. J. L.

Martín Descalzo

RESUMEN

Diversos estudios internacionales han demostrado la rigidez y capacidad a cortante que pueden caracterizar a los diafragmas de techo.

En Costa Rica el diafragma de techo no es considerado en el diseño y cálculo estructural de las naves industriales.

Se modelan mediante el método del elemento finito 6 naves industriales de acero, de las cuales tres incluyen el diafragma de techo en su diseño, y se utiliza el software de diseño estructural SAP 2000 para su análisis sísmico.

Se realizan experimentos en la búsqueda de demostrar la influencia de incluir los diafragmas de techo en el diseño estructural en las derivas, el periodo y el peso de las naves industriales. Para la posterior comparación de los resultados del ahorro de peso por unidad de área obtenidos en el presente trabajo, con los de la tesis para obtener el grado de licenciatura del Ing. Alonso Aguilar.

Se determina que los diafragmas de techo poseen un comportamiento de diafragma rígido frente a cargas laterales, que la inclusión de este en el diseño estructural aumenta los periodos de oscilación de las estructuras y con esto se logran disminuir las fuerzas sísmicas de diseño.

Se determina que al incluir el diafragma de techo en el diseño estructural se obtiene un ahorro significativo en los elementos estructurales de la nave industrial y su peso global.

Se comparan los resultados del porcentaje de ahorro en peso de las estructuras obtenidos con el método del elemento finito contra los obtenidos mediante el método de la cercha y ambos convergen a un ahorro positivo y significativo del peso global por unidad de área .

Palabras clave: diafragmas de techo, acero, naves industriales, elemento finito, diseño estructural sismorresistente.

SUMMARY

Various international studies have shown the rigidity and shear capacity that can characterize roof diaphragms.

In Costa Rica the roof diaphragm is not considered in the design and structural calculation of industrial buildings.

Six steel industrial buildings are going to be modeled using the finite element method, of which three include the roof diaphragm in their design, and SAP 2000 structural design software is used for their seismic analysis.

Experiments are carried out in the search to demonstrate the influence of including the roof diaphragms in the structural design, the displacements, the period and the weight of the industrial buildings. For the later comparison of the results of the weight saving per unit area obtained in the present work, with those of the thesis to obtain the degree of Bachelor of Ing. Alonso Aguilar.

It is determined that the roof diaphragms have a rigid diaphragm behavior in front of lateral loads, that the inclusion of this in the structural design increases the oscillation periods of the structures and with this the seismic design forces are reduced.

It is determined that by including the roof diaphragm in the structural design, significant savings are obtained in the structural elements of the industrial building and its overall weight.

The results of the weight saving percentage of the structures obtained with the finite element method are compared with those obtained by means of the truss method and both converge to a positive saving in the global weight per unit area.

Key words: roof diaphragms, steel, industrial buildings, finite element, seismic resistant structural design.

ÍNDICE

RESUMEN	i
SUMMARY	ii
ÍNDICE	iii
Índice de figuras	vi
Índice de tablas	viii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. <i>Antecedentes del problema</i>	1
1.2 <i>Planteamiento del problema</i>	3
1.3 <i>Hipótesis</i>	4
1.4 <i>Objetivo general</i>	4
1.5 <i>Objetivos específicos</i>	5
1.5 <i>Justificación</i>	5
1.6 <i>Alcance y limitaciones</i>	6
1.7 <i>Impacto</i>	7
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	8
2.1 <i>Acero</i>	8
2.1.1 <i>Propiedades químicas</i>	8
2.1.2 <i>Propiedades físicas y mecánicas</i>	11
2.1.3 <i>Tipos de laminado</i>	12
2.1.3.1 <i>Laminado en caliente</i>	13
2.1.3.2 <i>Laminado en frío</i>	14
2.2 <i>Naves industriales</i>	14
2.2.1 <i>Marcos estructurales</i>	16
2.2.1.1 <i>Marcos rígidos internos</i>	17
2.2.1.2 <i>Marcos rígidos laterales o marcos de carga</i>	17
2.3 <i>Diafragma de techo</i>	18

2.3.1 Largueros	19
2.3.2 Lámina de Techo.....	20
2.3.3 Estructuración del diafragma.....	21
2.3.4 Conexiones	22
2.3.5 Rigidez	24
2.3.5.1 Diafragmas rígidos.....	28
2.3.5.2 Diafragma flexible	28
2.3.6 Diafragmas de techo como elemento sismorresistente.....	28
CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO	34
3.1 <i>Paradigma, enfoque metodológico y método de investigación propuestos</i> .	34
3.1.1 Paradigma.....	34
3.1.1.1 Método del Elemento Finito	34
3.1.1.2 Estructuración de los elementos finitos.....	36
3.1.2. Enfoque metodológico.....	40
3.1.3 Método de investigación.....	41
3.2 <i>Categorías de análisis de la investigación (operacionalización de variables)</i>	
.....	43
3.2.1. Variables independientes	44
3.2.2 Variables dependientes.....	49
3.2.2.1. Derivas.....	49
3.2.2.2 Periodos de vibración.....	49
3.2.2.3 Pesos de las naves industriales por metro cuadrado.....	51
3.3 <i>Técnicas e instrumentos para la recolección de datos</i>	51
3.4 <i>Técnicas e instrumentos para el procesamiento y análisis de los datos</i>	59
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	62
4.1 <i>Modelación del diafragma de techo mediante el método del elemento finito</i>	
.....	62
4.2 <i>Derivas y desplazamientos</i>	69
4.3 <i>Periodos</i>	76
4.4 <i>Peso de las naves industriales</i>	80
4.5 <i>Porcentajes de ahorro en el peso de las estructuras por unidad de área</i>	87
5. CONCLUSIONES.....	89
6. RECOMENDACIONES.....	92

BIBLIOGRAFÍA.....	93
ANEXOS.....	93
<i>Anexo A.....</i>	<i>96</i>
<i>Anexo B.....</i>	<i>102</i>

Índice de figuras

Figura 1. Especificaciones de tipos de acero del ASTM.....	10
Figura 2. Diagrama Esfuerzo-Deformación característico de un acero estructural.	12
Figura 3. Tipos de laminado	13
Figura 4. Ejemplo de una Nave industrial	15
Figura 5. Tipos de Marcos de acuerdo al CSCR2010, 2014.....	16
Figura 6. Marco rígido interno.....	17
Figura 7. Marcos rígidos laterales.....	18
Figura 8. Largueros	19
Figura 9. Lámina de techo Rectangular	20
Figura 10. Propiedades de la lámina de techo rectangular	21
Figura 11. Estructuración del diafragma	22
Figura 12. Sistema diafragma atornillado	23
Figura 13. Sistema diafragma standing sean.....	24
Figura 14. Deformación unitaria cortante del diafragma	26
Figura 15. Experimento Rigidez diafragma.....	27
Figura 16. Flexibilidad del diafragma	28
Figura 17. a) Láminas de acero del diafragma de techo. b) Cargas axiales actuando sobre el diafragma. c) Fuerzas transferidas al diafragma en el sentido longitudinal de la nave industrial. d) Vigas de borde actuando como elementos colectores por la trans.....	30
Figura 18. Configuración experimental de diafragma	31
Figura 19. Gráfico Fuerza (P) vs Desplazamiento (Δ)	32
Figura 20. Nodos y elementos de una malla.....	35
Figura 21. Modelación con Elemento Finito.....	36
Figura 22. Refinamiento progresivo de una malla	37
Figura 23. Elemento barra	38
Figura 24. Elemento solido	38
Figura 25. Elemento Área	39
Figura 26. Tipos de elemento Área.....	40
Figura 27. Método de investigación	43
Figura 28. Aceleración pico efectiva de diseño, a_{ef} para un período de retorno de 475 años y para diferentes zonas sísmicas y tipos de sitio.	48
Figura 29. Factor espectral dinámico, FED, para sitios de cimentación tipo S3 en zona sísmica III.....	50
Figura 30. Geometría general de las naves industriales a analizar	52
Figura 31. Dimensiones de las naves industriales a analizar	52
Figura 32. Elementos horizontales de las naves industriales a analizar	53

Figura 33. Modelo general de diseño estructural naves industriales A y D respectivamente.	54
Figura 34. Modelo general de diseño estructural naves industriales B y E respectivamente.	54
Figura 35. Modelo general de diseño estructural naves industriales C y F respectivamente.	55
Figura 36. Límite superior de la razón de deriva inelástica, Δ_i / H_i , según categoría de edificación y sistema estructural.	57
Figura 37. Técnicas e instrumentos para el procesamiento y análisis de los datos	61
Figura 38. Geometría de la corrugación de una lámina rectangular	63
Figura 39. Lamina Rectangular modelada con el método del Elemento Finito	63
Figura 40. Diafragma de techo aislado	64
Figura 41. Experimento diafragma aislado	65
Figura 42. Comportamiento lineal P vs Delta.....	67
Figura 43. Nave industrial con diafragma de techo modelado con el método del elemento finito.	68
Figura 44. Diafragma sometido a cargas laterales	69
Figura 45. Desplazamiento Marco OMF debido a las Fuerzas Sísmicas en el Eje (x)	70
Figura 46. Desplazamientos de estudio.....	71
Figura 47. Relación de flexibilidad eje (Y).....	75
Figura 48. Relación de flexibilidad Eje (X)	76
Figura 49. Periodos Eje (X).....	78
Figura 50. Periodos Eje (Y).....	79
Figura 51. Peso de las Naves Industriales.....	83
Figura 52. MU Naves Industriales A y D respectivamente.....	84
Figura 53. MU Naves Industriales B y E respectivamente.....	85
Figura 54. MU Naves Industriales C y F respetivamente.....	85
Figura 55. MU Naves Industriales.....	86

Índice de tablas

Tabla 1. Fuerzas y Desplazamientos diafragma aislado	66
Tabla 2. Desplazamientos y derivas finales en el eje (X).....	70
Tabla 3. Desplazamientos y derivas finales en el eje (Y).....	70
Tabla 4. Desplazamientos Nave Industrial A	72
Tabla 5. Desplazamientos Nave Industrial B	72
Tabla 6. Desplazamientos Nave Industrial C	73
Tabla 7. Desplazamientos Nave Industrial D	73
Tabla 8. Desplazamientos Nave Industrial E	73
Tabla 9. Desplazamientos Nave Industrial F	74
Tabla 10. Periodos de oscilación	77
Tabla 11. Peso Nave Industrial A	80
Tabla 12. Peso Nave Industrial D	81
Tabla 13. Peso Nave Industrial B	81
Tabla 14. Peso Nave Industrial E	82
Tabla 15. Peso Nave Industrial C	82
Tabla 16. Peso Nave Industrial F.....	83
Tabla 17. Momentos Últimos de Diseño	86
Tabla 18. Peso por metro cuadrado de las naves industriales	87
Tabla 19. Comparación de los porcentajes de ahorro en (Kgf/m ²)	88

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes del problema

En la actualidad, la optimización de la materia prima en procesos de diseño y construcción es de suma importancia, razón que ha dado paso a una serie de investigaciones nacidas con la finalidad de optimizar costos.

La competencia por un posicionamiento en el mercado del diseño y la construcción resulta cada vez más ardua, esto debido a la continua investigación y estudio de los procesos de producción, fijados en la búsqueda de ofrecer a sus clientes y usuarios mejores proyectos a un menor precio.

En el ámbito de la Ingeniería Civil, impulsado en gran manera por el aporte que nos brinda la tecnología con sus diversos *softwares*, se manifiesta el fenómeno de un constante afinamiento de los cálculos estructurales y de una búsqueda permanente de ecuaciones con un menor rango de incertidumbre mediante la investigación de nuevos métodos de diseño.

Las estructuras de acero de tipo nave industrial, también han sido objeto de diversas investigaciones tanto en el ámbito nacional como internacional, las cuales ha tenido como objetivo determinar el comportamiento sismo resistente de estas.

En Costa Rica se han realizado distintos trabajos finales de graduación en los últimos años, entre los que cabe mencionar cuatro.

El primero fue llevado a cabo por el Ing. David Ugalde Bedoya, graduado de la Universidad de Costa Rica en el año 2008, en el cual se estudió la variación en el peso de una nave industrial de acero con respecto a varias estructuraciones de largueros y marcos arriostrados con marcos no arriostrados.

El segundo proyecto fue realizado por el Ing. Diego Alonso Carrillo Baltodano, graduado de la Universidad de Costa Rica, quien en el año 2010 se encargó de darle continuidad a la investigación realizada por el Ing. David Ugalde Bedoya, estudiando la variación en la implementación de arriostres en los marcos. La principal diferencia entre los dos proyectos fue que el Ing. Carrillo definió una configuración estructural basada en marcos compuestos por vigas de alma abierta.

El tercer proyecto fue realizado por el Ing. Alonso Aguilar Salas, graduado de la Universidad Latina de Costa Rica en el año 2015 quien diseño tres naves industriales sin la consideración del diafragma de techo, y los pesos por metro cuadrado generados por estas estructuras, se compararon con los que generaron tres naves industriales configuradas con las mismas tres luces, pero que sí consideran el diafragma de techo en el diseño estructural, utilizando el método de la cercha para el diseño del diafragma de techo.

El cuarto proyecto fue realizado por el Ing. Lincoln Sánchez, graduado de la Universidad Latina de Costa Rica en el año 2016, el cual estudió si la metodología del Doc. Hong para determinar la sobrerresistencia real de las naves industriales y obtener una optimización del diseño es aplicable al Código Sísmico costarricense.

Internacionalmente se ha estudiado y tabulado el aporte de los diafragmas flexibles a estructuras de acero tipo nave industrial, para utilizar estos datos en su diseño estructural.

Temblay & Stiemer (1994) evaluaron la respuesta de distintos edificios rectangulares de un nivel que poseían diafragmas flexibles de techo ubicados en distintas ciudades de Canadá. Se realizaron los análisis estructurales por computador y se concluyó que los periodos calculados diferían de los periodos de diseño, siendo 1,5 veces mayores en la dirección corta y de 2 a 3 veces mayores en la dirección larga.

Medhekar (1999) evaluó el desempeño sísmico de un edificio de un nivel con diafragmas flexibles y marcos arriostrados concéntricamente. Se encontró que el periodo fundamental de vibración calculado analíticamente era mucho mayor que el periodo estimado. Además de observar que había diafragmas de techo que entraban en fluencia en zonas de mediana y alta sismicidad.

En el 2004 Rogers y Tremblay publican su investigación sobre el diafragma flexible como elemento sismo resistente, en el que realizan distintas combinaciones a escala de diafragmas flexibles y encuentran su capacidad a cortante de una manera experimental.

En el 2007 en la UC San Diego, el Doctor Hong, publica su investigación donde hace un análisis del replanteo de la sobrerresistencia de los materiales para el diseño de naves industriales en acero.

En el 2010 la Universidad de California publica su investigación Earthquake Testing Metal Buildings. Donde genera diversas simulaciones del sismo de King's Valley en 3 naves industriales de 20 pies de altura, por 20 pies de profundidad y una luz de 60 pies. Tenía una magnitud de 6.5 en la escala de Richter y un período de retorno de aproximadamente 475 años. No obstante, ninguna de las naves alcanzó el estado de fluencia (Smith, 2013).

En el 2012 Bakhti, Rogers y Tremblay revisan el método del *Steel Deck Institute* para el cálculo de la flexibilidad a cortante de un diafragma flexible utilizando un análisis no lineal mediante el método del elemento finito.

1.2 Planteamiento del problema

Los diafragmas de techo son elementos que le otorgan rigidez y un aporte sismorresistente a las estructuras de acero, sin embargo, este aporte no se toma en cuenta, lo cual podría incurrir en un sobre diseño de las estructuras.

¿Por qué en Costa Rica el diseño de las estructuras de acero tipo Nave Industrial se realiza sólo considerando el aporte del esqueleto estructural?

¿Cuál es la rigidez que puede aportar un diafragma de techo de láminas estructurales y largueros conectados adecuadamente?

¿Cómo se pueden modelar las propiedades reales de un diafragma de techo mediante el método del elemento finito?

El acero, resulta un material que puede aportar una gran resistencia utilizando elementos menos pesados y menos masivos que el concreto armado, sin embargo, en Costa Rica el mercado de acero depende de la importación de este al país, y la disminución de peso de estructura de acero en su diseño, resulta en un importante ahorro económico.

¿Se podría optimizar el peso de las estructuras de acero tipo “nave industrial” al tomar en cuenta el aporte de los diafragmas de techo?

¿Cuál es la influencia estructural generada de los diafragmas de techo en el periodo y derivas de estructuras de acero tipo nave industrial?

1.3 Hipótesis

Los análisis estructurales brindarán la conclusión de que los diafragmas de techo son influyentes en el diseño de estructuras de acero de tipo nave industrial, ya que estos son elementos capaces de tomar cargas axiales y proporcionar rigidez a la estructura.

1.4 Objetivo general

Evaluar la influencia de diafragmas de techo, modelados como elementos finitos en el diseño estructural sismo resistente de estructuras de acero tipo “Nave Industrial”.

1.5 Objetivos específicos

Diseñar los diafragmas de techo como elementos finitos.

Describir el aporte estructural de los diafragmas de techo, reflejado en el cálculo de las derivas y periodos de estructuras de acero tipo nave industrial.

Analizar la variación en el peso por metro cuadrado de estructuras tipo nave Industrial, al considerar los diafragmas de techo en el diseño estructural.

Comparar el aporte de los diafragmas de techo modelados como elementos finitos con los resultados de la tesis de grado del Ing. Alonso Aguilar Salas.

1.5 Justificación

El acero como material de construcción tiene muchas ventajas, este es un material dúctil, de alta resistencia, bajo peso, homogéneo y sus características están muy bien definidas. Su empleo en la construcción permite realizar estructuras altamente resistentes sin la necesidad de que estas sean masivas. Sin embargo, en Costa Rica, el acero depende en gran medida del mercado internacional, y requiere la búsqueda de soluciones orientadas a la optimización económica del diseño de estructuras tipo nave industrial.

La versatilidad en el diseño de estructuras de este material da paso a la investigación para la optimización del peso de las estructuras, lo cual se ve proporcionalmente relacionado con el costo económico del proyecto, favoreciendo tanto al cliente como a las firmas estructurales y empresas constructoras.

De aquí la importancia de determinar todos los factores involucrados en nuestras estructuras, para disminuir el margen de incertidumbre en el diseño y evitar la sobre dimensión de los elementos estructurales. Los diafragmas de techo son uno de los

elementos en estructuras de acero menos estudiados, respecto al aporte estructural que estos puedan brindar.

Dubina, Ungureanu & Landolfo (2011) señalan: “La acción del diafragma de la cubierta de techo y sus miembros de soporte puede utilizarse para remplazar las riostras en el plano del techo dando como resultado un ahorro en material y una simplificación en el detallado” (p.604).

Por lo que lograr estimar la inferencia de estos elementos en las estructuras de acero, acerca a un mayor conocimiento de la capacidad efectiva de cada uno de ellos, permite optimizar el diseño, y obtener un análisis más certero del comportamiento que presentará las estructuras de acero de tipo nave industrial.

1.6 Alcance y limitaciones

En este trabajo se va a determinar el aporte sismorresistente de un diafragma de techo compuesto de láminas estructurales y largueros mediante el método del elemento finito.

Se utilizará el software SAP 2000 para el estudio y análisis de 3 naves industriales que incluyan los diafragmas flexibles en su diseño estructural y 3 naves industriales que no lo hagan, determinando las diferencias en las derivas y periodos en reacción a las cargas gravitacionales y sísmicas aplicadas.

Los diseños de las naves industriales estarán basados en el Código Sísmico Costarricense 2010 y en los modelos propuestos por el Ing. Alonso Aguilar en su tesis para optar por el grado de licenciatura.

Se utilizarán hojas de cálculo de Microsoft Excel para la tabulación, procesamiento y análisis de cálculos estructurales.

El análisis sísmico se llevará a cabo mediante el método estático, se define una zona sísmica III y un suelo S3 para el cálculo del coeficiente sísmico, debido a que

esta es la zona de mayor incidencia en el país, y el tipo de suelo es el predilecto para cuando no se tiene mucha información de medio soportante.

El software SAP 2000 es un programa diseñado para realizar análisis lineales de las estructuras en sus cálculos estructurales, por lo que los análisis estructurales no lineales no están dentro de los alcances de investigación de este trabajo.

La influencia de las cimentaciones y cargas de viento sobre la estructura no serán tomadas en cuenta en el análisis.

Además, no se calculará la capacidad del tipo de conexión entre las láminas de techo y los largueros.

Por último, no se realizarán pruebas físicas para determinar la rigidez o resistencia de los diafragmas metálicos, sino que se utilizará una metodología analítica que ya ha sido aprobada por medio de este tipo de pruebas.

1.7 Impacto

Los cálculos necesarios para modelar los diafragmas flexibles como elementos finitos actualmente son muy largos y complejos para realizarlos como un cálculo regular de diseño en naves industriales.

Sin embargo, la investigación del aporte estructural de este tipo de elemento puede evidenciar las ventajas de incluirlo en el diseño, y mediante la generación de tabulaciones que permitan realizar fórmulas de aproximación, se pueden llegar a normalizar e incluirlas en los códigos de construcción y sísmicos vigentes en el país.

De esta manera, le brindará al diseñador más recursos para obtener la capacidad y comportamiento de su estructura más certeramente, dando como resultado un diseño optimizado que se verá directamente reflejado en las dimensiones de los elementos y el costo de la obra.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Acero

El acero es un material versátil, el cual cuenta con una amplia aplicación estructural. Debido a su gran capacidad de resistencia y elementos estructurales de poco peso resulta bastante conveniente de emplear como material de construcción en diversos tipos de estructuras.

Dependiendo de los porcentajes de los elementos que compongan su aleación, este puede adquirir distintas resistencias, elasticidad y dureza, lo cual puede ser aprovechado por el diseñador para elegir el tipo de acero que más le convenga según el tipo de estructura, sus características y las condiciones para las que se modele la estructura.

El acero es un material muy homogéneo, dúctil, elástico, durable, y sus propiedades no cambian apreciablemente con el tiempo, por lo tanto, se pueden realizar cálculos muy precisos respecto a sus propiedades químicas, físicas y mecánicas.

Además de poseer las ventajas de poder prefabricar miembros, facilidad para unir distintos elementos con diversas conexiones simples, y la posibilidad de hacer ampliaciones a estructuras existentes de una manera eficiente.

2.1.1 Propiedades químicas

El acero se define como una combinación de hierro (Fe) y pequeñas cantidades de Carbono y algunos otros elementos como el níquel, manganeso, cromo, cobalto, silicio, cobre, titanio, plomo, selenio, aluminio, boro, entre otros, los cuales generalmente están debajo del 1%.

En el mercado se puede encontrar la estandarización de los distintos tipos de acero, entre los que encontramos como los más conocidos los Aceros al Carbono y los Aceros de alta resistencia, los cuales alcanzan una mayor resistencia con la adición

de otros elementos químicos y tratamientos, pero generalmente tienen un costo más elevado.

Zapata (1991) explica: “Los Aceros al Carbono se dividen en cuatro categorías de acuerdo con la cantidad de carbono: bajo carbono (menos de 0.15%); moderado carbono (0.15-0.29%); medio carbono (0.30-0.59%); y alto carbono (0.6-1.7%)” (p.28). Los Aceros Estructurales están en la categoría de moderado carbono para asegurar que sean soldables.

El contenido de carbono causará que la resistencia de fluencia del acero se eleve, sin embargo, una mayor cantidad de carbono hará que el acero sea más frágil y afectará adversamente su soldabilidad.

Por su parte, Sriramulu (2006) menciona: “Los aceros de alta resistencia son desarrollados mediante aleaciones controladas que busquen las características convenientes de resistencia, mecánicas, de mejora a la fabricación y corrosión” (p.32).

Applicable ASTM Specifications for Various Structural Shapes

Steel Type	ASTM Designation	F _y Min. Yield Stress (ksi)	F _u Tensile Stress ^a (ksi)	Applicable Shape Series													
				W	M	S	HP	C	MC	L	HSS		Pipe				
											Rect.	Round					
Carbon	A36	36	58-80 ^b														
	A53 Gr. B	35	60														
	A500	Gr. B	42	58													
			46	58													
		Gr. C	46	62													
			50	62													
	A501	Gr. A	36	58													
		Gr. B	50	70													
	A529 ^c	Gr. 50	50	65-100													
		Gr. 55	55	70-100													
High-Strength Low-Alloy	A572	Gr. 42	42	60													
		Gr. 50	50	65 ^d													
		Gr. 55	55	70													
		Gr. 60 ^e	60	75													
		Gr. 65 ^e	65	80													
	A618 ^f	Gr. I & II	50 ^g	70 ^g													
		Gr. III	50	65													
	A913	50	50 ^h	60 ^h													
		60	60	75													
		65	65	80													
		70	70	90													
	A992	50	65 ⁱ														
	Corrosion Resistant High-Strength Low-Alloy	A242	42 ^j	63 ^j													
46 ^k			67 ^k														
50 ^l			70 ^l														
A588		50	70														
A847	50	70															

= Preferred material specification
 = Other applicable material specification, the availability of which should be confirmed prior to specification
 = Material specification does not apply

^a Minimum unless a range is shown.
^b For shapes over 426 lb/ft, only the minimum of 58 ksi applies.
^c For shapes with a flange thickness less than or equal to 1 1/2 in. only. To improve weldability, a maximum carbon equivalent can be specified (per ASTM Supplementary Requirement S78). If desired, maximum tensile stress of 90 ksi can be specified (per ASTM Supplementary Requirement S79).
^d If desired, maximum tensile stress of 70 ksi can be specified (per ASTM Supplementary Requirement S81).
^e For shapes with a flange thickness less than or equal to 2 in. only.
^f ASTM A618 can also be specified as corrosion-resistant; see ASTM A618.
^g Minimum applies for walls nominally 3/4-in. thick and under. For wall thicknesses over 3/4 in., F_y = 46 ksi and F_u = 67 ksi.
^h If desired, maximum yield strength of 65 ksi and maximum yield-to-tensile strength ratio of 0.85 can be specified (per ASTM Supplementary Requirement S75).
ⁱ A maximum yield-to-tensile strength ratio of 0.85 and carbon equivalent formula are included as mandatory in ASTM A992.
^j For shapes with a flange thickness greater than 2 in. only.
^k For shapes with a flange thickness greater than 1 1/2 in. and less than or equal to 2 in. only.
^l For shapes with a flange thickness less than or equal to 1 1/2 in. only.

Figura 1. Especificaciones de tipos de acero del ASTM

Fuente: Manual de la AISC, 2011, p.2-48

2.1.2 Propiedades físicas y mecánicas

Los diagramas de esfuerzo deformación que presenta el acero nos brindan información muy valiosa de cómo se va a comportar el material cuando se le apliquen diversas cargas.

La relación de Poisson (μ), se denomina a la relación entre la deformación transversal y la longitudinal para un determinado rango de esfuerzos, y para el acero esta relación corresponde al valor de $\mu = 0.3$.

El módulo de elasticidad (E), es la relación entre el esfuerzo y la deformación en el rango elástico, y en el acero este valor corresponde a $E = 29,500 \text{ ksi}$ (2100000 kg/cm^2), cualquiera sea su Grado o aleación, por lo que se considera que es la característica que los agrupa y los diferencia apropiadamente.

Mientras el material se mantenga en el rango elástico las deformaciones que este experimente pueden recuperarse una vez que las cargas hayan sido retiradas, los aceros estructurales mantienen un rango definido de esfuerzo constante contra deformación en este nivel de esfuerzo unitario.

A diferencia del rango elástico en el que las deformaciones sufridas por el elemento permanecen.

Cuando se grafica el comportamiento del material en un gráfico de deformación contra esfuerzo, podemos observar el punto del esfuerzo de fluencia (F_y), el cual divide el rango elástico del material del rango plástico del material (figura 2).

McCormac (2018) menciona: “El esfuerzo de fluencia es para el proyectista la propiedad más importante del acero, ya que muchos procedimientos de diseño se basan en este. Si el esfuerzo en un punto de una estructura de acero dúctil alcanza el punto de fluencia, esa parte de la estructura cederá localmente sin incremento en el esfuerzo, impidiendo así una falla prematura. Esta ductilidad permite que se redistribuyan los esfuerzos en una estructura de acero” (p.14). Lo cual le da al

material una respuesta a resistir sobrecargas, evitando que se dé una fractura repentina.

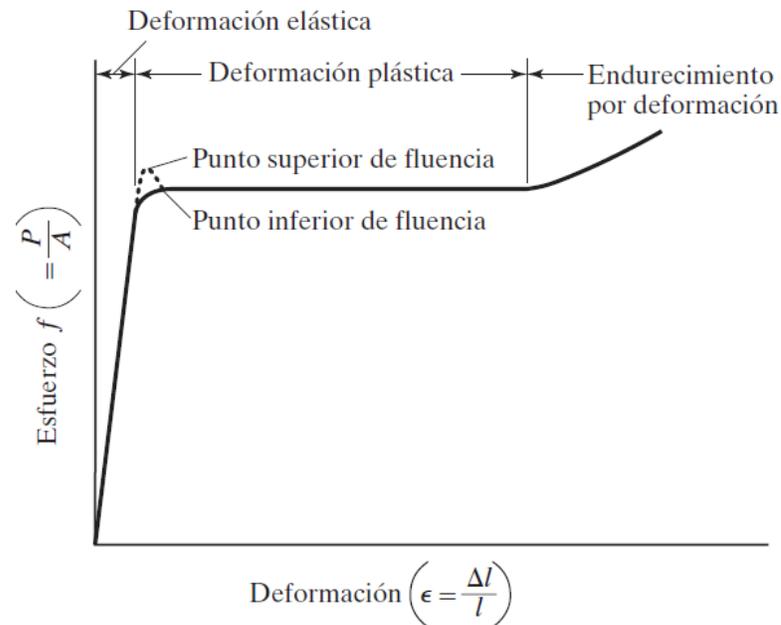


Figura 2. Diagrama Esfuerzo-Deformación característico de un acero estructural

Fuente: McCormac, 2013, p.15

2.1.3 Tipos de laminado

Hay varios tipos de elementos de acero que se emplean en las construcciones, los cuales usualmente se dividen por su tipo de fabricación, el cual determina sus características mecánicas y geométricas.

Los tipos de laminado se pueden dividir en laminados en caliente y laminado en frío o plegados (figura 3).

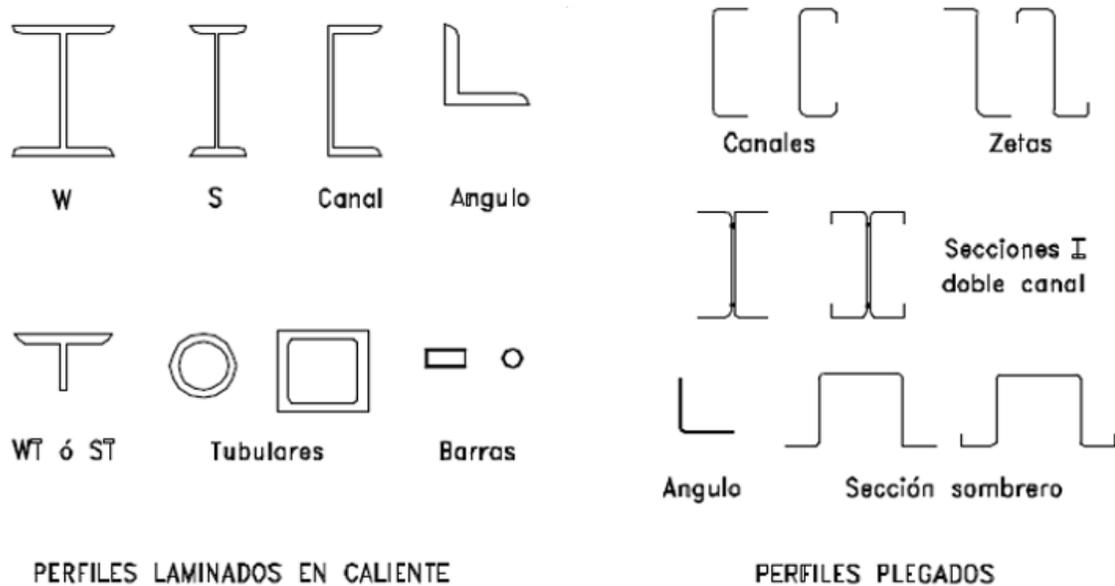


Figura 3. Tipos de laminado

Fuente: Zapata, 1991, p.17

2.1.3.1 Laminado en caliente

El laminado en caliente se constituye mediante un acero que ha pasado por un proceso de conformación a temperaturas superiores a los 926 grados Celsius, permitiendo una gran variedad de formas y de tener la ventaja de poder fabricar piezas grandes. Estos perfiles que pueden ser productos no planos (perfiles ángulos, canales, perfiles alas anchas, tubos, varillas lisas, entre otros) y los productos planos, que son las planchas.

El proceso de laminado en caliente se puede realizar de dos maneras, mediante molinos de laminado o mediante vaciado continuo.

En el proceso con molinos de laminado se introduce el acero entre rodillos que lo comprimen y moldean hasta obtener la geometría característica del perfil, una vez

que se tienen los productos semiterminados estos son recalentados para darles el acabado mediante un segundo proceso de molinos o rodillos.

El proceso de vaciado continuo es más eficiente pues en él, el acero es vertido a altas temperaturas sobre los moldes previamente determinados en donde es enfriado con agua, una vez que este se ha solidificado lo suficiente se retira el molde y el acero aún caliente empieza a laminarse con rodillos directamente hasta obtener el perfil deseado.

Los perfiles laminados en caliente tienen una designación para su apropiada descripción, así un perfil W18x40 que es un perfil alas anchas de 18" de peralte y de 40 lb/pie, entre otras. Esta nomenclatura corresponde a la designación de perfiles recomendada por el AISC.

2.1.3.2 Laminado en frío

El acero laminado en frío se fabrica a partir de planchas o láminas anteriormente laminadas en caliente, sometiéndolas a un proceso de deformación mecánica a temperatura ambiente, por lo que presenta una menor ductilidad a la hora de su fabricación.

Los perfiles laminados en frío pueden formar tanto elementos estructurales como canales y zetas que pueden ser empleados como viguetas o largueros, como de superficie, los cuales también tienen un papel estructural como elemento de área como entre pisos, láminas estructurales, entre otras.

2.2 Naves industriales

Una nave industrial es una estructura diseñada para el sector industrial, en la que se busca una estructuración con luces amplias creando un cerramiento de la mayor área posible. En estas se busca aprovechar al máximo su espacio interior, utilizando techos altos y la ausencia de columnas internas.

Este tipo de estructuras surge durante la revolución industrial, las cuales llegan a ser soluciones para albergar fábricas, bodegas, supermercados, iglesias, entre otros.

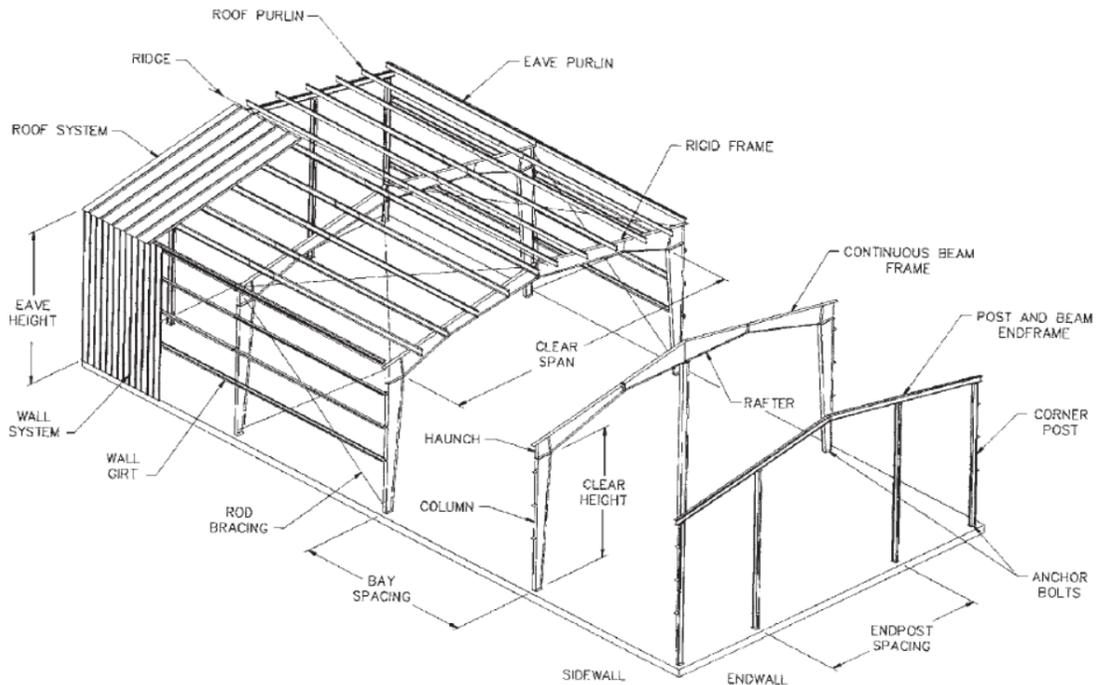


Figura 4. Ejemplo de una nave industrial

Fuente: Newman, 2003, p. 5

Aunque existen naves industriales con secciones en concreto, la gran mayoría son construidas con marcos de acero y estas son en las que nos enfocaremos en el presente trabajo, las cuales tienen como elemento estructural principal los marcos estructurales y como elemento secundario los diafragmas flexibles, compuestos por los largueros y las láminas estructurales, los cuales son los elementos de interés de este trabajo y en los que se ahondará.

2.2.1 Marcos estructurales

Los marcos estructurales son un sistema sismorresistente compuesto por vigas y columnas unidas por conexiones rígidas o articuladas. Como toda estructura el marco estructural debe de tener la capacidad de resistir cargas gravitacionales como laterales. La mayoría de ellos van a estar compuestos por perfiles I en sus columnas y vigas, aunque estas últimas también suelen ser remplazadas por cerchas o vigas de tipo *joist*. Algunos marcos van a poseer elementos diagonales llamados arriostras que le proporcionan capacidad de soporte respecto a cargas laterales.

Dichas estructuras se clasifican según las deformaciones sísmicas que se les va a permitir, en Costa Rica el Código Sísmico de Costa Rica 2010 (CSCR-10) por sus siglas establece la siguiente clasificación que se presenta en la figura (5):

Tipo de Marco	Deformaciones Inelásticos	Capacidad de rotación mínima en conexiones	Conexiones y detallado
OMF	Mínimas	n/a	Vigas pueden ser armaduras; conexiones rígidas o semi-rígidas
IMF	Limitadas	0,02 rad	Conexiones precalificadas y detallado especial
SMF	Importantes	0,04 rad	Conexiones precalificadas y detallado especial
STMF	Importantes en segmento especial	n/a	

Figura 5. Tipos de marcos de acuerdo con el CSCR2010, 2014

Fuente: ACIES, 2016, Cap. 3, p.37

Dentro de la estructura de una nave industrial vamos a tener dos tipos de marcos estructurales, los marcos rígidos internos y marcos rígidos laterales o marcos de carga, los cuales son diferenciados por la función que cumplen dentro del sistema, y unidos conforman el sistema estructural principal de las naves industriales en acero.

2.2.1.1 Marcos rígidos internos

Estos marcos tienen la función de tomar cargas gravitacionales y laterales en el sentido transversal, son marcos que cubren grandes luces y suelen tener un alma variable que les permita tener una capacidad mayor a las fuerzas a las que son sometidos.



Figura 6. Marco rígido interno

Fuente: ACIES, 2016, Cap. 1 p. 11

2.2.1.2 Marcos rígidos laterales o marcos de carga

Estos marcos están encargados de tomar cargas laterales en el sentido longitudinal, estos están apoyados a su vez en las columnas laterales, usualmente

cuentan con un sistema de cerramiento para la estructura, están constituidos por apoyos simples y están arriostrados.

Las riostras toman el papel de brindarles estabilidad lateral, y estos sistemas pueden funcionar a compresión: utilizando tubos, angulares doble, entre otros perfiles, o solamente a tensión utilizando cables, angulares o placas.



Figura 7. Marcos rígidos laterales

Fuente: ACIES, 2016, Cap. 1, p. 14

2.3 Diafragma de techo

Los diafragmas son sistemas de cerramiento constituidos por un conjunto de elementos estructurales de tipo área entrelazados sobre elementos lineales. Estos sistemas tienen la capacidad de trabajar bajo fuerzas dentro de su propio plano, y transmitir las mismas al resto de los elementos verticales.

Según CFIA (2011): “Los aportes que brinda este tipo de sistema son el de transmitir cargas gravitacionales al resto de los miembros estructurales como columnas, vigas

y paredes, y transmitir como disipar fuerzas horizontales de sismo o viento” (p. C/4). Además, le proporciona un cerramiento necesario a la estructura.

2.3.1 Largueros

Los largueros son elementos estructurales que trabajan a flexión, los cuales se apoyan sobre las vigas o armaduras de techo y son utilizados para proveer un apoyo a la cubierta de techo.

Usualmente las cargas gravitacionales y de viento rigen el diseño de este tipo de elementos, las cuales en conjunto con las características del perfil empleado son las que van a determinar el espaciamiento máximo.

Existen distintos perfiles que se pueden utilizar como largueros, entre los que se pueden encontrar perfiles laminados en frío como canales C y perfiles en Z.

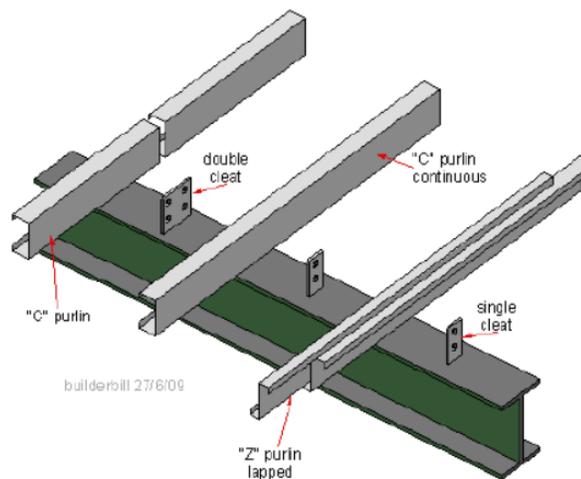


Figura 8. Largueros

Fuente: ACIES, 2016, Cap.1, p.37

2.3.2 Lámina de Techo

En países como Estado Unidos de América y Canadá las dimensiones de las secciones transversales de las láminas de techo, su resistencia a la fluencia, la resistencia última a la tensión, los momentos de inercia de la sección gruesa y efectivos son datos que se pueden obtener con facilidad al estar estos brindados por los catálogos de las empresas fabricantes de láminas de techo. Asimismo, permiten escoger la lámina a utilizar debido a las reacciones, longitud de apoyo, distancia requerida entre soportes, entre otros.

En la actualidad de Costa Rica, “la única lamina de techo que cumple con la resistencia y rigidez establecidas por la metodología del AISI S310-13 es la lámina de techo rectangular calibre 26 de la empresa Metalco” (Aguilar, 2015, p. 90). Por esta razón se empleará la misma durante los distintos estudios del diafragma que se realizarán en este trabajo.



Figura 9. Lámina de techo Rectangular

Fuente: <http://www.metalco.net/productos/lamina-rectangular/>

LÁMINA RECTANGULAR GALVANIZADA Y ESMALTADA												
Espesor (mm)	Calibre	Ancho Total (m)	Largo (m)	Ancho útil (m)	Cubrimiento efectivo (m ²)	Distancia de clavadores	Peso (kg/unidad)	Acabado				
0.44	26	1.07	1.83	1.01	1.70	0.84	8.16	•	•	•	•	
			2.44		2.31	1.14	10.88	•	•	•	•	
			3.05		2.93	0.96	13.60	•	•	•	•	
			3.66		3.55	1.17	16.32	•	•	•	•	
0.32	28		3.66		3.55	1.17	11.84	•				

Figura 10. Propiedades de la lámina de techo rectangular

Fuente: <http://www.metalco.net/productos/lamina-rectangular/>

Lámina rectangular que permite 90 kg/m² de carga, que utiliza como norma para su acero base la norma ASTM A 568-M (JIS G-3141 SPCC). (Metalco, 2019).

Posee unas dimensiones de 1,07 m de ancho por 3,36 m de largo, la cual se debe de utilizar con traslapes entre lámina y lámina de 15cm y una separación de largueros de 1,17m (Metalco, 2019).

2.3.3 Estructuración del diafragma

En edificios industriales de un solo nivel es común la utilización de un diafragma de techo (como el mostrado en la figura 11), compuesto por láminas metálicas con sección transversal trapezoidal, que se unen entre sí por medio de conectores de traslape lateral, y por medio de conectores de soporte a los miembros secundarios. En Costa Rica los miembros secundarios pueden ser canales, tubos o perfiles en zeta, mientras que, en otros países, como Estados Unidos de América y Canadá, es común la utilización de vigas de alma abierta.

Si la resistencia del diafragma lo requiere, deben utilizarse conectores de cortante para unir directamente la lámina a las vigas principales. Esta configuración trabaja en forma conjunta para resistir y distribuir las fuerzas cortantes producto de cargas laterales o verticales, o ambas (en el caso de que el techo presente una inclinación).

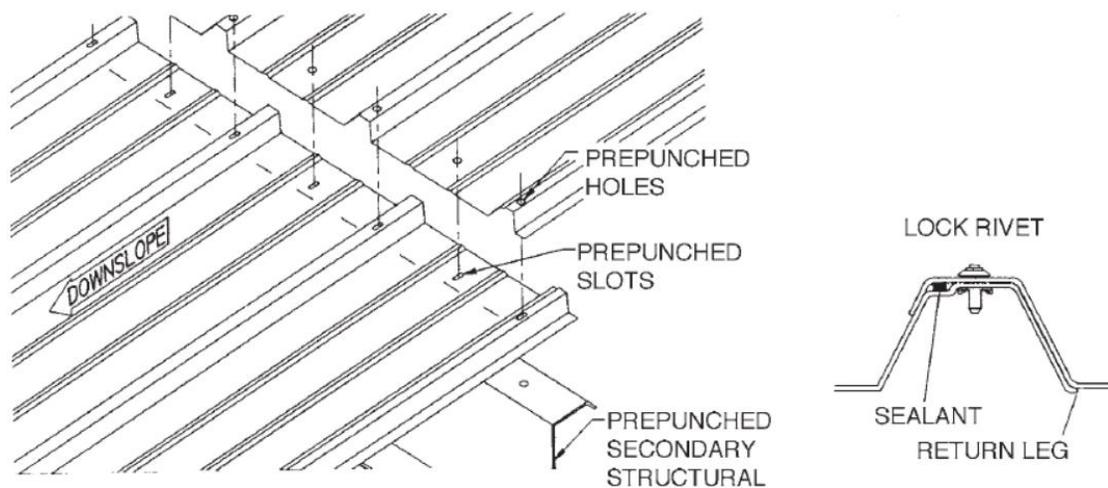


Figura 12. Sistema diafragma atornillado

Fuente: Newman, 2003, p.156

Los sistemas *standing sean* utilizan accesorios que permiten acoplar y ensamblar las láminas con su misma geometría, estos son sistemas que restringen el desplazamiento de las láminas mediante sistemas de acople entre las láminas y usualmente son menos propensos a filtraciones.

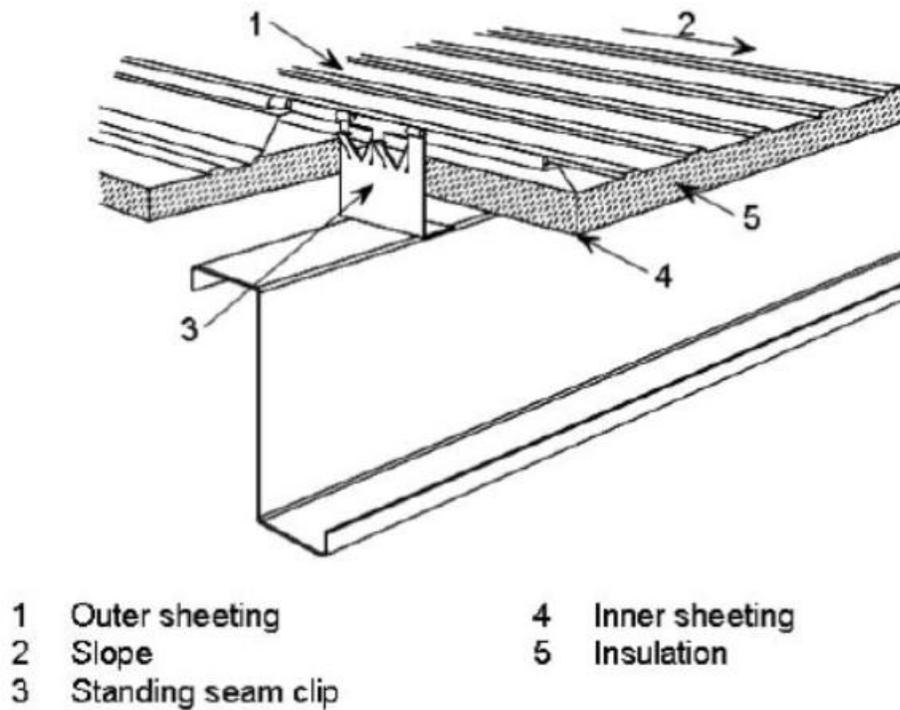


Figura 13. Sistema diafragma standing seam

Fuente: ACIES, 2016, Cap. 1, p. 27

2.3.5 Rigidez

La rigidez de un diafragma establecerá las deflexiones o desplazamientos que este tenga respecto a la aplicación de una fuerza específica. Esta rigidez va a depender directamente de la configuración de cada diafragma, su geometría y material de composición.

La ley de Hooke, formulada por Robert Hooke en 1676 establece una relación lineal ente el esfuerzo y la deformación unitaria dentro de su región elástica.

Los diafragmas no son la excepción, y cuando estos son sometidos a esfuerzos cortantes se deforman estableciendo la relación descrita por las siguientes ecuaciones teóricas:

$$\tau = G \gamma \quad (1)$$

En donde;

τ = esfuerzo cortante

G = módulo de rigidez

γ = deformación unitaria a cortante

Si nos remontamos a la definición de esfuerzo, apela a que este es una fuerza aplicada a un área específica, por lo que el esfuerzo cortante puede ser expresado en los siguientes términos.

$$\tau = \frac{P}{A} = \frac{P}{Lt} \quad (2)$$

En donde;

P = Fuerza lateral aplicada al diafragma

A = área transversal del diafragma

L = ancho del diafragma

t = espesor del diafragma

Debido a que la deformación unitaria cortante (ilustrada en la figura 14) se supone pequeña su valor se puede aproximar con la tangente de esta:

$$\gamma = \tan \gamma = \frac{\Delta}{A}$$

En donde;

Δ = deformación

(3)

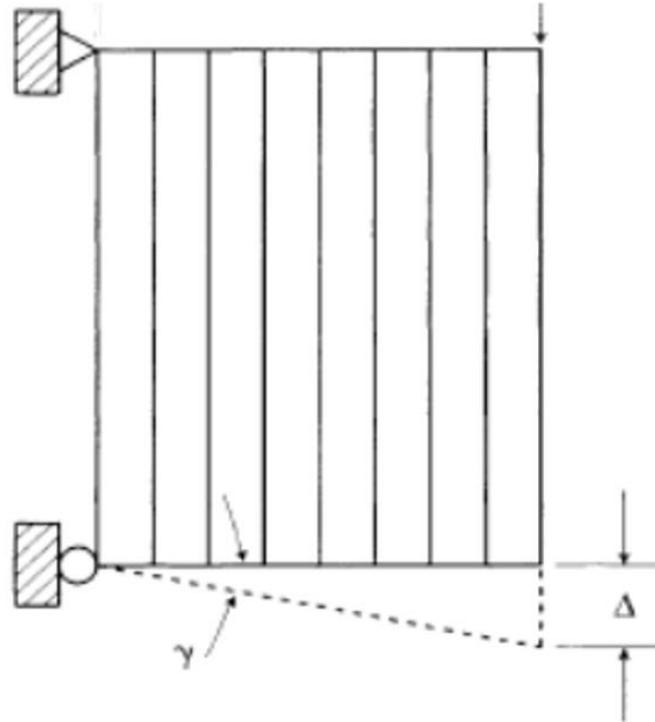


Figura 14. Deformación unitaria cortante del diafragma

Fuente: Rogers, 2004, p.AIII-6

Al igualar las ecuaciones (1) y (2) se determina:

$$G = \frac{P}{\gamma L t} \quad (4)$$

Y al sustituir la ecuación la ecuación (3) en la (4) obtenemos:

$$G = \frac{P A}{L t \Delta} \quad (5)$$

Con lo que podemos obtener la rigidez (G') del diafragma al multiplicar el módulo de cortante por el espesor del diafragma:

$$G' = G t = \frac{P A}{L \Delta} \quad (6)$$

En la (figura 15) se ilustra como un diafragma de largo (b) y ancho (a) que experimenta un desplazamiento (Δ) debido a una fuerza (P).

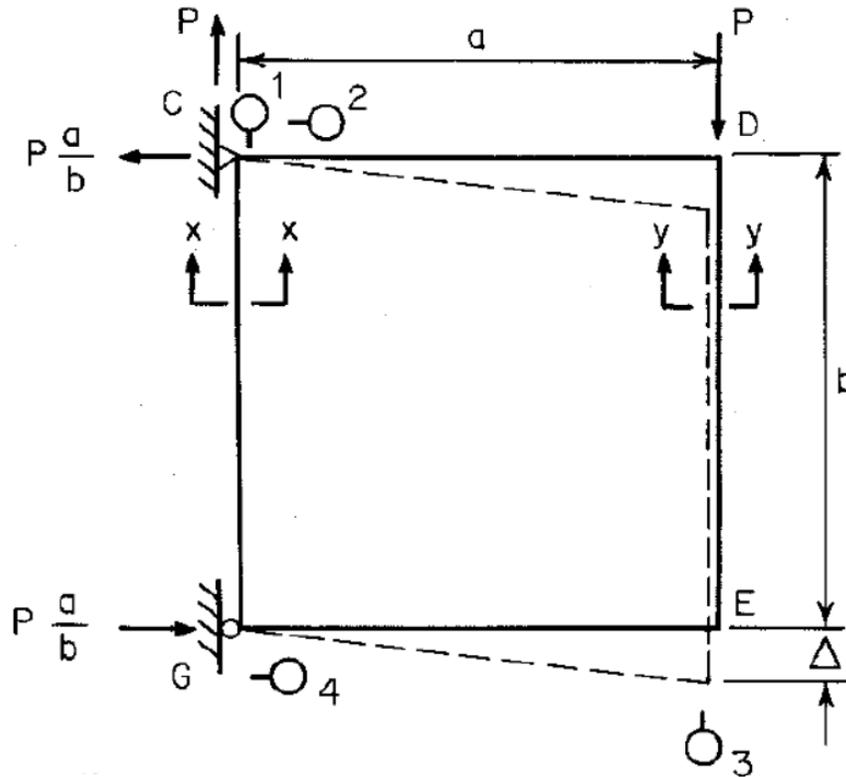


Figura 15. Experimento Rigidez diafragma

Fuente: Wei-Wen Yu, 2000, p.606

Esta rigidez también puede ser encontrada mediante los métodos experimentales físicos, y la importancia de esta característica yace en que la rigidez de un diafragma es una indicación directa de cómo se distorsiona en su propio plano bajo la influencia de fuerzas cortantes (Luttrell, 2004).

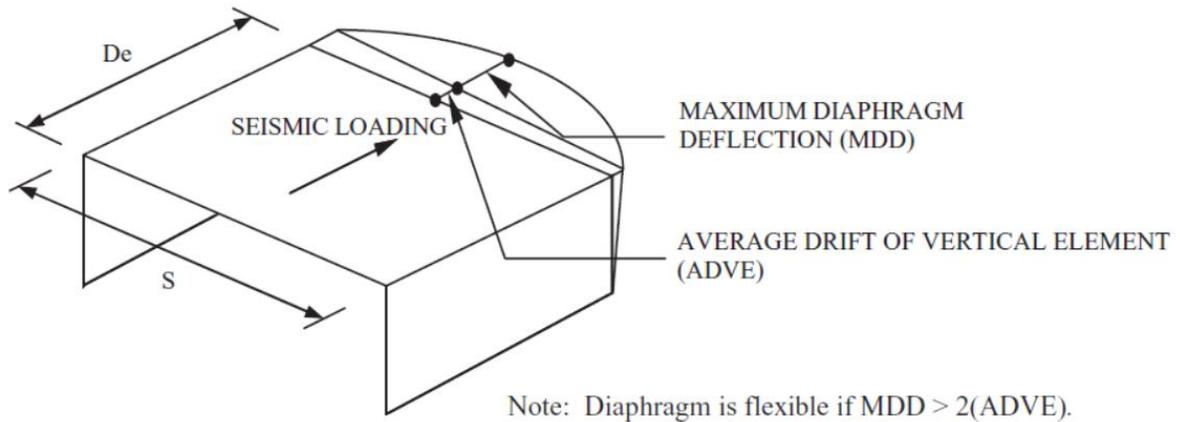


Figura 16. Flexibilidad del diafragma

Fuente: ASCE7-10, 2010, p.81

Según su rigidez los diafragmas se pueden clasificar como:

2.3.5.1 Diafragmas rígidos

Se dice que un diafragma es rígido si puede distribuir las fuerzas horizontales a los elementos verticales en proporción a su rigidez relativa. Además de presentar deflexiones insignificantes en comparación a las de los elementos verticales.

2.3.5.2 Diafragma flexible

Un diafragma se puede llamar flexible si realiza la distribución de cargas hacia los elementos verticales en proporción a sus áreas tributarias, la rigidez relativa de los elementos verticales es independiente a la porción de carga que reciban. En este tipo de diafragmas su deflexión será mayor a una relación de dos veces la deformación de los elementos verticales (ASCE7-10, p.81).

2.3.6 Diafragmas de techo como elemento sismorresistente

Dentro del ámbito del diseño estructural y como ya lo hemos comentado, es sabido que el diafragma de techo es capaz de transmitir cargas laterales a los

elementos verticales de la estructura, por lo que distintos códigos internacionales de diseño lo han incorporado dentro del diseño estructural con la finalidad de disminuir las cargas sísmicas para las que se diseña la estructura.

Sin embargo, en Costa Rica, el análisis de las estructuras tipo nave industrial no considera la influencia de la rigidez G' de este en el periodo de la estructura. Aun cuando se ha encontrado que, al considerar dicha rigidez, el periodo de las estructuras puede aumentar permitiendo utilizar un factor espectral dinámico menor y por ende un cortante basal menor. Al utilizar un cortante basal menor podría existir un ahorro significativo en el costo de las naves industriales.

Los diafragmas también pueden contribuir a las propiedades dinámicas generales de respuesta de un edificio como su capacidad de flexión, de cortante, su rigidez y su amortiguamiento, entre otras (Tremblay, 2005).

Los diseños a cortante para láminas de acero empleadas en los diafragmas de techo se pueden realizar basándose en los manuales internacionales de diseño del *Steel Deck Institute*, el código de construcción del *American Society of Civil Engineers*, las especificaciones de diseño en acero del *American Institute of Steel Construction*, entre otros.

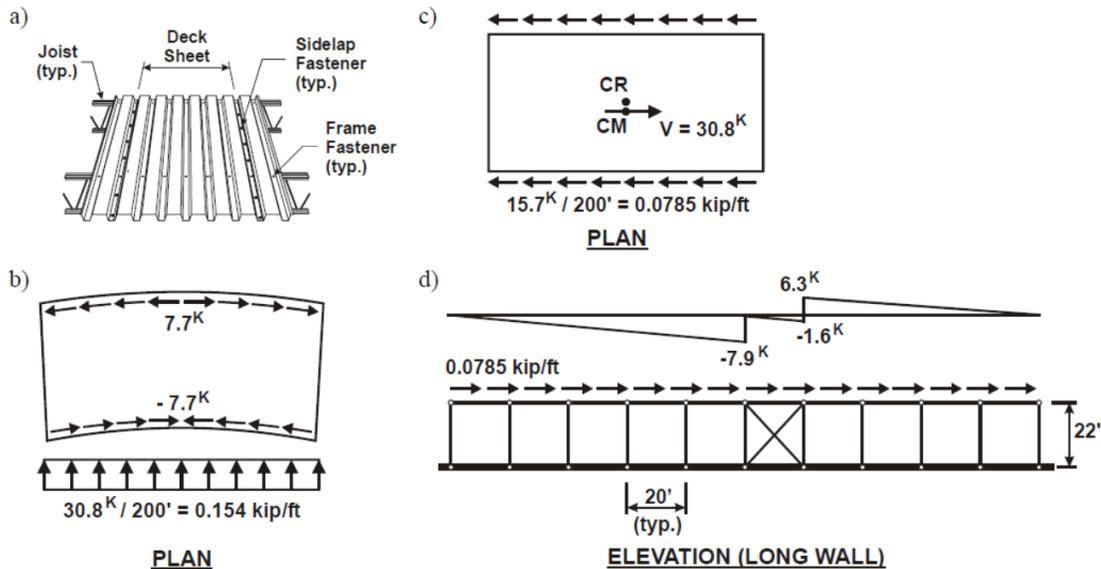


Figura 17. a) Láminas de acero del diafragma de techo. b) Cargas axiales actuando sobre el diafragma. c) Fuerzas transferidas al diafragma en el sentido longitudinal de la nave industrial. d) Vigas de borde actuando como elementos colectores por la trans

Fuente: Rogers, 2010, p.6

Estas características y propiedades del diafragma de techo han sido comprobadas y demostradas por diversas pruebas experimentales físicas, entre las que cabe mencionar el experimento de secciones de diafragma aisladas propuesto por el American Iron and Steel Institute, en el libro AISI Cold formed Steel Design (2002).

En él se busca establecer una resistencia nominal al cortante (S_n) y la rigidez al cortante (G') para una configuración de diafragma determinada, que especifique la geometría del panel y sus componentes, el ancho del panel, la carga a la que se somete, el espaciado de soporte y los métodos de conexión entre los componentes del panel y en los miembros del marco.

En este, se estructura un diafragma rectangular de dimensiones (a) x (b) proporcionales y se asegura que los miembros interconectados sean capaces de transmitir fuerzas axiales entre los mismos, y fabricados con ángulos de clip

atornillados u otros medios que minimicen la transferencia a flexión al final de los miembros, como se muestra en la figura (18).

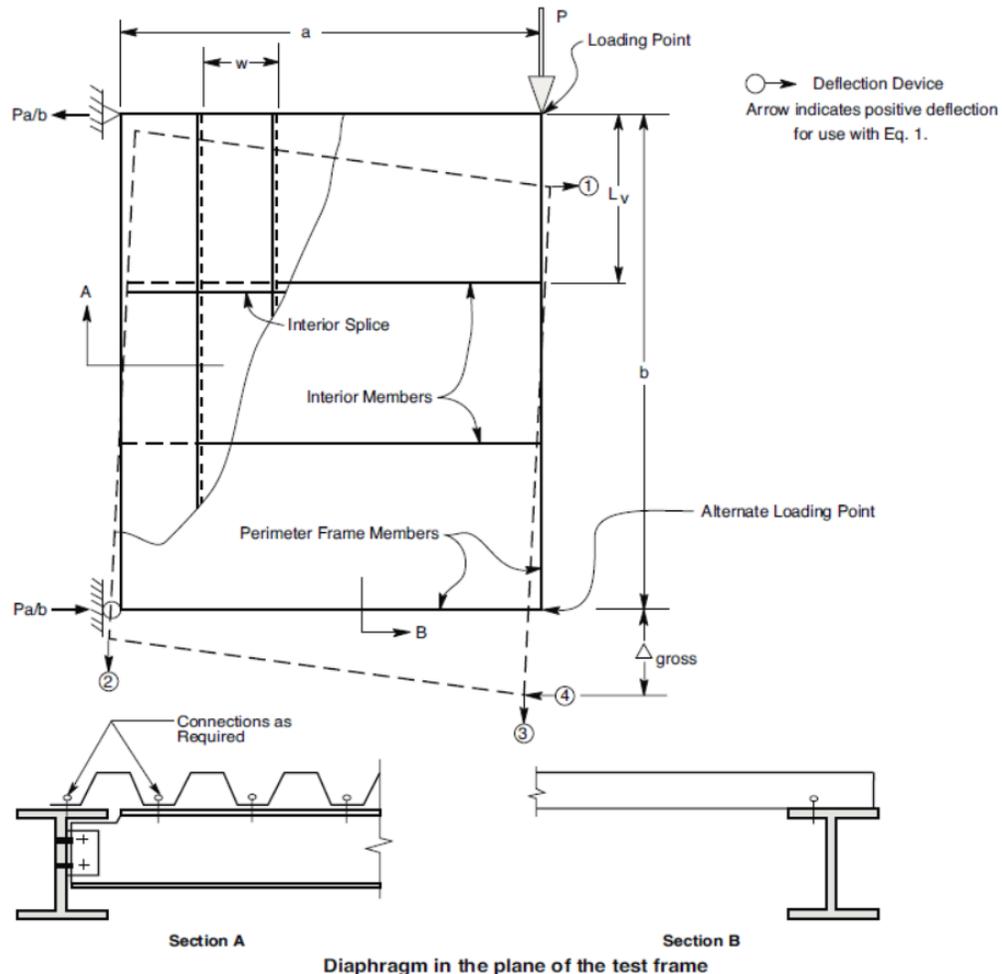


Figura 18. Configuración experimental de diafragma

Fuente: AISI, 2002, p.VI-56

Una vez que se ha configurado y construido el diafragma, se procede a ir paulatinamente transmitiéndole fuerzas específicas y midiendo las deformaciones Δ_i que sufre el diafragma en los ejes (1), (2), (3) y (4) a causa de esta transmisión de fuerzas. Se procede a graficar la fuerza transmitida (P) contra la deformación absoluta (Δ) obtenida con la siguiente ecuación:

$$\Delta = \Delta_3 - \left[\Delta_2 + \left(\frac{a}{b} \right) (\Delta_1 + \Delta_4) \right] \quad (7)$$

$$G' = \frac{P/b}{\Delta/a} = \frac{P a}{\Delta b} \quad (9)$$

Sea:

$$P = 0.4 P_n$$

Para más especificaciones ver (AISI, 2002, p.VI-54).

CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Paradigma, enfoque metodológico y método de investigación propuestos

3.1.1 Paradigma

Dentro del paradigma de las ramas de la Ingeniería Civil Estructural y Sismorresistente, el método de los Elementos Finitos es un método numérico que utiliza un proceso de ensamblaje de un sistema de matrices que consideran las fuerzas, las rigideces y los desplazamientos de un sistema, es capaz de dar solución a diversos problemas de Mecánica de Sólidos que resultan de gran importancia por su utilidad práctica. Según Álvarez (2014) es una herramienta de cálculo muy potente que permite al ingeniero estructural resolver múltiples problemas complejos.

3.1.1.1 Método del Elemento Finito

Los problemas físicos se pueden abarcar mediante dos metodologías, los modelos simples en los que es necesario realizar amplias simplificaciones para poder modelar el problema mediante una ecuación que nos brinde una solución exacta mediante una formula, y los modelos complejos que incorporan todas las complejidades del sistema que puedan tener inferencia en el resultado, aun si dificulten la solución del problema, y nos brinda una solución aproximada, convirtiéndose en un método predilecto para la investigación ingenieril y en el modelo utilizado por los elementos finitos.

Su idea básica consiste en subdividir el sólido en pequeñas partes o elementos interconectadas entre sí a través de los nudos de los elementos, de manera que los desplazamientos en el interior de cada elemento, puede expresarse en función de los desplazamientos nodales con lo que posteriormente, se podrá determinar la matriz de rigidez de los elementos en estudio (Álvarez, 2014). De esa manera, una

vez conocidos dichos desplazamientos, se puede determinar, las tensiones y las deformaciones en el interior del elemento.

El método es útil para problemas físicos que presenten una geometría, tipos de carga y propiedades complicadas que no permitan la obtención de soluciones analíticas, por lo que subdivide el problema global en un conjunto de matrices de pequeños problemas cuyas soluciones nos resuelven el problema global.

El proceso de subdividir un objeto en pequeños elementos se denomina discretización, y entre mayor sea la subdivisión el análisis será más detallado, pero se deberá de invertir más tiempo en el procesamiento de los datos.

Para Rao (2004):“El tamaño, forma, cantidad y las configuraciones de las subdivisiones de los elementos deben de ser determinadas para obtener una solución para la incertidumbre requerida” (p.53), sin que remitan a las computadoras a realizar esfuerzos fuera de su capacidad. Por lo que el método nos permite caracterizar de manera distinta diferentes zonas de una misma estructura, discretizando más las zonas cuya importancia en el análisis y geometría lo requieran.

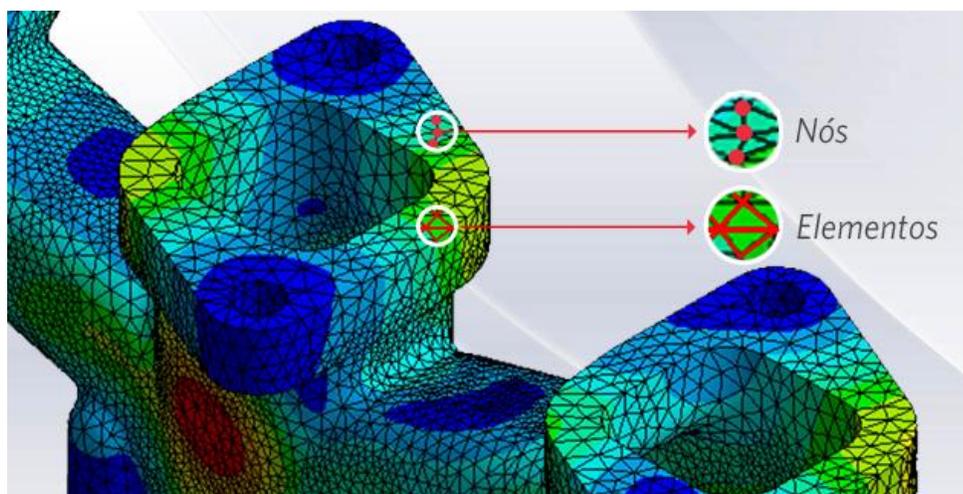


Figura 20. Nodos y elementos de una mal

Fuente: <https://www.esss.co/blog/es/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/>

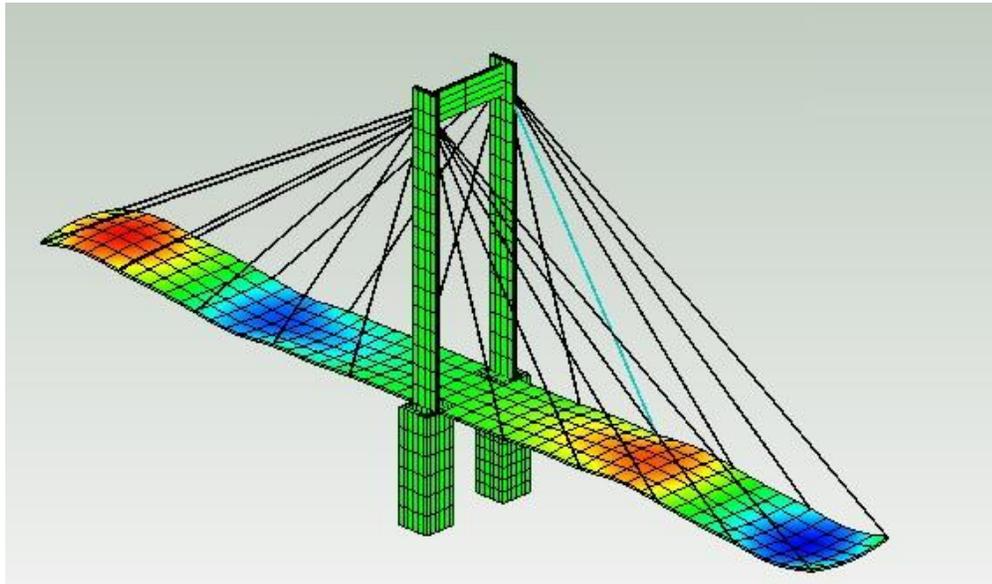


Figura 21. Modelación con Elemento Finito

Fuente: Recuperado de http://www.prontubeam.com/articulos/10_2015_mito_caverna_ing_estruct/10_2015_mito_caverna.php

3.1.1.2 Estructuración de los elementos finitos

Como se mencionó, el tamaño que tenga el elemento finito toma un papel muy importante, tanto en los recursos de procesamiento del ordenador como en el detallado de la solución. Por lo que cuando existan zonas en la estructura en la que se espere haya concentraciones de esfuerzos o de interés, a medida que el elemento se hace más pequeño se espera que los resultados obtenidos sean más realistas y con mayor convergencia a los escenarios reales.

Dassault Systemes (2007) indica: "Las dimensiones recomendadas para un análisis general rondan la relación 1 a 10 del elemento finito respecto al elemento en estudio, más se puede calibrar el modelo al realizarle una prueba de interés específica" (cap.3.1). Hacer un refinamiento de la discretización y comparar si los resultados han llegado a un punto de convergencia o en caso de que presenten diferencias relevantes se denotaría la necesidad de realizar una discretización más detallada.

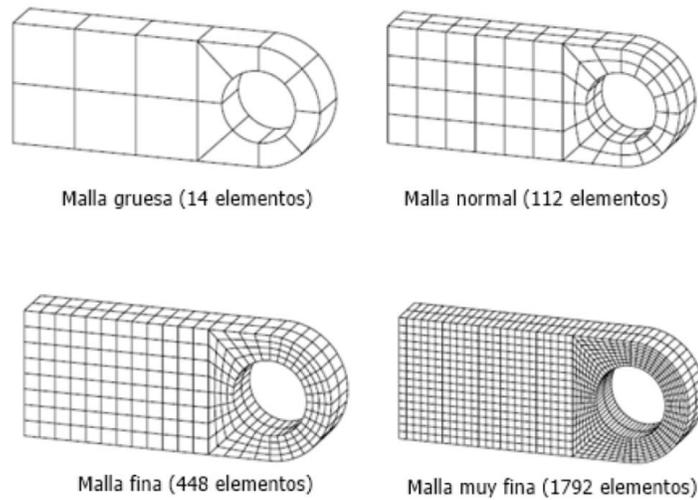
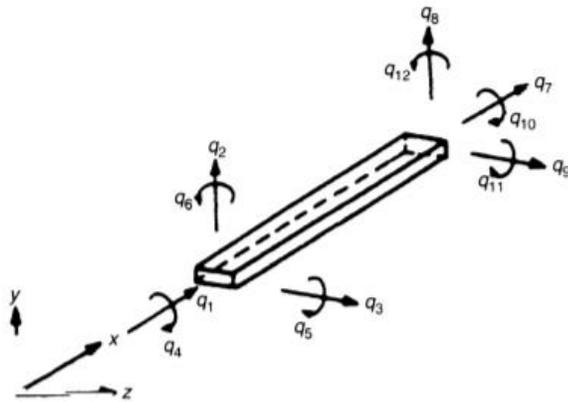


Figura 22. Refinamiento progresivo de una malla

Fuente: Dassault Systemes, 2007, p.47

Dependiendo del tipo de elemento o subelemento que se esté modelando, esta discretización de este se realiza en concordancia con su tipo de geometría, las cuales pueden ser agrupadas en 3 grandes grupos: elementos barra, elementos área y elementos sólidos.

En el caso de los elementos barra que son elementos en la que una de sus dimensiones es mucho más grande que sus otras dos dimensiones se pueden describir con dos nodos, uno en cada extremo. En la figura (23) se ejemplifica un elemento tipo barra al que se le puede medir sus desplazamientos transversales y el ángulo de rotación del cuerpo.



(a) Element with 12 degrees of freedom

Figura 23. Elemento barra

Fuente: Rao, 2004, p.322

Si los elementos son descritos por cuerpos sólidos, con magnitudes similares en todas sus dimensiones, pueden ser modelados mediante elementos tridimensionales como tetraedros y prismas, como lo ilustra la figura (24).

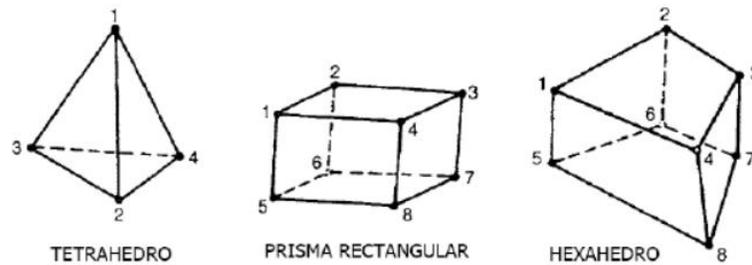


Figura 24. Elemento sólido

Fuente: Rao, 2004, p.402

Cuando se trabaja con elementos de tipo área, como el de la (figura 25) característicos por tener dos dimensiones de magnitud mucho mayor que su tercera dimensión, se pueden utilizar triángulos y cuadriláteros para describir los distintos elementos, el triángulo es el elemento más básico, mas el cuadrilátero tiene la ventaja de trabajar muy bien para superficies planas.

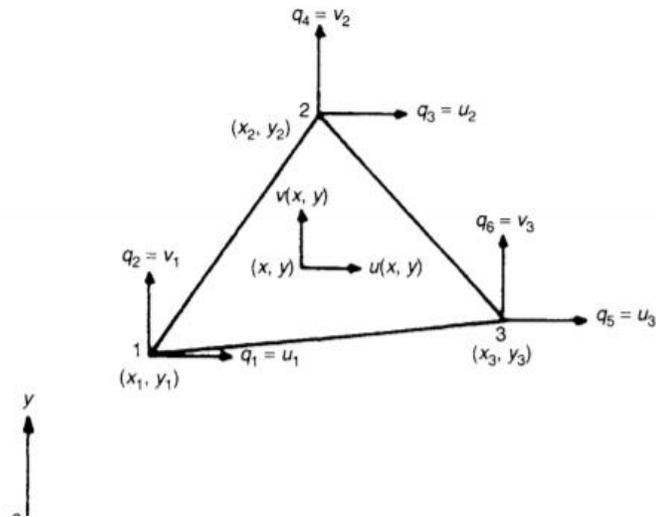


Figura 25. Elemento Área

Fuente: Rao, 2004, p.358

Los elementos área a su vez se pueden caracterizar según las propiedades que se les puede asignar a estos, en búsqueda de que presenten el comportamiento de modelación idóneo, y según Rao (2004): "se clasifican en 3 tipos de elemento área: elemento membrana, elemento *plate* y elemento *Shell*" (p.358).

Los elementos membrana son elementos de área que poseen 2 grados de libertad en cada nodo, respecto a la deformación en el plano del elemento, es decir, desplazamientos perpendiculares a su plano y las rotaciones de los ejes que conforman su plano están liberadas, por lo que no transmite momentos. La matriz de rigidez de este tipo de elementos depende de su módulo de elasticidad y de su área.

Los elementos tipo *plate*, son elementos de área que poseen 3 grados de libertad en cada nodo con deformación, traslación perpendicular al plano y la rotación de los dos ejes que conforman su plano, por lo que los desplazamientos en su plano están liberados.

La matriz de rigidez de un elemento tipo *plate* está en función del módulo de elasticidad y de las inercias.

Los elementos de tipo Shell son elementos área que poseen 5 grados de libertad en cada nodo, con deformación en los 3 ejes y rotación en los dos ejes que conforman su plano.

Este tipo de elemento es estable de forma independiente ante las cargas perpendiculares y axiales, y se puede describir como la suma de una membrana y un *plate*.

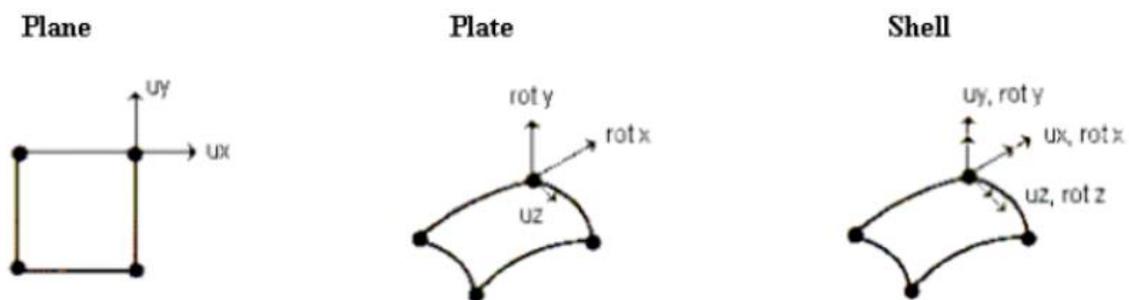


Figura 26. Tipos de elemento Área

Fuente: <http://www.gopion.com>

3.1.2. Enfoque metodológico

El presente trabajo expone un enfoque cuantitativo, ya que busca encontrar distintos datos numéricos para su posterior procesamiento, comparación y conclusión de distintos postulados. Ya que, si bien se podrán utilizar postulados descriptivos, estos estarán siempre ligados y serán dependientes de los resultados numéricos y su fin será la obtención de los datos numéricos buscados por la investigación

Al ser una investigación cuantitativa, se inicia realizando múltiples estudios de bibliografía que describa los comportamientos sísmicos de una nave industrial y las

características estructurales de los diafragmas de techo, para posteriormente poder emular y crear diversos experimentos en la búsqueda de resultados numéricos que nos permitan acreditar o desacreditar las hipótesis planteadas.

La investigación inicia con el estudio de los factores y variables de un diafragma de techo que pueden variar y determinar el comportamiento de una nave industrial al ser sometida a fuerzas sísmicas, se continúa con la determinación cuantitativa de estas variables para una configuración de diafragma determinado, y replicable dentro de marco situacional geográfico y temporal ubicado en la actualidad de Costa Rica.

Dentro del enfoque metodológico se estudiará las normativas de diversos códigos de construcción y materiales, que nos brinden las relaciones cuantitativas, ecuaciones y herramientas que nos permitan realizar la parte experimental manteniéndonos apegados a las normas internacionales y nacionales de construcción y diseño estructural.

Una vez estudiada la teoría descriptiva de nuestra investigación, determinado las variables de estudio y propuesto los métodos de recolección y procesamiento de estudio, se procederá a realizar la parte experimental en la búsqueda de los resultados numéricos que permitan realizar un análisis de los periodos de las estructuras, sus derivas y diagramas de momento, con el fin de comprobar o desmentir las hipótesis y postulados existentes.

3.1.3 Método de investigación

La investigación parte de un ámbito del conocimiento general como lo es la Ingeniería Sismorresistente, y se va acortando y delimitando hasta llegar al estudio del aporte sismorresistente que le puede brindar un diafragma de techo a una estructura de acero de tipo nave industrial.

Incluye el método analítico al estudiar las relaciones, la naturaleza y el efecto de inferencia de las distintas variables dentro de un sistema, para establecer la magnitud de importancia de estas.

También utiliza el método científico al realizar procesos controlados y lógicos que nos permitan la adquisición de postulados objetivos a partir de leyes de la dinámica de estructuras, la mecánica de sólidos y la comparación de los datos obtenidos con los postulados existentes.

Se enfoca en una obtención de los datos de estudio mediante una investigación experimental con la utilización del software SAP2000 para establecer escenarios de una nave industrial con y sin el diafragma de techo excitado por la transmisión de fuerzas sísmicas, permitiendo establecer un control sobre las variables empleadas, tanto en el establecimiento de las variables independientes como en el análisis de las variables dependientes.

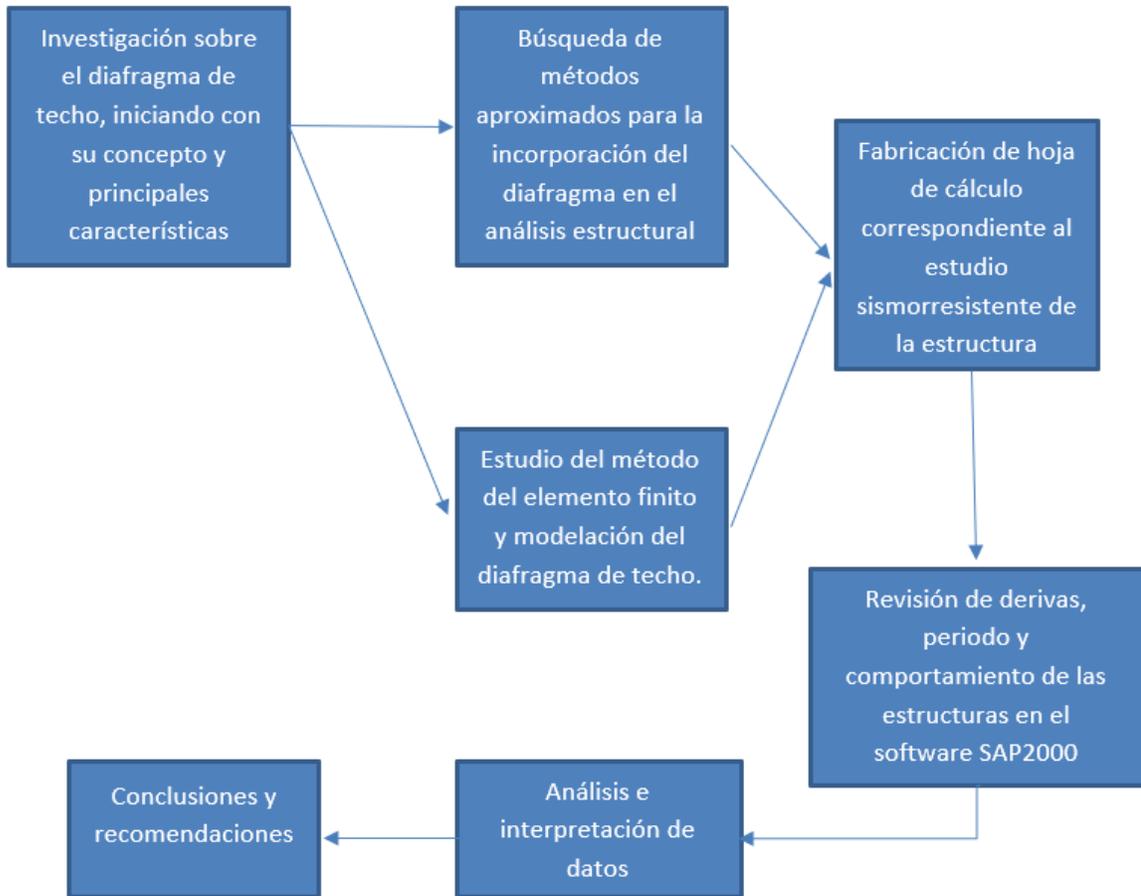


Figura 27. Método de investigación

Fuente: Elaboración propia, 2018

3.2 Categorías de análisis de la investigación (operacionalización de variables)

Se parte de la idea de optimizar el diseño de naves industriales, aprovechando la lámina metálica de techo y largueros en una configuración de diafragma que resiste cargas en su plano. Se establecen los datos y métodos de diseño estipulados por el CSCR-10, se establecen las variables y se estudia su correlación e importancia.

3.2.1. Variables independientes

En cada elemento en equilibrio estático deben existir diversos tipos de fuerzas internas conocidas como Momento flector, Fuerza Cortante y Fuerza Axial.

Popov (1978) afirma que estas fuerzas tienen las siguientes características:

Una fuerza interna (V) se llama *cortante* si actúa perpendicularmente al eje longitudinal.

Una fuerza interna (P) se llama *axial* si actúa paralelamente a su eje longitudinal. Si P actúa hacia la sección, recibe el nombre de fuerza de compresión. Si actúa alejándose de ella se llama fuerza de tensión.

Una fuerza interna que cree un par o momento resistente interno en el área transversal del elemento se llama momento flexiónate interno (M).

Estas fuerzas internas serán provocadas por las distintas cargas gravitacionales como laterales.

Según el CFIA, Código Sísmico Costarricense (2010), dependiendo de la naturaleza del tipo de carga estas son clasificadas como:

Las cargas permanentes (CP), siendo estas las cargas gravitacionales o el peso de todos los componentes estructurales, así como de los sistemas y componentes no estructurales permanentes, tales como paredes, pisos, techos y equipos de servicio fijos.

Además, son determinadas para este experimento como el peso propio de cada elemento de las naves industriales, sumado a las siguientes cargas:

- Carga Electromecánica: 15 kg/m²
- Carga Colateral: 14,65 kg/m²
- Carga Cubierta Metálica: 15 kg/m²

Nota: la carga de la cubierta metálica será considerada sólo cuando esta no esté siendo considerada por el peso propio de la lámina.

Las cargas temporales (CT) son la carga gravitacional adicional a la *carga permanente*, debida a la ocupación de la edificación (CFIA, Código Sísmico Costarricense, 2010).

- Carga Temporal para techo: 40 kg/m²

La Carga Sísmica (CS) por su parte para efectos del diseño, es la sollicitación interna producida por el movimiento sísmico, producido por las fuerzas sísmicas, las cuales son fuerzas estáticas externas para propósitos de diseño, capaces de reproducir los valores extremos de las acciones internas causadas por la sollicitación sísmica que actúa en la base del edificio (CFIA, Código Sísmico Costarricense, 2010).

Para un análisis de capacidad de la estructura se obtiene la carga última (CU), esta es la resultante de una combinación extrema de cargas que la edificación deberá ser capaz de resistir con algunos de sus elementos estructurales esforzados al límite de su capacidad (CFIA, Código Sísmico Costarricense, 2010). Carga que se obtiene al calcular la combinación de carga de diseño más crítica de las siguientes combinaciones propuestas por el CSCR-10:

$$CU = 1.4 CP \quad (10)$$

$$CU = 1.2 CP + 1.6 f_R CT + 1.6 CE \quad (11)$$

$$CU = 1.05CP + f_1 f_R CT \pm CS + CE \quad (12)$$

$$C_U = 0.95 C_P \pm C_S + C_E \quad (13)$$

Dónde:

C_E = carga de empuje.

El factor f_1 está dado por:

$f_1 = 0.5$ para edificaciones de baja probabilidad de ocupación plena de carga temporal a la hora del sismo.

$f_1 = 1.0$ para edificaciones de baja probabilidad de ocupación plena de carga temporal a la hora del sismo, como: bodegas, sitios de reunión pública, estacionamientos públicos, entre otros.

$f_1 = 0.0$ para techos.

f_R = factor de reducción de carga temporal según el artículo 6.3. El producto ($f_1 f_R$) dado en la ecuación [6-3] no puede ser menor que 0.5.

CSCR-10 (2014) indica: "El método estático es un análisis elástico lineal, que calcula las fuerzas sísmicas laterales mediante una aproximación del análisis modal." (p7/4). Este cuantifica los posibles efectos del sismo sobre la edificación calculado el cortante basal y las fuerzas *sísmicas* para las que será diseñada la estructura.

Asimismo, CSCR-10 (2014) señala: "Algunas de sus limitaciones son que la estructura debe de cumplir con los requisitos de ser regular en altura, regular en planta y no poseer un número de pisos superior a 5 o una altura máxima de 20 metros" (p7/5) requisitos que debido a la configuración geométrica y estructural de las 6 naves industriales en estudio se cumplen y nos permiten utilizar el método.

El cortante basal de la estructura y en nuestro caso la fuerza sísmica es obtenida de la resultante de multiplicar el peso sísmico (W) por el coeficiente sísmico (C), el cual se ve reducido por la sobre resistencia y es proporcional al factor espectral dinámico, a la aceleración de pico efectiva, y a la importancia de la estructura.

$$C = \frac{aef I FED}{SR} \quad (14)$$

Para el cálculo del coeficiente sísmico se deben definir previamente los siguientes parámetros estructurales y situacionales, según lo dictamina el CSCR-10:

El factor espectral dinámico, (FED). Es el factor que modifica la aceleración de un sistema de un grado de libertad con respecto a la aceleración pico efectiva de diseño. Es función de la zona sísmica, del sitio de cimentación, de la ductilidad global asignada al sistema estructural, de su periodo de vibración y de su amortiguamiento. Se determina según el Anexo (E) del CSCR-10.

Zonificación sísmica. El CSCR-10 divide al país en tres zonas sísmicas con relación ascendente según su sismicidad, siendo estas denominadas como ZII, ZIII y ZIV.

Sitio de cimentación. EL sitio de cimentación considera las condiciones dinámicas del sitio en la demanda sísmica en relación con el tipo de suelo sobre el que se cimenta la obra, y se supone un S3 cuando las propiedades del sitio no se conozcan con suficiente detalle.

La ductilidad global asignada (μ). Es la ductilidad global que se asigna a la estructura conforme a la tabla 4.3 del CSCR-10 para efectos de determinar su factor espectral dinámico, FED. Siendo esta, la ductilidad del sistema estructural ante cargas laterales, determinada de la relación del cortante en la base y los desplazamientos.

La aceleración de pico efectiva (aef). Corresponde al valor de aceleración pico efectiva de diseño en la base de la estructura expresada como fracción de la aceleración de la gravedad y obtenida de la tabla 2.3 del CSCR-10.

Tipo de sitio	Zona II	Zona III	Zona IV
S ₁	0.20	0.30	0.40
S ₂	0.24	0.33	0.40
S ₃	0.28	0.36	0.44
S ₄	0.34	0.36	0.36

Figura 28. Aceleración pico efectiva de diseño, aef para un período de retorno de 475 años y para diferentes zonas sísmicas y tipos de sitio.

Fuente: Recopilada del CSCR-10, 2014, p.2/8

El factor de importancia (I) se refiere al coeficiente que se asigna a las edificaciones en función de su importancia y riesgo, según la tabla 4.1. del CSCR-10 y que modifica directamente el coeficiente sísmico.

La Sobre Resistencia (SR). Este valor es igual a 2 para estructuras tipo marco, dual y muro, e igual a 1.2 para estructuras de tipo voladizo y otros.

El peso sísmico de nivel (W) está compuesto por la carga permanente más una fracción de la carga temporal. Sin embargo, en el presente experimento al considerar que el nivel corresponde a un techo se considera que la probabilidad de presentar carga temporal durante un evento sísmico es nula, por lo que solo se considera la carga permanente y debe de ser considerando el peso de la estructura de la mitad de las columnas para arriba, ya que se asume que a otra mitad va a ser absorbida por el terreno.

Con lo que se puede llegar a obtener el cortante basal (V) para cada marco utilizando la siguiente ecuación:

$$V = C W \quad (15)$$

De esta manera, se procede a calcular las Fuerzas Sísmicas por nivel (F_i) mediante la ecuación 16, sin embargo, como el presente trabajo evalúa estructuras de un solo nivel como lo son las naves industriales en estudio, en el cálculo de las Fuerzas Sísmicas se cancelan las alturas, masas y reduce al cálculo del cortante basal.

$$F_i = V * \frac{W_i H_i}{\sum_{k=1}^n W_k H_k} \quad (16)$$

3.2.2 Variables dependientes

3.2.2.1. Derivas

CSCR-10 (2014) explica: "Una deriva es un desplazamiento relativo entre pisos adyacentes" (p c/4). En nuestro trabajo al ser una estructura de un piso el desplazamiento será con relación a la base de las columnas y la parte más alta de nuestra estructura.

Para la investigación, resulta de suma importancia el conocer los desplazamientos elásticos que sufren las distintas estructuras a causa de las fuerzas sísmicas, y después de realizar un análisis sísmico empleando el software SAP2000 se podrá acceder a los desplazamientos elásticos de cada nodo, y a partir de estos valores obtener los desplazamientos inelásticos que permitan conocer las derivas de cada nave industrial.

Estas derivas son un punto de comparación fundamental, ya que el código sísmico de Costa Rica 2010 establece los desplazamientos horizontales máximos que puede tener una estructura para cumplir con el criterio de rigidez según la clasificación que les asigna a las edificaciones ilustradas en la figura (33).

3.2.2.2 Periodos de vibración

Beer (2010) señala:” El intervalo requerido para que un sistema complete un ciclo de movimiento recibe el nombre de periodo de vibración” (p.1216). Esta variable es inversamente proporcional al *FED*, siendo el *FED* proporcional al coeficiente sísmico, y este a su vez proporcional a la fuerza sísmica de diseño.

Por lo que a mayor periodo menor fuerza sísmica de diseño, lo que establece el periodo como una variable de importancia y estudio.

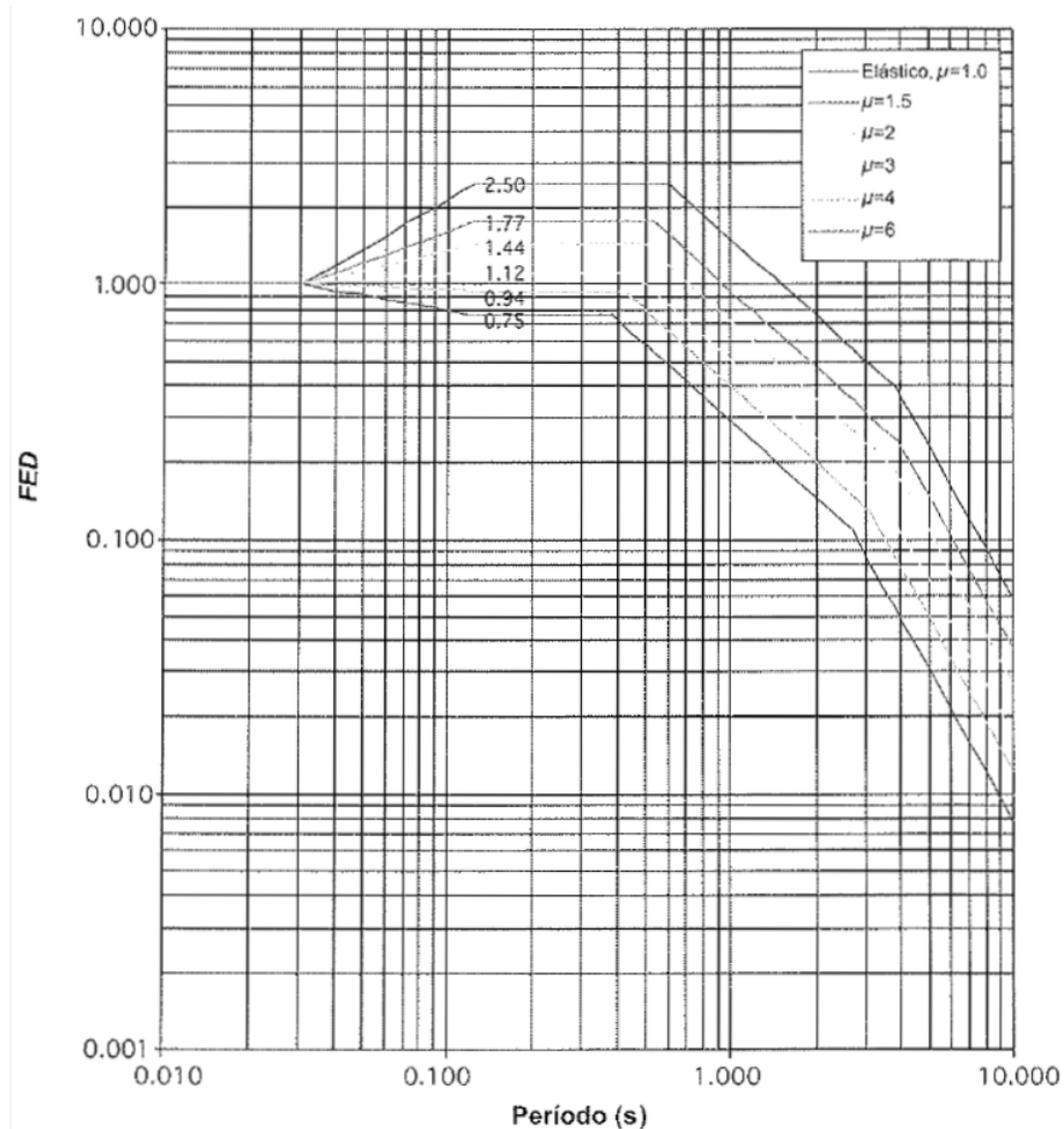


Figura 29. Factor espectral dinámico, FED, para sitios de cimentación tipo S3 en zona sísmica III

Fuente: Recuperada del CSCR-10, 2014, p5/9

3.2.2.3 Pesos de las naves industriales por metro cuadrado.

El modelar y analizar las naves industriales como estructuras de acero en el software SAP 2000 nos permite elegir las secciones optimas requeridas para obtener la capacidad sismorresistente necesaria en cada uno de los diseños estructurales, con lo que podemos obtener el peso por metro cuadrado para cada una de las naves, permitiéndonos hacer una comparación de peso por metro cuadrado de las estructuras que consideraron el diafragma de techo en su diseño de las que no.

Esta variable de suma importancia debido a que el peso por metro cuadrado de una estructura de acero es proporcionalmente influyente al costo del material requerido para la construcción de la estructura

3.3 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

Como se ha mencionado, el presente trabajo se basa en la recolección de los datos para el estudio del análisis de la influencia y aporte sismorresistente del diafragma de techo, para lo que analizaremos 6 naves industriales mediante el método del elemento finito que utiliza el software SAP 2000 en sus análisis para comparar los resultados con los del método de la cercha empleado por Aguilar (2014).

Primero se realizará el estudio de las 3 naves industriales que no consideran el diafragma de techo, seguidamente de las 3 naves industriales que lo consideran en su diseño y se proseguirá con la obtención de los datos de interés que nos brinde el software.

La geometría general de las naves industriales esta ilustrada en la (figura 30), y cabe mencionar que las naves de 28 y 42 metros en el eje transversal incluyen una viga HSS intermedia.

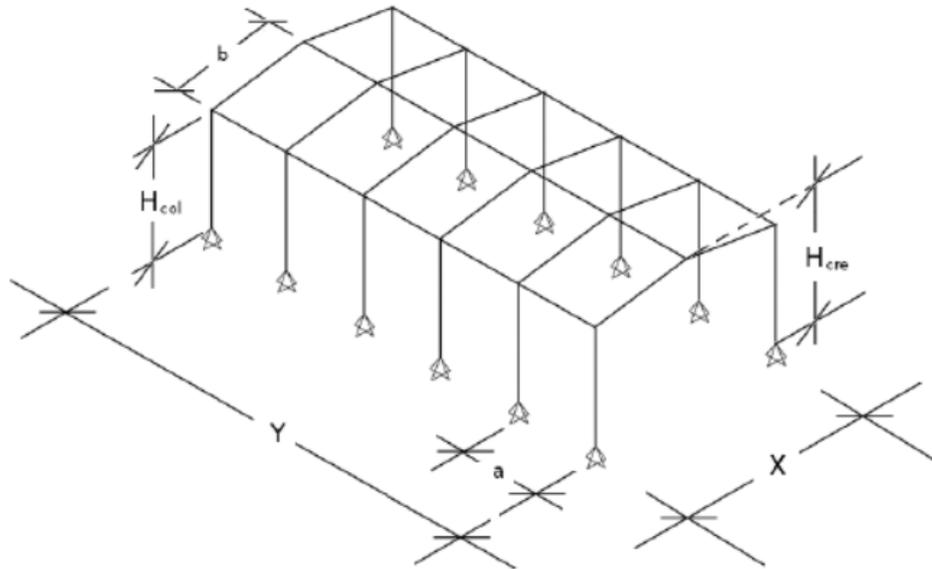


Figura 30. Geometría general de las naves industriales a analizar

Fuente: Aguilar, 2014, p.108

Nave Industrial	¿Considera el diafragma?	X (m)	H_{col} (m)	H_{cr} (m)	S (%)	a (m)	b (m)
A	NO	14	8	9,05	15	6	7,08
B	NO	28	8	10,1	15	6	14,16
C	NO	42	8	11,15	15	6	21,23
D	SÍ	14	8	9,05	15	6	7,08
E	SÍ	28	8	10,1	15	6	14,16
F	SÍ	42	8	11,15	15	6	21,23

Figura 31. Dimensiones de las naves industriales a analizar

Fuente: Aguilar, 2014, p.109

Cabe mencionar que las naves industriales que no consideran el diafragma de techo incluyen riostras tanto verticales como horizontales en los lugares ilustrados por la figura (32).

Mientras que las naves industriales que consideran el diafragma de techo no van a incluir riostras de techo debido a que la función será suplementada al modelarle los largueros de sección C 7.5x5x1.5x0.237 a cada 1,17m y su conexión con la lámina rectangular de Metalco, anteriormente expuesta, más si van a contar con las riostras verticales.

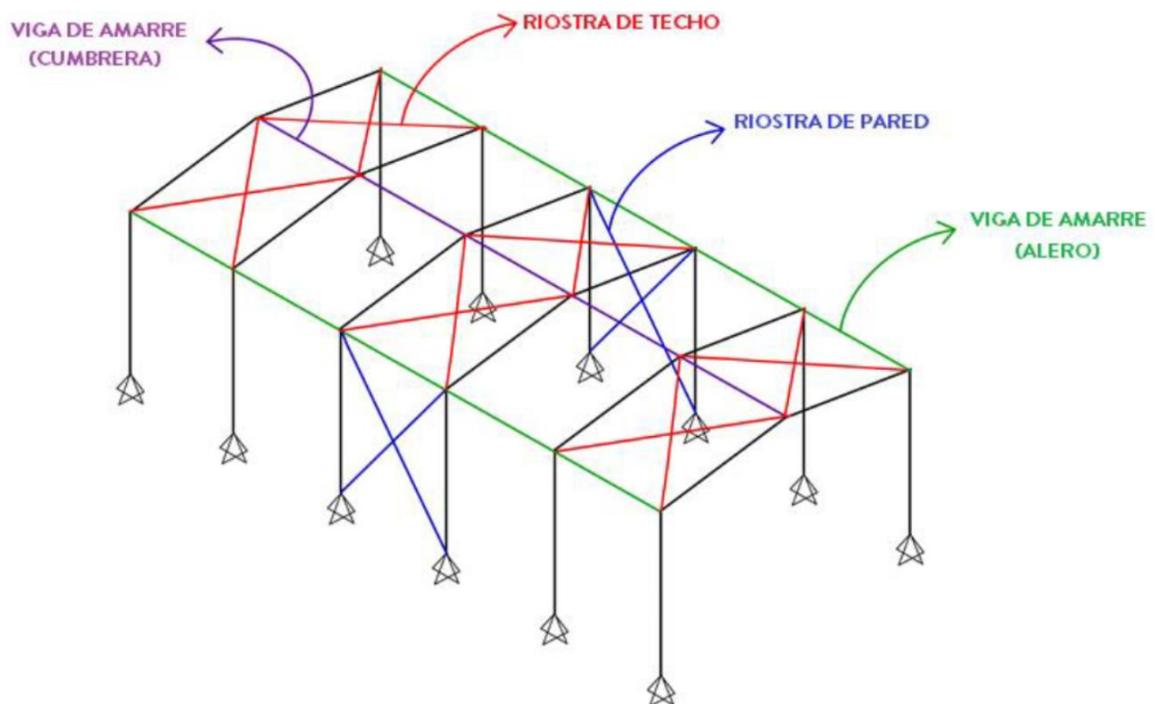


Figura 32. Elementos horizontales de las naves industriales a analizar

Fuente: Aguilar, 2014, p.108

El software SAP 2000 es una gran herramienta para el diseño y análisis estructural, esta herramienta utiliza el método del elemento finito en sus análisis, y una vez que el usuario ha establecido las variables de cada elemento como su geometría, su espesor, el tipo de conexiones y las condiciones de demanda a los que los elementos se van a ver sometidos, el software es capaz de ensamblar la estructura como un total, estableciendo las características locales de cada elemento, que convergen a las características globales de la estructura en análisis o diseño.

Estas estructuras de naves industriales son ilustradas en las (figuras 33, 34 y 35) y buscan ilustrar la cantidad y estructuración de los elementos barra que van a ser tomados en cuenta en el diseño estructural de cada una de las 6 naves industriales, por lo que, con el fin de poder visualizarlos adecuadamente no se presentan a escala, y no se presentan las láminas de techo, aun cuando estas si fueron tomadas en cuenta en el diseño estructural de las naves D, E y F.

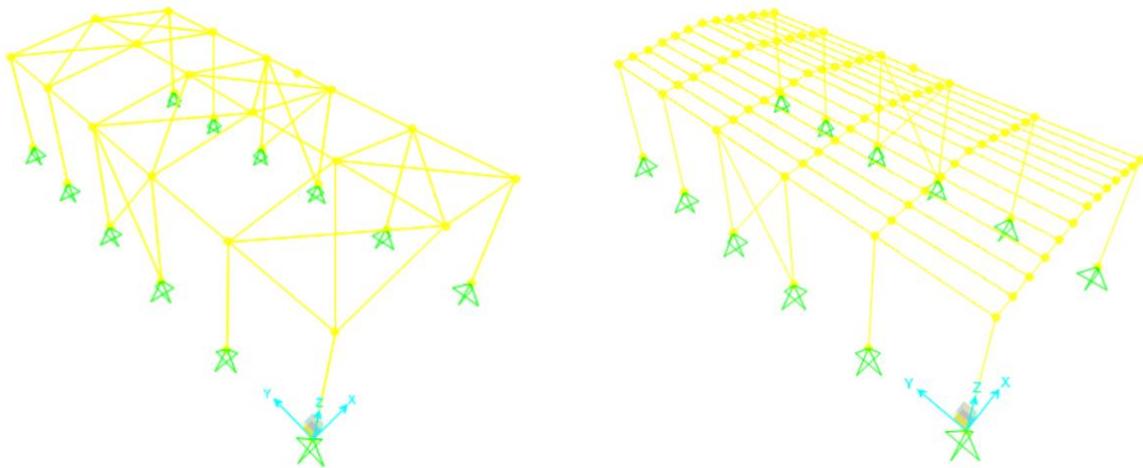


Figura 33. Modelo general de diseño estructural naves industriales A y D respectivamente.

Fuente: Elaboración propia, 2018

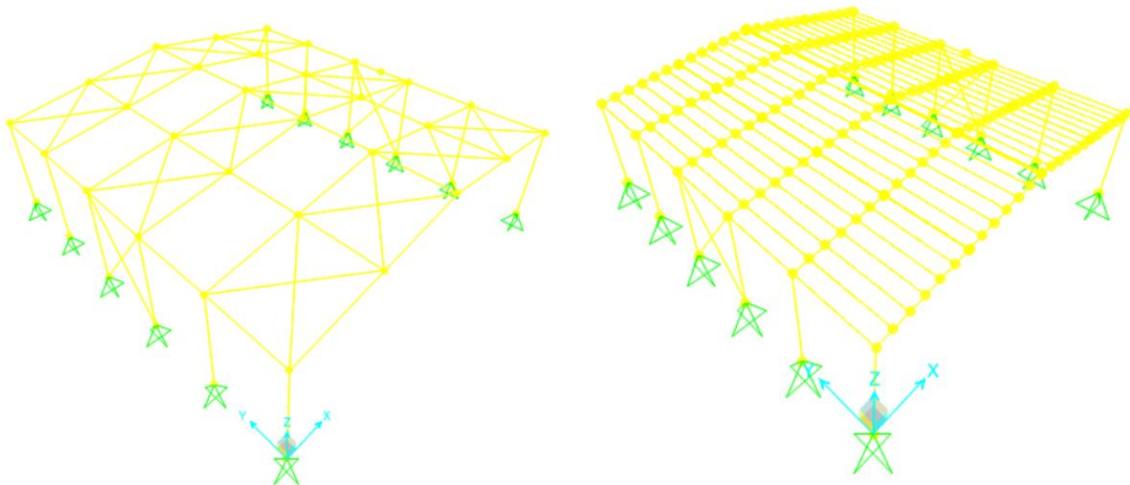


Figura 34. Modelo general de diseño estructural naves industriales B y E respectivamente.

Fuente: Elaboración propia, 2018

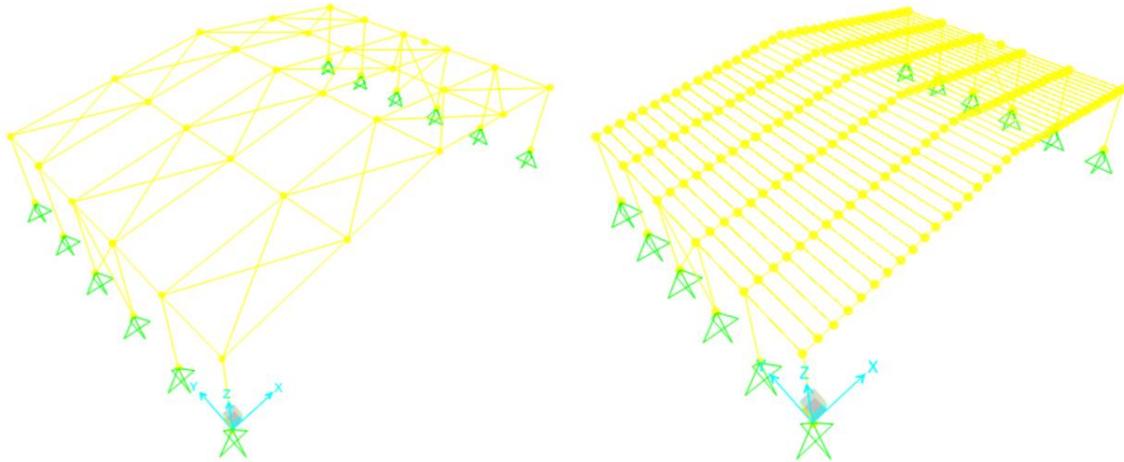


Figura 35. Modelo general de diseño estructural naves industriales C y F respectivamente

Fuente: Elaboración propia, 2018

En el análisis de estructuras complejas, compuestas de diversos elementos con características estructurales propias y ensamblados sobre diversos ejes dentro del sistema global, se vuelve necesario el desarrollo de miles de ecuaciones en diversas matrices que se volverían procesos muy extensos para el calculista, pero gracias a las herramientas que nos brinda la tecnología actual, con el desarrollo de softwares como el SAP 2000 estos cálculos son posible.

En el presente trabajo se aprovechará de esta herramienta con el afán de obtener los datos necesarios para poder establecer una correlación en la incorporación o no de diafragmas flexibles en el análisis estructural y de los diseños resultantes de ambos escenarios.

La metodología experimental de este trabajo inicia con una primera propuesta de secciones para las estructuras, según establece el código sísmico se asigna un periodo natural inicial de 0.12 segundos, que en nuestro marco situacional corresponde a un *FED* de 1.74 y a un coeficiente sísmico de 0.31.

Mediante el software SAP 2000 se procede a utilizar el método Estático para obtener los desplazamientos elásticos de la estructura correspondientes a las

fuerzas sísmicas en ambos ejes. Desplazamientos con los que se recalcula el periodo utilizando la ecuación (17) establecida por el CSCR-10.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{1 \sum_{i=1}^N W_i (\delta_i^e)^2}{g \sum_{i=1}^N F_i \delta_i^e}} \quad (17)$$

Donde:

δ_i^e = desplazamiento elástico en el nivel i debido a las fuerzas sísmicas horizontales.

g = aceleración de la gravedad, en las unidades correspondientes

Una vez calculado se utilizan las tablas de factor espectral según el tipo de suelo y zona sísmica del Anexo E del CSCR-10, en las que se ingresa con el periodo calculado hasta intersecar la ductilidad asignada y recalcular el FED de la estructura.

Una vez calculado el FED se calcula el nuevo Coeficiente sísmico, se modifica en el software y se procede a hacer el recalcu de los desplazamientos elásticos, con los cuales se van a calcular las derivas mediante las ecuaciones (18) y (19) establecidas por el CSCR-10:

$$\delta = \alpha \mu SR \delta_i^e \quad (18)$$

$$\Delta i = \mu SR \Delta_i^e \quad (19)$$

Donde:

δ_i =desplazamiento inelástico absoluto horizontal del nivel i

Δi = deriva inelástica o desplazamiento inelástico relativo horizontal entre el nivel i y el nivel adyacente inferior

α = factor de desplazamiento inelástico. Para edificaciones de un piso, $\alpha=1$.

μ = ductilidad global asignada

SR = factor de sobre resistencia

δ_i^e , Δ_i^e = desplazamiento elástico absoluto del nivel i y deriva elástica entre el nivel i y el nivel adyacente inferior respectivamente

Datos con los que se realiza el análisis por rigidez establecido por el CSCR-10, el cual establece que las derivas en el sentido corto y largo de la estructura deben cumplir con lo estipulado en la figura (36).

Sistema estructural (según artículo 4.2)	Edificaciones A y C (Limitación especial según artículo 4.1)	Edificaciones B, D y E (Limitación normal según artículo 4.1)
tipo marco	0.0125	0.020
tipo dual	0.0125	0.018
tipo muro	0.0100	0.010
tipo voladizo	0.0125	0.020
tipo otros	0.0065	0.010

Nota: $H_i = h_i - h_{i-1}$, altura entre el nivel del piso i y el nivel adyacente inferior

Figura 36. Límite superior de la razón de deriva inelástica, Δ_i / H_i , según categoría de edificación y sistema estructural

Fuente: Recuperado del CSCR-10, 2014, p7/14

Si las derivas obtenidas no cumplen con lo establecido se procederá a proponer otras secciones para la estructura e iterar el procedimiento.

En caso de que ambas derivas estén dentro de los parámetros establecidos se procede a realizar el análisis por capacidad de las secciones de los elementos propuestos.

El análisis por capacidad se obtiene de someter a la estructura a la combinación de carga última o más crítica posible, y analizar la capacidad de cada uno de los elementos de la estructura frente a esta demanda.

Mediante el software SAP 2000 se pueden analizar todos los elementos de la estructura global, al obtener los diagramas y demandas de las cargas axiales, los

momentos flectores y las cargas a cortante respectivos a cada elemento de la estructura global y a partir de esto elegir la sección óptima que cumpla con cada uno de los requisitos de demanda.

Finalizado el diseño se obtienen las secciones de cada elemento de la estructura, y una vez con el diseño final establecido se procede a hacer el recalcu de las derivas, se calcula el periodo natural y el peso de la estructura.

Dentro de un mismo marco situacional, el periodo de la estructura se vuelve una de las variables de estudio y análisis, en este trabajo el periodo natural final de la estructura será determinado mediante la utilización del programa SAP2000, el cual emplea un análisis elástico-lineal que toma los distintos modos calculados en los que se puede deformar una estructura y los combina en función de sus periodos, los que a su vez dependen de la rigidez de las distintas configuraciones de las naves industriales en análisis.

Con el afán de determinar los modos de mayor exigencia para las naves industriales, se utiliza un número de modos tal que permita alcanzar al menos el 90% de la masa participativa total en las dos direcciones principales de estudio, y de ellos se elige el periodo natural T (s) correspondiente al modo con mayor participación de masa, correspondiente a la ecuación (20).

$$T = \sqrt{\frac{m}{K}} \quad (20)$$

Donde;

m = masa sísmica

k = matriz de rigidez de la estructura

Respecto al peso por metro cuadrado de la estructura es el dato más relevante de la presente investigación al develar cuánto porcentaje del peso de una nave

industrial se puede ahorrar un constructor al tener un diseño que incorpora el diafragma de techo en este.

El peso de una estructura de acero es proporcional al precio de la obra, lo cual determina factores de especial importancia para cualquier oficina de ingeniería como lo es la rentabilidad de proyecto y la optimización de sus recursos.

Por lo que se utilizará la herramienta del SAP 2000 para establecer las secciones óptimas para los elementos de las naves industriales, que posean la capacidad necesaria para cumplir con todos los requerimientos de diseño.

3.4 Técnicas e instrumentos para el procesamiento y análisis de los datos

Se procederá a analizar la importancia e influencia de los distintos parámetros comparativos en estudio, al tabular éstos en hojas de cálculo que permitan ordenar, procesar, y analizar la influencia del diafragma de techo en el comportamiento sismorresistente de las naves industriales.

Los distintos experimentos que se realizarán en el presente trabajo son un instrumento para sintetizar las teorías e hipótesis estudiadas en las fuentes bibliográficas y hacerlas converger a un resultado experimental que sintetice la información con datos claves de estudio que posteriormente permitan establecer conclusiones respecto a la influencia que pudo tener el diafragma de techo en las naves industriales.

Se realizará un experimento paralelo que denote la capacidad a cortante de un diafragma de techo aislado, que ilustre la relación fuerza deformación que éste pueda llegar a tener mediante un gráfico y que ilustre nuestros análisis de comportamiento estructural.

Dentro del análisis y experimento principal de este trabajo, los resultados obtenidos de los desplazamientos y las derivas de las distintas naves se evaluarán mediante el método de rigidez establecido por el CSCR-10, quien determinará si los diseños cumplen con los parámetros establecidos por el código o no, además que permite analizar el aporte de rigidez que le puede brindar los diafragmas de techo a la estructura global al tener el resultado de las derivas como parámetro correlacional.

Estos desplazamientos también se analizarán respecto a la relación de clasificación de rigidez anteriormente expuesta que estos le vayan a determinar a cada diafragma, utilizando como herramienta la ecuación (21):

$$\Delta = \Delta_s + \Delta_b \quad (21)$$

Donde:

Δ = Desplazamiento máximo obtenido

Δ_s = Desplazamiento por deflexión al cortante

Δ_b = Desplazamiento por flexión

La recopilación de estos desplazamientos nos va a permitir estudiar la rigidez del diafragma ya que podemos comparar los desplazamientos que tuvo este con los desplazamientos que tuvo el sistema estructural vertical, con lo que se logra establecer una relación para la determinación de la deflexión de este debido a las fuerzas sísmicas que se le aplicaron.

De este modo, permite hacer la correlación del desplazamiento máximo con la deflexión del diafragma y el desplazamiento de los elementos estructurales verticales, que nos clasifica en diafragma en rígido, o flexible, al mismo tiempo que permite analizar la capacidad de deflexión de estos.

Se estudiará la relación de la disminución o no de las fuerzas de sismo al comparar los periodos determinados por el análisis modal realizado por el *software* SAP 2000

de las estructuras mediante hojas de cálculo y gráficos que permita visualizar la influencia que esta variable puede tener.

Con la ayuda de Hojas de cálculo del software Microsoft Excel se tabularán todos los elementos utilizados en cada una de las 6 naves, su área transversal, su longitud y su densidad, para obtener como resultante en peso de cada una de las naves y poder establecer una relación de cuánto porcentaje de peso se pudo reducir en la estructura al haber considerado el diafragma de techo como parte del diseño estructural. Representándolos mediante gráficos comparativos que permitan llegar a conclusiones más certeras.

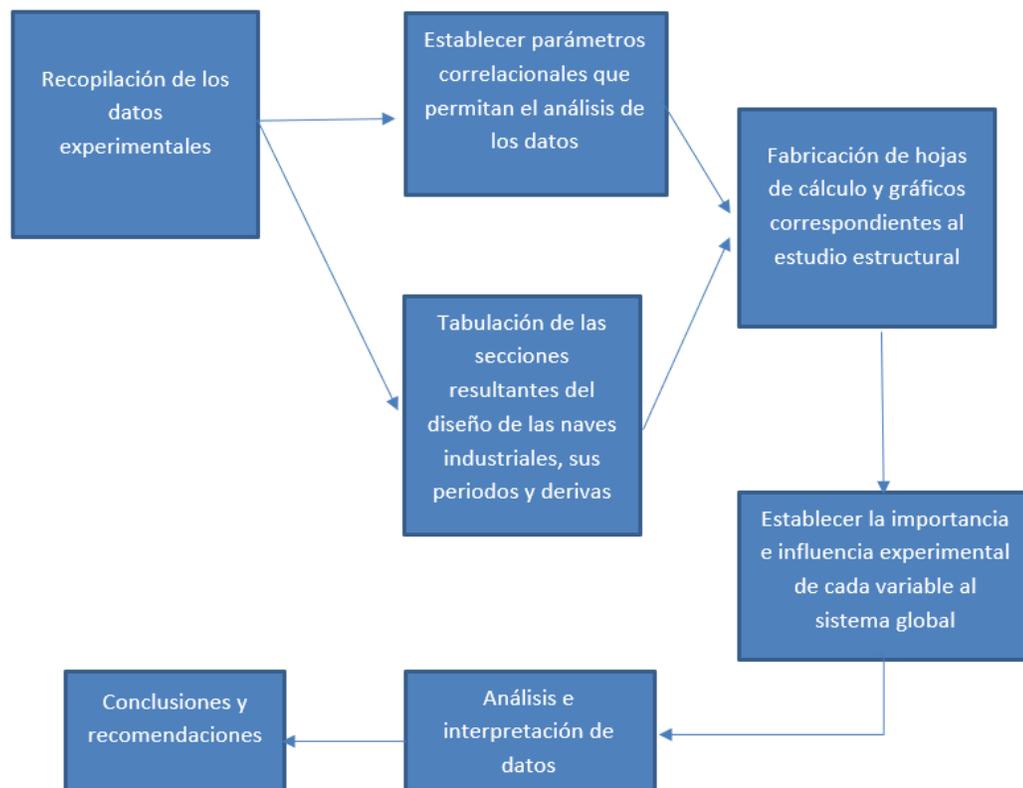


Figura 37. Técnicas e instrumentos para el procesamiento y análisis de los datos

Fuente: Elaboración propia, 2018

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Toda estructura civil va a estar diseñada mediante diversos parámetros para una demanda específica establecida según el tipo de estructura y marco situacional y su diseño debe de obedecer a una iteración que busque una optimización en la relación demanda-capacidad, en la que la capacidad de la estructura siempre sea mayor a su demanda.

En este caso, la demanda, será establecida por las diversas combinaciones de carga para las que se diseñara la estructura, dato que como ya se ha visto en este trabajo depende de diversas variables previamente establecidas y asignadas según el escenario situacional de las estructuras en estudio en diversas tablas dentro del CSCR-10. La capacidad por las secciones de los elementos establecidos en el diseño estructural de cada una de las 6 naves industriales.

El análisis de resultados de este trabajo se desprende de la obtención y análisis de 3 factores de estudio mencionados, estos son los desplazamientos de las naves industriales producidas por las fuerzas sísmicas correspondientes a cada estructura, las cuales convergen en el cumplimiento a no de las derivas establecidas en el método de rigidez por el CSCR-10, y establecerán la rigidez del diafragma. Los periodos desarrollados por cada una de las estructuras al haberlas sometido a un análisis sísmico mediante el software SAP2000. Además, la influencia en el peso por metro cuadrado de estructura de incluir o no el diafragma de techo en el diseño estructural de la nave industrial.

4.1 Modelación del diafragma de techo mediante el método del elemento finito

Un aspecto novedoso del presente trabajo es la modelación mediante el método del elemento finito realizada del diafragma de techo, incluyendo la lámina de techo rectangular calibre 26 de la empresa Metalco, que como se mencionó, es la única

lámina comercial de techo que cumple con la resistencia y rigidez establecidas por la metodología del AISI S310-13 en el país.

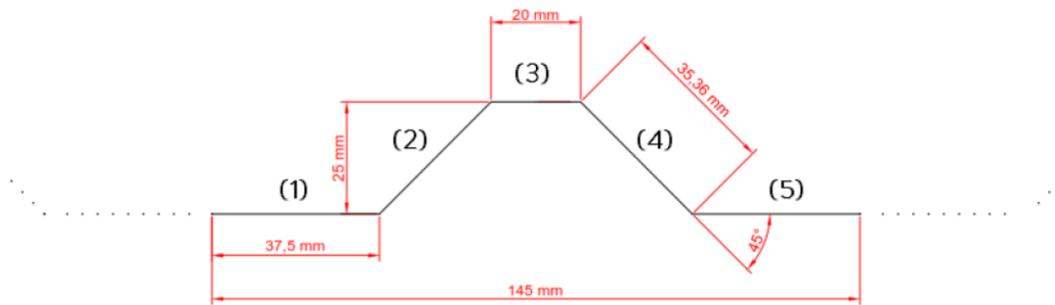


Figura 38. Geometría de la corrugación de una lámina rectangular

Fuente: Aguilar, 2015, p. 94

Esta modelación incluyó la geometría al milímetro de las láminas y la inclusión de las características mecánicas del material de constitución de estas. La modelación se realizó mediante la utilización de elementos área de tipo *Shell-Thin*.

Esta fue discretizada en el sentido transversal a un elemento por sección conformante de la corrugación y en el sentido longitudinal con una relación de 1/20 respecto a la longitud de luz cubierta por el diafragma, como ilustra la figura (39).

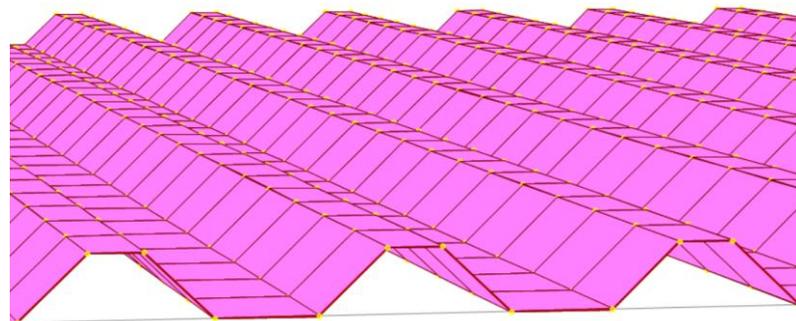


Figura 39. Lámina Rectangular modelada con el Método del Elemento Finito

Fuente: Elaboración propia, 2018

Estableciendo los puntos de contacto entre la lámina rectangular de calibre 26 y los largueros mediante nodos en los puntos e intersección de los elementos área con los elementos barra.

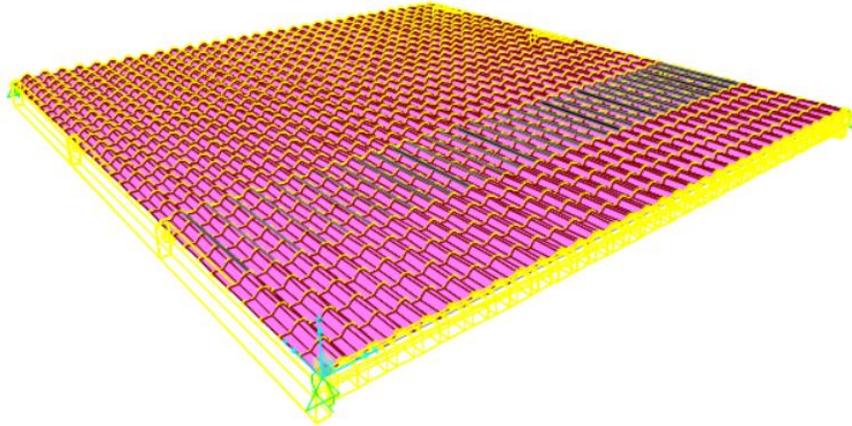


Figura 40. Diafragma de techo aislado

Fuente: Elaboración propia, 2018

Diafragma cuyas características de comportamiento fueron estudiadas en el experimento aislado ilustrado en la (figura 40) y paralelo a la investigación, ilustrando la relación Fuerza-Deformación dentro del rango elástico. Cabe mencionar, que el gráfico Fuerza-Deformación de la (figura 42) deja de tener un comportamiento lineal cuando el sistema alcanza su límite de fluencia, sin embargo, este no se ve reflejado en el gráfico debido a que como se había mencionado los análisis no lineales están fuera de las limitaciones del presente trabajo.

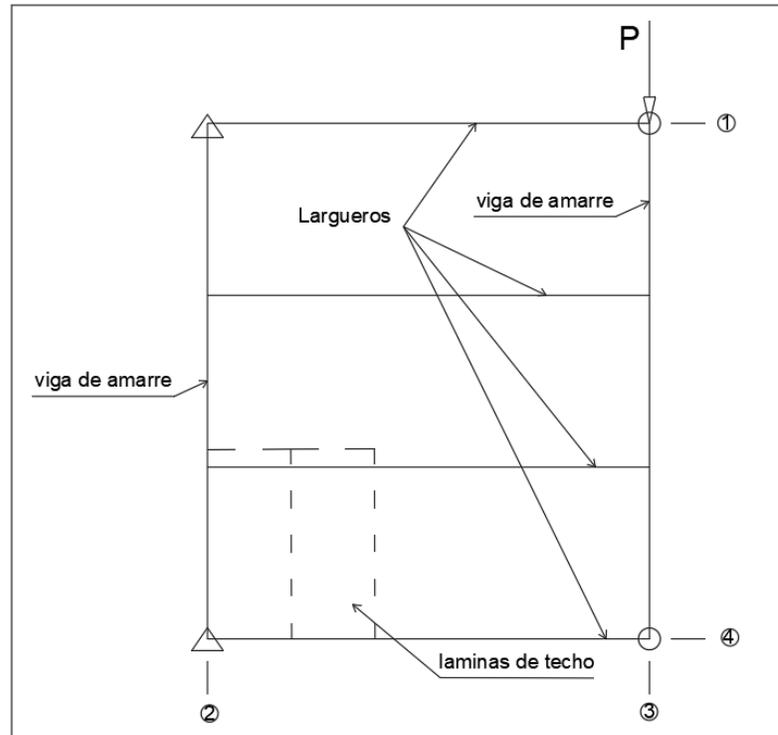


Figura 41. Experimento diafragma aislado

Fuente: Elaboración propia, 2018

El experimento fue basado en el experimento realizado por el American Iron and Steel Institute, en el libro AISI Cold formed Steel Design (2002) y adaptado al marco situacional de Costa Rica, modelando de un diafragma constituido por 4 largueros de sección C 7.5x5x1.5x0.237 de 3 metros de longitud a cada 1,17m de luz entre ellos, conectados por uniones articuladas, 2 vigas de amarre cuadradas a los costados de sección HSS2x2x0.237 con una longitud de 3.51 metros, la lámina de techo rectangular calibre 26 de la empresa Metalco modelada por el autor y 4 apoyos de los cuales 2 fueron simplemente apoyados y 2 articulados.

Para proceder a aplicarle cargas transversales puntuales y medir su respectiva deformación absoluta mediante la resultante de la deformación en cuatro ejes utilizando la ecuación No. (7) anteriormente expuesta.

Tabla 1. Fuerzas y Desplazamientos diafragma aislado

No.	P (Kgf)	$\Delta 1$ (cm)	$\Delta 2$ (cm)	$\Delta 3$ (cm)	$\Delta 4$ (cm)	Δ (cm)
1	231	0.0346	0.0030	1.1404	0.0339	0.1262
2	254	0.0381	0.0033	1.2539	0.0373	0.2386
3	306	0.0458	0.0039	1.5106	0.0450	0.4983
4	336	0.0503	0.0043	1.6587	0.0494	0.6456
5	377	0.0565	0.0049	1.8611	0.0554	0.8458
6	402	0.0602	0.0052	1.9845	0.0591	0.9701
7	432	0.0647	0.0056	2.1326	0.0635	1.1175
8	492	0.0737	0.0063	2.4288	0.0723	1.4126
9	552	0.0827	0.0071	2.7250	0.0811	1.7076
10	610	0.0914	0.0079	3.0114	0.0896	1.9929
11	732	0.1097	0.0094	3.6136	0.1076	2.5941

Fuente: Elaboración propia, 2018

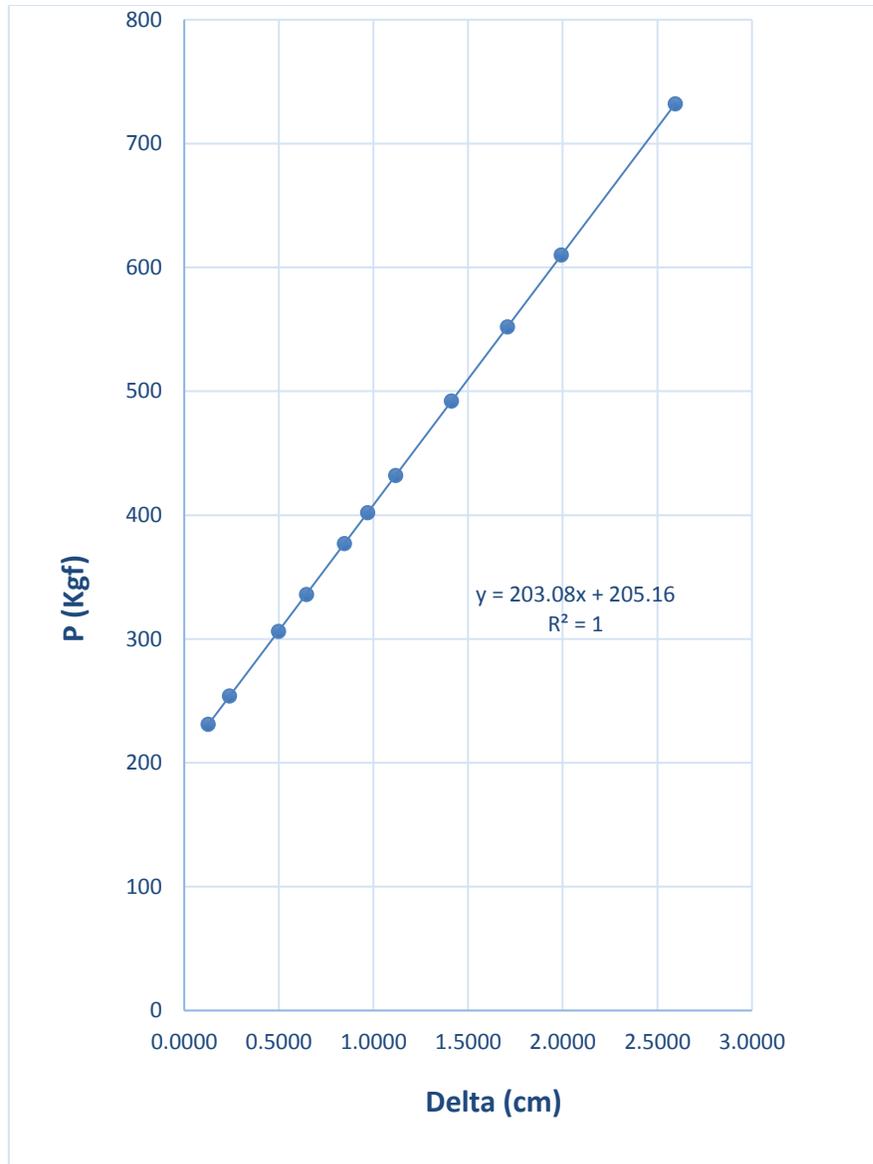


Figura 42. Comportamiento lineal P vs Delta

Fuente: Elaboración propia, 2018

La ley de Hooke, formulada por Robert Hooke en 1676 establece una relación lineal ante el esfuerzo y la deformación unitaria dentro de una región elástica, relación que se logró replicar con la modelación de este diafragma aislado, comprobando su capacidad de transmitir cortante y que el sistema tuviera un comportamiento que denotara una adecuada integración y conectividad de sus elementos.

Una vez modelado el diafragma de techo el presente trabajo utiliza como herramienta de experimentación el software SAP 2000 para acoplarle el diafragma de techo previamente modelado mediante el método del elemento finito, a las naves industriales que consideran el diafragma de techo en su diseño estructural (las naves D, E y F).

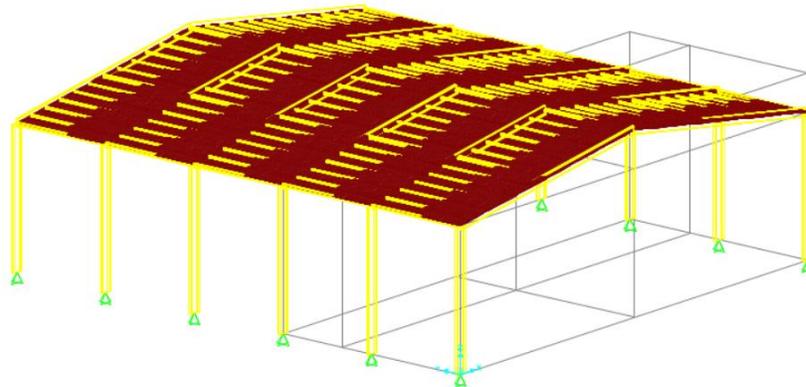


Figura 43. Nave industrial con diafragma de techo modelado con el método del elemento finito

Fuente: Elaboración propia, 2018

Con el sistema de los esqueletos estructurales ensamblados con los diafragmas flexibles dentro del software SAP 2000 se procede a realizar la asignación de las combinaciones de carga establecidas por el CSCR-10, y la asignación de la masa sísmica, la cual incluye la masa propia de los elementos estructurales, la masa asignada a las cargas electromecánicas y colaterales, que son añadidas a los largueros de techo en las naves que consideran el diafragma y a los marcos estructurales en las naves que no consideran el diafragma de techo en su diseño estructural.

Se le establece el coeficiente sísmico correspondiente para cada nave industrial estipulado por el CSCR-10 y se configura el análisis sísmico a realizar para obtener los datos de estudio, tanto de las naves que no consideraron el diafragma de techo en su diseño (A, B y C), como de las que sí lo hicieron (D, E y F).

4.2 Derivas y desplazamientos

Con la finalidad de denotar a la influencia que puede tener el diafragma de techo en los desplazamientos y derivas de las naves industriales, con la utilización de la herramienta del software SAP2000 estas fueron sometidas a las cargas sísmicas determinadas por el procedimiento anteriormente descrito y correspondiente a cada una de las naves industriales, sus características situacionales y estructurales, bajo las determinaciones del CSCR-10.

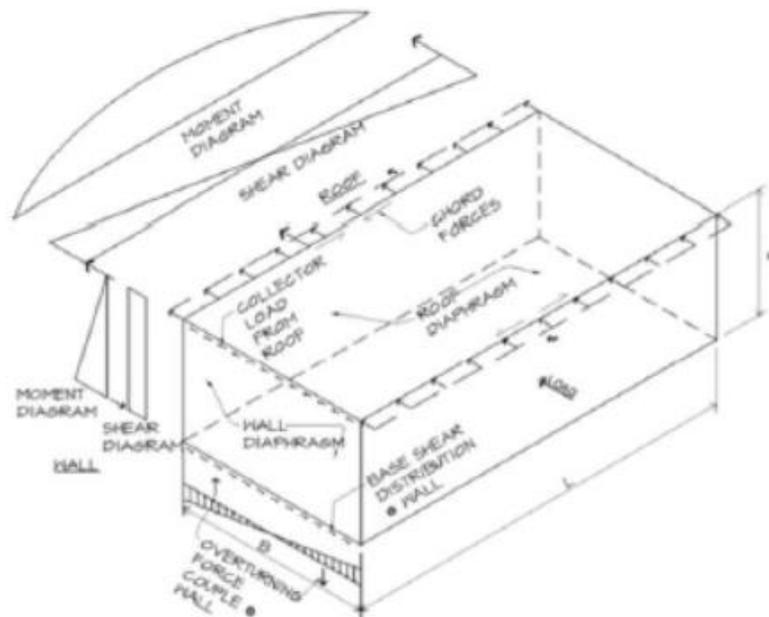


Figura 44. Diafragma sometido a cargas laterales

Fuente: ACIES, 2016, Cap3 p.48

El software nos brindó la información de la deformada causada por las fuerzas sísmicas aplicadas en cada una de las naves industriales, y nos brinda la posibilidad de ubicar los desplazamientos máximos de cada nave datos que se tabularon y procesaron mediante las ecuaciones anteriormente expuestas para determinar las derivas, y denotar si se está cumpliendo el criterio de diseño por rigidez establecido por el CSCR-10.



Figura 45. Desplazamiento Marco OMF debido a las Fuerzas Sísmicas en el Eje (x)

Fuente: Elaboración propia, 2018

Una vez que se logró que todas las naves y sus derivas cumplieran con el método de rigidez, como se puede apreciar en las tablas (2) y (3), se procedió a analizar los desplazamientos obtenidos para cada una de las naves Industriales.

El cálculo iterativo completo para la obtención de los desplazamientos elásticos, los desplazamientos inelásticos y las derivas de las 6 naves industriales pueden ser consultados en el Anexo A.

Tabla 2. Desplazamientos y derivas finales en el eje (X)

Nave Industrial	Desplazamiento elástico (cm)	Desplazamiento inelástico (cm)	Razon de Deriva inelastica
A	6.19	18.57	0.021
B	5.07	15.21	0.015
C	4.66	13.98	0.013
D	7.11	21.33	0.024
E	4.87	14.61	0.014
F	4.42	13.26	0.012

Fuente: Elaboración propia, 2018

Tabla 3. Desplazamientos y derivas finales en el eje (Y)

Nave Industrial	Desplazamiento elástico (cm)	Desplazamiento inelástico (cm)	Razon de Deriva inelastica
A	1.23	3.69	0.00
B	2.51	7.53	0.01
C	3.75	11.25	0.01
D	1.57	4.71	0.01
E	1.83	5.49	0.01
F	2.50	7.50	0.01

Fuente: Elaboración propia, 2018

Como se puede observar los diseños lograron obtener derivas menores a 0.03, que viene a ser el límite superior establecido por el CSCR-10 para sistemas estructurales de tipo marco industrial de un nivel, y se procedió a obtener la medida de desplazamientos de interés que permitan analizar la flexibilidad de las estructuras y su diafragma (figura 46).

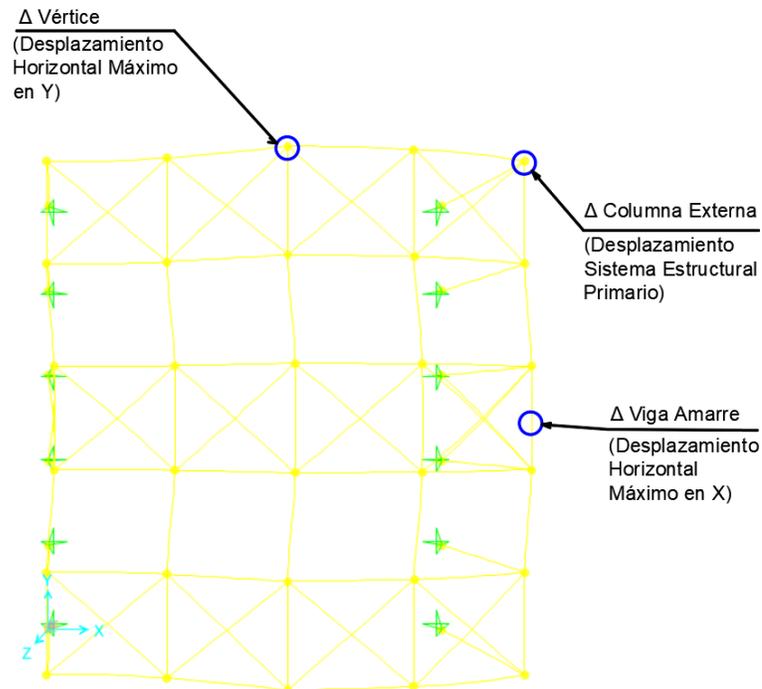


Figura 46. Desplazamientos de estudio

Fuente: Elaboración propia, 2018

Estos desplazamientos causados por las fuerzas sísmicas previamente establecidas, y obtenidos mediante su medición en el software SAP 2000, nos permitieron proceder a utilizar la ecuación (21) y la relación propuesta por el ASCE7-10 para determinar la relación de flexibilidad que va a determinar la naturaleza de los diafragmas respecto a su capacidad de flexión, clasificándolo como flexible cuando la deflexión del diafragma sea más de 2 veces el desplazamiento promedio de los elementos verticales.

Modelos que no consideraron el diafragma de techo en su diseño estructural:

Tabla 4. Desplazamientos Nave Industrial A

Dirección del Sismo	Desplazamiento Sistema Estructural Primario (cm)	Desplazamiento Horizontal Maximo (cm)	Deflexión Horizontal (cm)	Relación de flexibilidad
Sismo Eje (Y)	0.96	1.23	0.28	0.29
Sismo Eje (X)	5.04	6.19	1.15	0.23

Fuente: Elaboración propia, 2018

Tabla 5. Desplazamientos Nave Industrial B

Dirección del Sismo	Desplazamiento Sistema Estructural Primario (cm)	Desplazamiento Horizontal Maximo (cm)	Deflexión Horizontal (cm)	Relación de flexibilidad
Sismo Eje (Y)	1.02	2.51	1.49	1.46
Sismo Eje (X)	4.39	5.07	0.68	0.16

Fuente: Elaboración propia, 2018

Tabla 6. Desplazamientos Nave Industrial C

Dirección del Sismo	Desplazamiento Sistema Estructural Primario (cm)	Desplazamiento Horizontal Maximo (cm)	Deflexión Horizontal (cm)	Relación de flexibilidad
Sismo Eje (Y)	0.91	3.75	2.84	3.12
Sismo Eje (X)	3.77	4.66	0.89	0.24

Fuente: Elaboración propia, 2018

Modelos que consideraron el diafragma de techo en su diseño estructural:

Tabla 7. Desplazamientos Nave Industrial D

Dirección del Sismo	Desplazamiento Sistema Estructural Primario (cm)	Desplazamiento Horizontal Maximo (cm)	Deflexión Horizontal (cm)	Relación de flexibilidad
Sismo Eje (Y)	1.27	1.57	0.30	0.24
Sismo Eje (X)	7.02	7.11	0.09	0.01

Fuente: Elaboración propia, 2018

Tabla 8. Desplazamientos Nave Industrial E

Dirección del Sismo	Desplazamiento Sistema Estructural Primario (cm)	Desplazamiento Horizontal Maximo (cm)	Deflexión Horizontal (cm)	Relación de flexibilidad
Sismo Eje (Y)	1.63	1.83	0.20	0.12
Sismo Eje (X)	4.86	4.87	0.01	0.00

Fuente: Elaboración propia, 2018

Tabla 9. Desplazamientos Nave Industrial F

Dirección del Sismo	Desplazamiento Sistema Estructural Primario (cm)	Desplazamiento Horizontal Maximo (cm)	Deflexión Horizontal (cm)	Relación de flexibilidad
Sismo Eje (Y)	1.97	2.5	0.53	0.27
Sismo Eje (X)	4.42	4.49	0.07	0.02

Fuente: Elaboración propia, 2018

Como se mencionó, las naves industriales A, B, y C no incorporan el diafragma de techo en su diseño, a diferencia de las naves D, E y F, por lo que la relación de deflexión fue utilizada como parámetro de comparación de los desplazamientos Horizontales máximos con los de sus sistemas estructurales primarios, mas cabe aclarar que la relación de rigidez o no de diafragma establecida por (ASCE7-10, p.81) solo tiene lugar en las naves que consideraron el diafragma de techo en su diseño estructural.

Con los resultados de estos 6 diseños estructurales se nota que la nave industrial que obtuvo la mayor relación de flexibilidad fue la de mayor luz, la cual no consideró el diafragma de techo. Esta presentó una diferencia entre el desplazamiento de sus elementos verticales y su desplazamiento máximo en el eje (Y), lo cual denota que la nave posee una rigidez baja en ese sentido respecto a su sistema estructural primario. De esta manera, permite desplazamientos grandes respecto a su homóloga en tamaño (Nave industrial F), la cual al sí considerar el diafragma de techo en su diseño no permitió desplazamientos grandes respecto con los desplazamientos de sus elementos estructurales primarios.

En las tres naves industriales que si consideraron el diafragma de techo se demostró que los desplazamientos máximos que pudo medir el software SAP2000 respecto a los desplazamientos de sus elementos verticales fueron insignificantes,

y que todos pueden ser clasificados como diafragmas rígidos según el criterio de rigidez empleado en este trabajo.

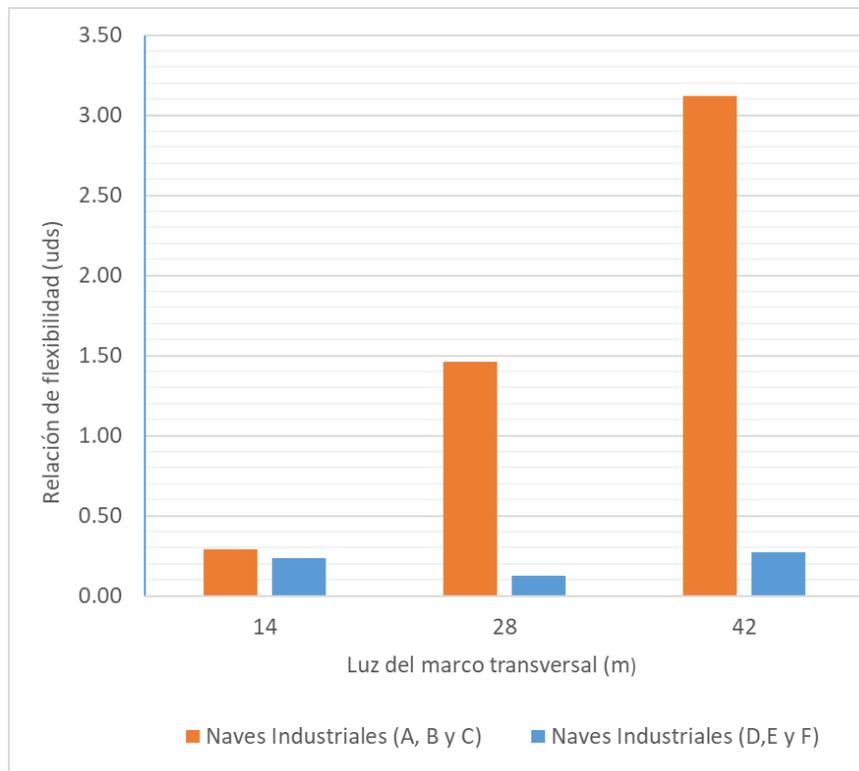


Figura 47. Relación de flexibilidad eje (Y)

Fuente: Elaboración propia, 2018

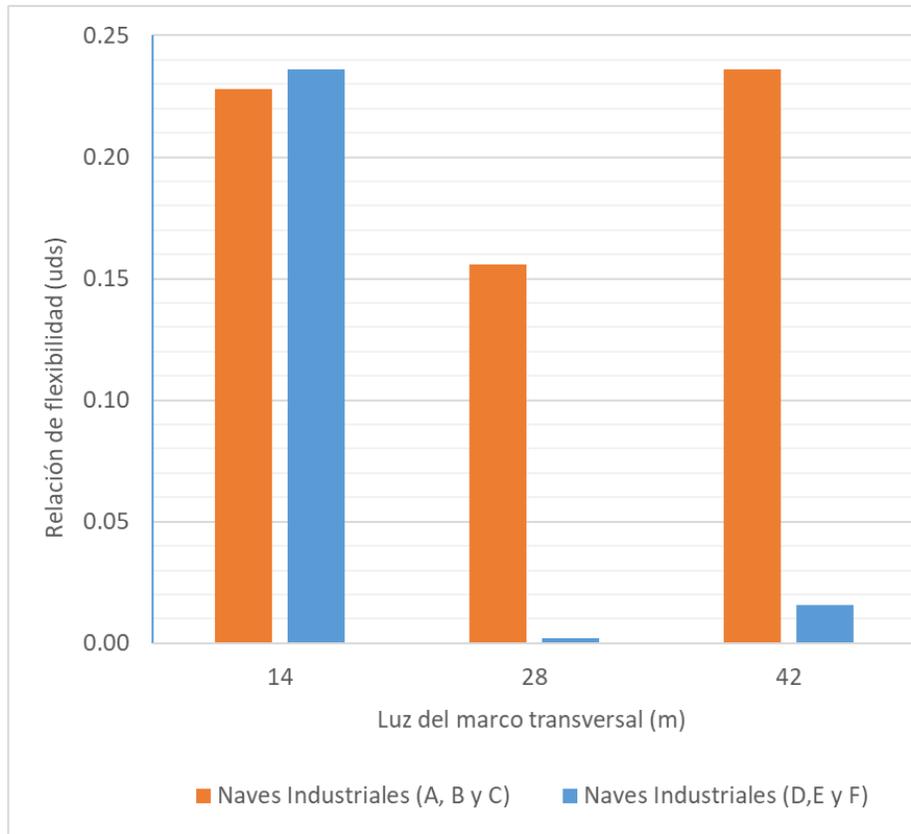


Figura 48. Relación de flexibilidad Eje (X)

Fuente: Elaboración propia, 2018

Como análisis general de todas las naves industriales se puede observar como las naves que consideraron el diafragma de techo en sus diseños estructurales obtuvieron desplazamientos relativos menores en ambos sentidos respecto a sus naves homologas que dejaron de considerar el diafragma de techo en su diseño, denotando este aporte específico de rigidez que brinda el diafragma a las estructuras al ser sometidas a cargas sísmicas.

4.3 Periodos

De acuerdo con el marco referencial de diseño sismorresistente del CSCR-10, el periodo tiene influencia en la determinación del coeficiente sísmico, quien a su vez tiene influencia en las fuerzas sísmicas, por lo que se procedió a realizar el cálculo de este en los dos ejes de cada una de las 6 naves industriales.

En el análisis realizado mediante el software SAP 2000 para estimación del periodo calcula todos los modos de oscilación posibles de la estructura, pero como mencionamos anteriormente, pero solo recopilamos los necesarios para alcanzar el 90% de la participación de masa y centramos nuestro análisis en los periodos de que incorporen el mayor porcentaje de masa en cada dirección.

La salida del software del resto de los modos de oscilación de cada una de las naves puede ser consultada en el (Anexo B).

Tabla 10. Periodos de oscilación

Luz Marco				
Nave Industrial	Transversal (m)	Eje	Periodo CSCR- 10 (s)	Periodo SAP2000 (s)
A	14	X	1.48	1.46
		Y	0.39	0.32
B	28	X	1.20	1.20
		Y	0.59	0.34
C	42	X	1.11	1.07
		Y	0.89	0.39
D	14	X	1.63	1.62
		Y	0.45	0.43
E	28	X	1.17	1.22
		Y	0.48	0.44
F	42	X	1.05	1.10
		Y	0.59	0.51

Fuente: Elaboración propia, 2018

En la tabla (10) se tabulan dichos periodos y se comparan con los periodos resultantes del cálculo mediante el método sugerido por el CSCR-10, con lo que se logró observar que ambos métodos tuvieron un rango de diferencia muy bajo.

De los 12 periodos calculados mediante el software SAP 2000 se logró evidenciar que en 6 de 6 relaciones las naves industriales que consideraron el diafragma de techo en su diseño sísmico aumentaron sus periodos naturales en ambos ejes, lo cual se ve ilustrado en las figuras (49) y (50), y denota una variación considerable en estos.

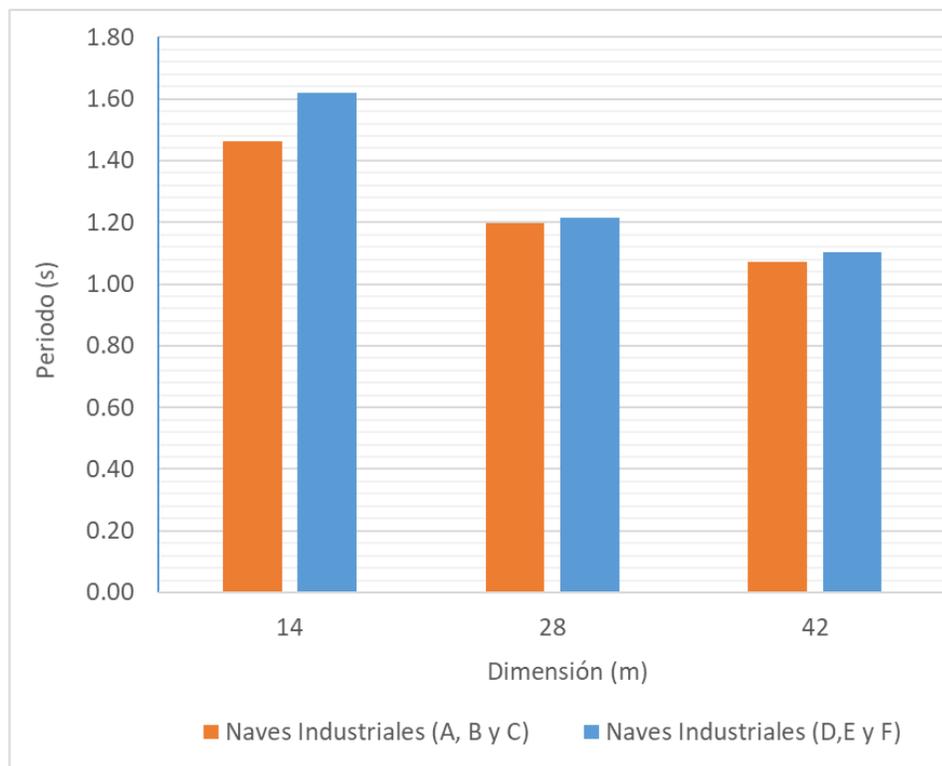


Figura 49. Periodos Eje (X)

Fuente: Elaboración propia, 2018

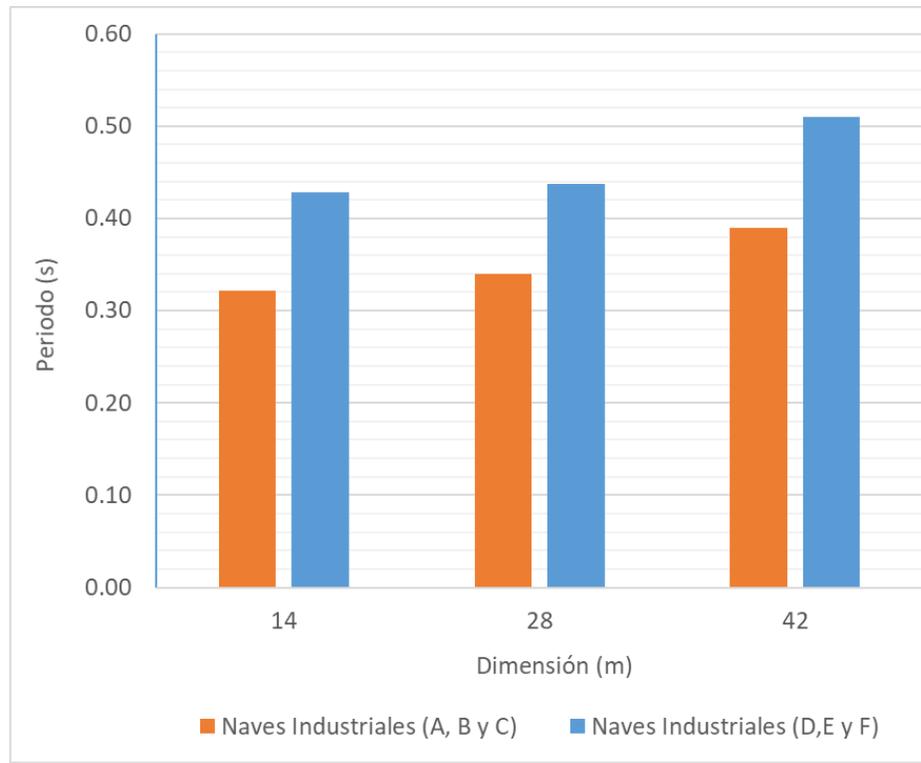


Figura 50. Periodos Eje (Y)

Fuente: Elaboración propia, 2018

Con lo que se evidenció que al incluir el diafragma de techo en el diseño se obtendrán periodos más altos que le permitan al ingeniero estructural utilizar fuerzas sísmicas de diseño menores, y con esto reducir la demanda sísmica en su estructura.

4.4 Peso de las naves industriales

Una vez concluido el diseño por rigidez y por capacidad en las 6 naves industriales se procedió a recopilar las secciones utilizadas por el autor en el diseño estructural de las naves industriales, y a realizar el cálculo del peso de cada una de las estructuras.

Las tablas de esta sección buscan tabular el peso total real de cada una de las naves industriales, por lo que se muestran las secciones finales de diseño de cada nave industrial, y cabe mencionar que independientemente de si el ingeniero incluyo el diafragma de techo en sus cálculos estructurales o no, el peso de este no deja de existir, por lo que es tomado en cuenta en todas las naves industriales.

Tabla 11. Peso Nave Industrial A

Elemento	Sección	Área transversal (cm ²)	Longitud (cm)	Volumen (cm ³)	Cantidad (uds)	Peso (Tonf)
Columnas OMF	W16X31	58.9	800	47122.5	12	4.4
Vigas OMF	W12X22	41.8	708	29598.9	12	2.8
Viga Alero	HSS2X2X250	9.7	600	5844.0	10	0.5
Viga Cumbreira	HSS3X2-1/2X250	14.3	600	8554.8	5	0.3
Riostra Vertical	No.7	3.9	1000	3870.0	4	0.1
Riostra Horizontal	No.6	2.8	928	2635.6	12	0.2
Largueros	C15X5X1.5	6.1	600	3660.0	50	1.4
Lamnina de Techo	Rectangular Calibre 26	-	-	-	118	1.9
Total						11.8

Fuente: Elaboración propia, 2018

Tabla 12. Peso Nave Industrial D

Elemento	Sección	Área transversal (cm ²)	Longitud (cm)	Volumen (cm ³)	Cantidad (uds)	Peso (Tonf)
Columnas OMF	W14x30	57.1	800	45677.3	12	4.3
Vigas OMF	W12x22	41.8	708	29598.9	12	2.8
Viga Alero	HSS3X2X188	9.9	600	5961.3	10	0.5
Viga Cumbreira	HSS2X2X188	5.5	600	3270.0	5	0.1
Riostra Vertical	No.7	3.9	1000	3870.0	4	0.1
Riostra Horizontal	-	0	0	0	0	0.0
Largueros	C15X5X1.5	6.1	600	3660.0	50	1.4
Lamnina de Techo	Rectangular Calibre 26	-	-	-	118	1.9
Total						11.2

Fuente: Elaboración propia, 2018

Tabla 13. Peso Nave Industrial B

Elemento	Sección	Área transversal (cm ²)	Longitud (cm)	Volumen (cm ³)	Cantidad (uds)	Peso (Tonf)
Columnas OMF	W24X68	129.7	800	103741.7	12	9.8
Vigas OMF	W18X55	104.5	1416	147994.5	12	13.9
Viga Alero	HSS4X3X375	26.4	600	15832.2	10	1.2
Viga Intermedia	HSS4X3X375	26.4	600	15832.2	10	1.2
Viga Cumbreira	HSS4X3X313	22.7	600	13625.8	5	0.5
Riostra Vertical	No.10	8.2	1000	8190.0	4	0.3
Riostra Horizontal	No.8	5.1	928	4733.0	24	0.9
Largueros	C15X5X1.5	6.1	600	3660.0	110	3.2
Lamnina de Techo	Rectangular Calibre 26	-	-	-	426	7.0
Total						38.0

Fuente: Elaboración propia, 2018

Tabla 14. Peso Nave Industrial E

Elemento	Sección	Área transversal (cm ²)	Longitud (cm)	Volumen (cm ³)	Cantidad (uds)	Peso (Tonf)
Columnas OMF	W24X62	118.1	800	94451.4	12	8.9
Vigas OMF	W18X46	87.1	1416	123328.8	12	11.6
Viga Alero	HSS4X2X188	12.2	600	7316.1	10	0.6
Viga Intermedia	HSS4X2X188	12.2	600	7316.1	10	0.6
Viga Cumbre	HSS4X3X375	26.4	600	15832.2	5	0.6
Riostra Vertical	No.8	5.1	1000	5100.0	4	0.2
Riostra Horizontal	-	0	0	0	0	0
Largueros	C15X5X1.5	6.1	600	3660.0	110	3.2
Lamnina de Techo	Rectangular Calibre 26	-	-	-	426	7.0
Total						32.6

Fuente: Elaboración propia, 2018

Tabla 15. Peso Nave Industrial C

Elemento	Sección	Área transversal (cm ²)	Longitud (cm)	Volumen (cm ³)	Cantidad (uds)	Peso (Tonf)
Columnas OMF	W24X84	155.5	800	124386.8	12	11.7
Vigas OMF	W24X76	144.5	2123	306807.1	12	28.9
Viga Alero	HSS4X4x125	11.4	600	6846.0	10	0.5
Viga Intermedia	HSS4X4x126	11.4	600	6846.0	10	0.5
Viga Cumbre	HSS4X3X250	18.8	600	11264.5	5	0.4
Riostra Vertical	No.10	8.2	1000	8190.0	4	0.3
Riostra Horizontal	No.10	8.2	1219	9986.4	24	1.9
Largueros	C15X5X1.5	6.1	600	3660.0	160	4.6
Lamnina de Techo	Rectangular Calibre 26	-	-	-	994	16.2
Total						65.1

Fuente: Elaboración propia, 2018

Tabla 16. Peso Nave Industrial F

Elemento	Sección	Área transversal (cm ²)	Longitud (cm)	Volumen (cm ³)	Cantidad (uds)	Peso (Tonf)
Columnas OMF	W24X76	144.5	800	115612.7	12	10.9
Vigas OMF	W24X68	129.7	2123	275304.6	12	25.9
Viga Alero	HSS4X4X188	16.6	600	9960.0	10	0.8
Viga Intermedia	HSS4X4X188	16.6	600	9960.0	10	0.8
Viga Cumbreira	HSS4X4X375	19.9	600	11922.6	5	0.5
Riostra Vertical	No.8	5.1	1000	5100.0	4	0.2
Riostra Horizontal	-	0	0	0	0	0.0
Largueros	C15X5X1.5	6.1	600	3660.0	160	4.6
Lamnina de Techo	Rectangular Calibre 26	-	-	-	994	16.2
Total						59.8

Fuente: Elaboración propia, 2018

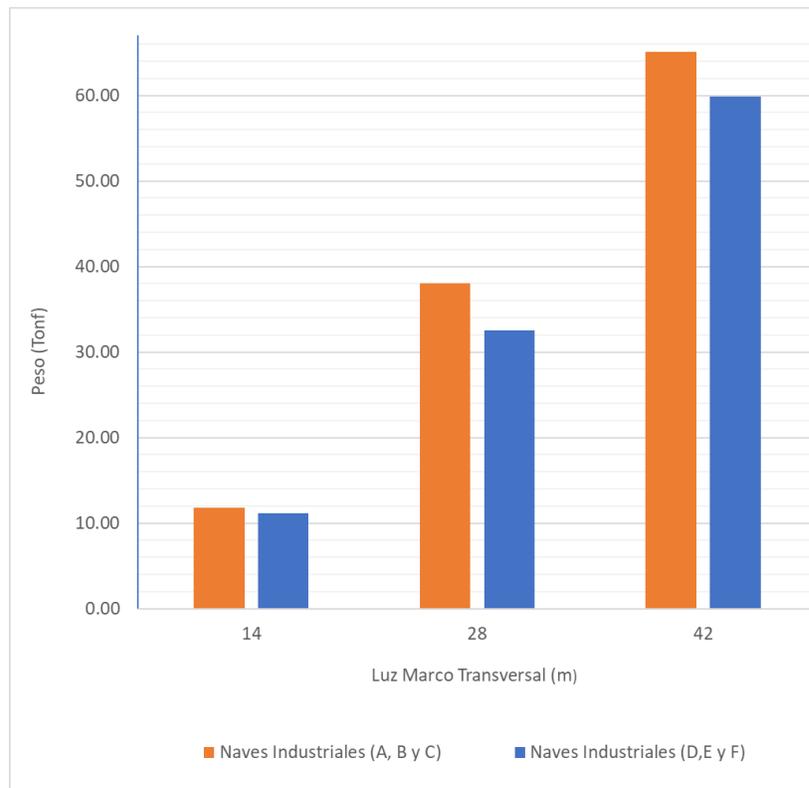


Figura 51. Peso de las Naves Industriales

Fuente: Elaboración propia, 2018

La tabulación del peso de todos los elementos de cada nave industrial nos permitió estudiar la influencia de incluir el diafragma de techo en el diseño estructural en el peso por metro cuadrado de las estructuras.

En la figura (51) se recopila la información de las tablas (11) a la tabla (16), y logra denotar la constante de que todas las naves industriales que consideraron el diafragma de techo en su diseño estructural lograron reducir su peso.

Con las secciones estructurales de las naves industriales y sus pesos tabulados se procede a realizar la medición de los momentos últimos de diseño en los codos de los marcos estructurales, con el fin de utilizar este dato como indicador de que tan esforzada esta la estructura y parámetro correlacional que permita determinar si el ahorro en el peso por unidad de área de las naves se dio en los marcos estructurales o en las riostras y vigas de amarre.

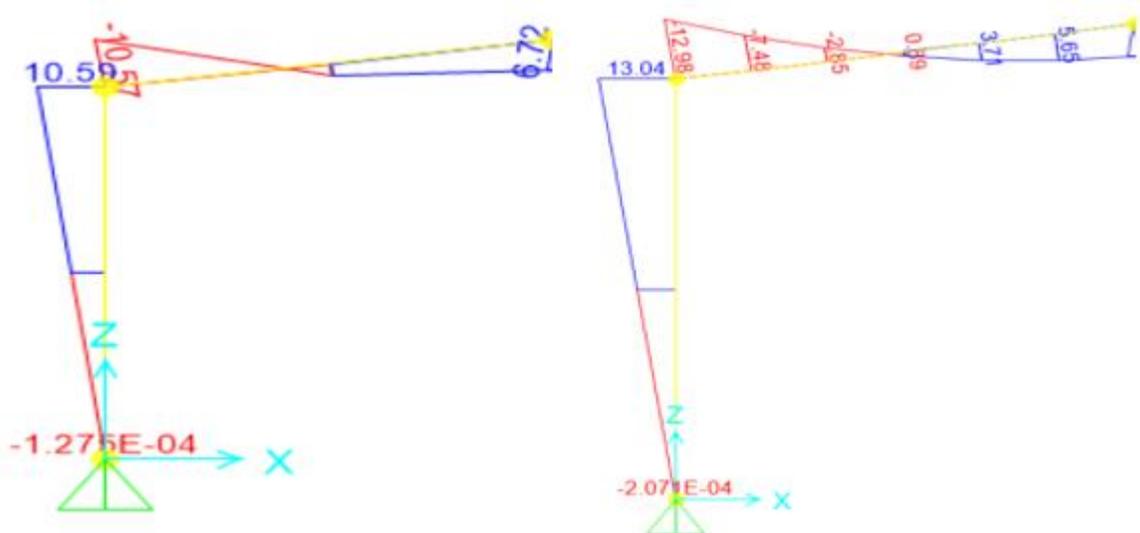


Figura 52. MU Naves Industriales A y D respectivamente

Fuente: Elaboración propia, 2018

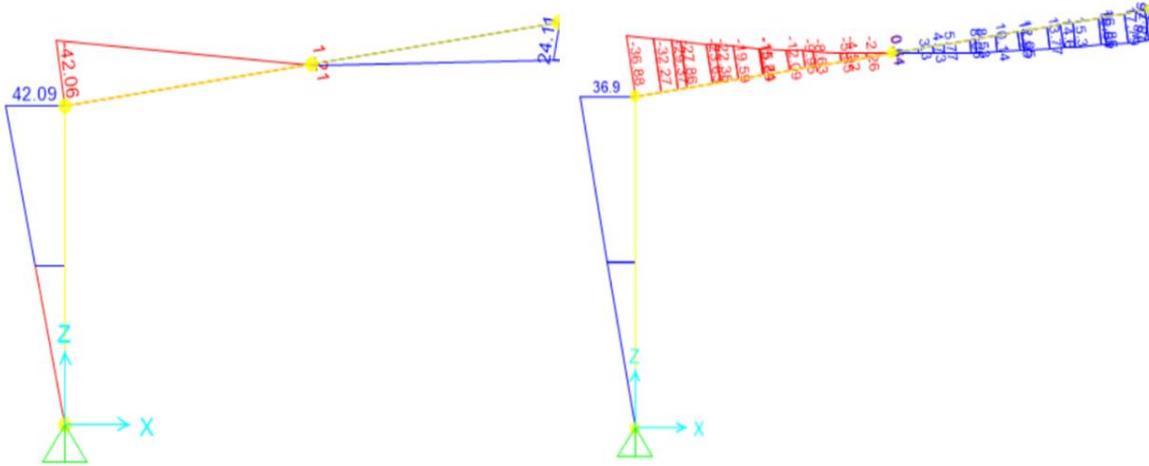


Figura 53. MU Naves Industriales B y E respectivamente

Fuente: Elaboración propia, 2018

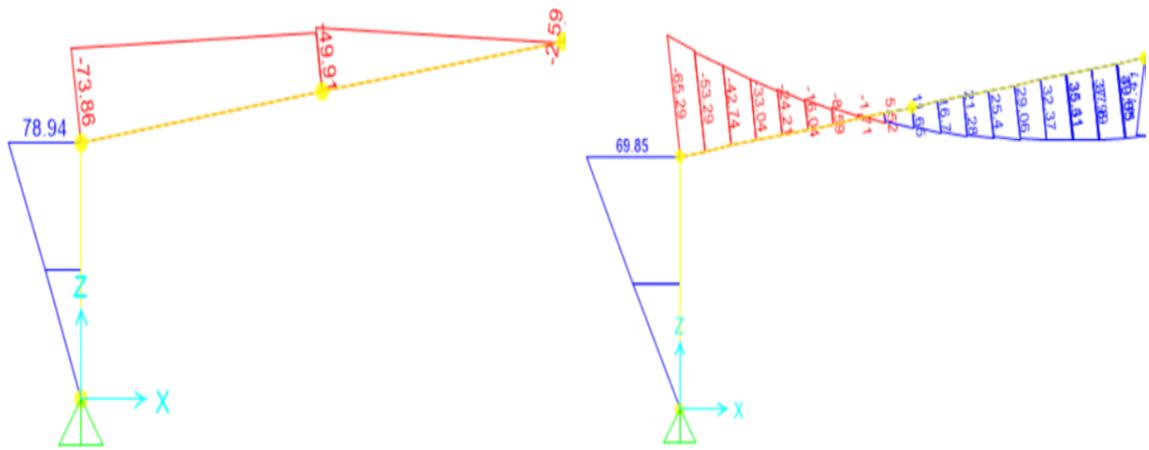


Figura 54. MU Naves Industriales C y F respectivamente

Fuente: Elaboración propia, 2018

Tabla 17. Momentos Últimos de Diseño

Nave Industrial	Luz Marco	
	Transversal (m)	Mu (Tonf m)
A	14	10.59
B	28	42.09
C	42	78.94
D	14	13.04
E	28	36.9
F	42	69.85

Fuente: Elaboración propia, 2018

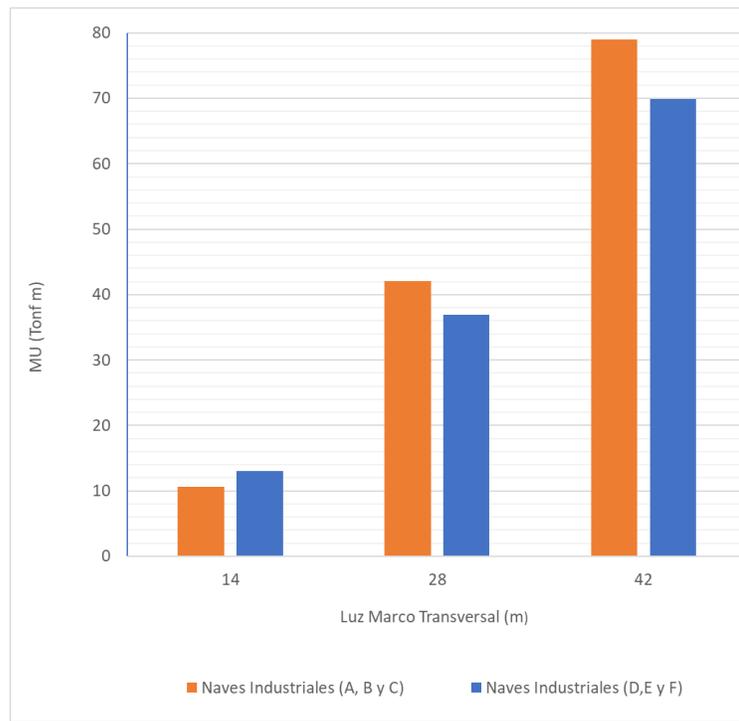


Figura 55. MU Naves Industriales

Fuente: Elaboración propia, 2018

La tabla (17) recopila la información de los momentos últimos de diseño de las 6 naves industriales, ilustrados en las Figuras (52, 53 y 54), y esta denota como en las naves industriales de 14 metros de luz el ahorro estuvo en las vigas de amarre y riostras, mientras que, en las naves industriales de 28 y 42 metros de luz, se puede observar como hubo un ahorro importante en las secciones de los marcos estructurales, sumado al ahorro que se da en vigas de amarre y riostras.

Resultados que concuerdan con Aguilar (2015), quien afirma que el ahorro se da en las secciones de los elementos de techo y riostras para la nave de 14 metros de luz y en las naves de 28 y 42 metros de luz el ahorro se da tanto en los elementos de techo y riostras como en los marcos estructurales.

4.5 Porcentajes de ahorro en el peso de las estructuras por unidad de área

En la tabla (18) se muestra el área, el peso, y el peso por unidad de área final de diseño para cada una de las naves industriales, permitiéndonos utilizar este último dato como parámetro correlacional.

Tabla 18. Peso por metro cuadrado de las naves industriales

Nave Industrial	Luz Marco Transversal (m)	Peso (Tonf)	(Kgf/m ²)
A	14	11.76	28.00
B	28	37.99	25.13
C	42	65.09	18.45
D	14	11.18	26.61
E	28	32.56	21.53
F	42	59.83	16.96

Fuente: Elaboración propia, 2018

Analizando las naves industriales de 420 m^2 los resultados muestran que la nave industrial (A) tiene un peso total de 11.76 (tonf) y la nave industrial (D) un peso total de 11.18(tonf). Datos con lo que se obtuvo un peso por metro cuadrado de 28.00 (Kgf/m^2) y 26.61 (Kgf/m^2) respectivamente, que corresponden a un ahorro de un 4.95% del peso total de la estructura de acero al considerar el diafragma de techo en el diseño estructural.

Analizando las naves industriales de 1512 m^2 los resultados muestran que la nave industrial (B) tiene un peso total de 37.99 (tonf) y la nave industrial (E) un peso total de 32.56 (tonf). Datos con lo que obtuvimos un peso por metro cuadrado de 25.13 (Kgf/m^2) y 21.53 (Kgf/m^2) respectivamente, que corresponden a un ahorro de un 14.31% del peso total de la estructura de acero al considerar el diafragma de techo en el diseño estructural.

Analizando las naves industriales de 3528 m^2 los resultados muestran que la nave industrial (C) tiene un peso total de 65.09 (tonf) y la nave industrial (F) un peso total de 59.83 (tonf). Datos con lo que se obtuvo un peso por metro cuadrado de 18.45 (Kgf/m^2) y 16.96 (Kgf/m^2) respectivamente, que corresponden a un ahorro de un 8.08% del peso total de la estructura de acero.

Se procede a comparar los porcentajes de ahorro obtenidos en el presente trabajo mediante el método del elemento finito con los obtenidos en la tesis para obtener el grado de licenciatura del Ing. Alonso Aguilar, quien utilizo el método de la cercha.

Tabla 19. Comparación de los porcentajes de ahorro en (Kgf/m^2)

Naves Industriales	Luz Marco Transversal (m)	Datos del autor (%)	Datos Ing. Alonso Aguilar (%)
A y D	14	4.95	9.33
B y E	28	14.31	8.44
C y F	42	8.08	9.41

Fuente: Aguilar, 2015, sección 7.4 y elaboración propia, 2018

Según la tabla (19) se puede observar como mediante ambos métodos la constante es un ahorro significativo respecto al peso por unidad de área en los diseños de las naves industriales, al haber considerado el diafragma de techo dentro del diseño estructural sismo resistente de las estructuras, respecto a las naves industriales que no lo hicieron.

La diferencia porcentual entre un trabajo y otro radica en el método utilizado, ya que el autor modeló el diafragma flexible mediante el método del elemento finito y Aguilar (2015) empleó el método de la cercha, en el que utilizó riostras que emulen la rigidez del diafragma. Además, cabe mencionar, que el autor utilizó secciones de molino en sus diseños, mientras que Aguilar (2015) utilizó secciones armadas.

Sin embargo, ambos trabajos registraron un ahorro en el peso por unidad de área positivo en las 3 comparaciones que realizaron respectivamente en cada trabajo, afianzando mediante dos metodologías de incorporación del diafragma de techo al diseño estructural, la constante de un ahorro de peso por unidad de área en las naves industriales que contaron con la inclusión del diafragma de techo en su diseño.

5. CONCLUSIONES

Se logró realizar un modelo de los diafragmas de techo como elementos finitos, comprobando que es posible replicar una lámina estructural con todas sus características geométricas y mecánicas, y conectándola a un sistema de largueros utilizando el software SAP 2000.

Se demostró que este modelo realizado mediante el método del elemento finito obtuvo un comportamiento mecánico correcto al ser sometido a cargas axiales, que obedecía a la relación lineal esfuerzo deformación dentro del rango elástico de sus materiales y que el modelo poseía una rigidez a cortante.

Se logró incluir el diafragma de techo previamente modelado en el diseño estructural de 3 naves industriales mediante el programa SAP 2000 para su posterior análisis sísmico.

Se concluyó que los diafragmas de techo en sus dos ejes axiales se comportan como diafragmas rígidos según el criterio sugerido por el ASCE, al comprobar que la flexión de los elementos es despreciable respecto a los desplazamientos de sus elementos verticales.

Con lo que se determina que cuando se describa la función del diafragma de techo de transmitir fuerzas axiales se debe considerar que la distribución de fuerzas va a ser efectuada en proporción de la rigidez relativa de los elementos verticales y no mediante áreas tributarias, esto debido a la rigidez axial que se demostró caracteriza al diafragma de techo.

Se observó que los periodos de oscilación calculados mediante la metodología propuesta por el CSCR-10, fueron muy similares a los periodos calculados mediante el método modal empleado por el software SAP 2000.

Se demostró que al considerar el diafragma de techo en el diseño estructural de las naves industriales el periodo calculado se ve aumentado, con lo que las fuerzas sísmicas de diseño van a disminuir, y se va a diseñar para una demanda estructural menor.

Se determinó que el peso de los elementos estructurales empleados para cumplir con las metodologías de diseño sísmico de las naves industriales que consideraron el diafragma de techo en su diseño son más livianos que los de las naves industriales que no lo incluyeron en su diseño.

Se denotó que las naves industriales con un área de 420 m^2 al incluir el diafragma de techo en su diseño pasaron de un peso de 11.76 (tonf) a 11.18 (tonf), las naves industriales con un área de 1512 m^2 al incluir el diafragma de techo en su diseño pasaron a un peso de 37.99 (tonf) a 32.56 (tonf) y que las naves industriales con

un área de 3528 m^2 al incluir el diafragma de techo en su diseño pasaron a un peso de 65.09 (tonf) a 59.83 (tonf).

Se observó que tanto en los datos del autor como en los de Aguilar (2015) se denotó que el ahorro en las naves industriales de 14 metros de luz recayó principalmente en las vigas de amarre y riostras, mientras que para las naves de 28 y 42 metros de luz el ahorro de las secciones fue tanto para las riostras y elementos de techo como para las secciones de los marcos estructurales.

Se compararon los porcentajes de ahorro en el peso por unidad de área para 3 modelos de nave industrial obtenidos mediante el método del elemento finito empleado en el presente trabajo con los porcentajes obtenidos por el Ing. Alonso Aguilar en el 2015 mediante el método de la cercha.

De este modo, se demuestra que los porcentajes de ahorro en el peso por unidad de área para todos los modelos fueron positivos e importantes. Con lo que se concluye que si bien es cierto que el diseño y modelación del diafragma de techo en el marco situacional de Costa Rica es un cálculo extenso el ahorro en el peso por unidad de área que se puede obtener es significativo, y con ello también el ahorro monetario en la compra de acero dentro de los proyectos de diseño y construcción de naves industriales.

6. RECOMENDACIONES

Se debe de ahondar en el estudio de la inferencia de cada una de las variables que denotan la capacidad a cortante y rigidez de los diafragmas de techo, entre las que se pueden encontrar el área transversal de los largueros, el espesor de la lámina estructural, la luz entre largueros, la geometría de la lámina estructural, el tipo de larguero, el tipo de conexión entre otras.

Se debe estudiar un método de simplificación del cálculo de la rigidez del diafragma de techo que facilite su incorporación en el diseño y que sirva para la fabricación de tablas técnicas para el diseño de diafragmas de techo existentes actualmente en el ámbito internacional.

Se debe realizar un análisis no lineal del diafragma de techo, que permita denotar deformaciones inelásticas en sus miembros y estudiar la utilización de la lámina de techo como elemento disipador de energía.

Se deben continuar con el estudio del comportamiento mecánico de los diafragmas de techo mediante diversos métodos que permitan convergen en artículos técnicos que puedan establecer simplificaciones del cálculo de las características mecánicas de los diafragmas, para una posterior inclusión de estos en el Código Sísmico de Costa Rica.

BIBLIOGRAFÍA

- ACIES. (2016). *Diseño y detallado Estructural de Naves Industriales Metálicas*. (1er ed.) Costa Rica, Asociación costarricense de ingeniería estructural y sísmica.
- ASCE7-10. (2010). *Minimum Design Loads for Buildings and other Structures*. (1er ed.) Reston, Virginia, American Society of Civil Engineers.
- Aguilar, A. (2015). *Influencia del diafragma de techo en el peso por metro cuadrado de las estructuras tipo nave industrial*. Universidad Latina de Costa Rica.
- Álvarez, R. (2014). *Introducción al método de los elementos finitos*. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- American Institute of Steel Construction. (2011). *Manual de la AISC*.(14 ed.) Estados Unidos de America. AISC.
- American Iron and Steel Institute. (2002). *Specifications for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*. (2002 edition) Missouri, Missouri University of Science and Technology.
- Bakhti, Tremblay y Rogers. (2012). *Revisiting the SDI and ECCS methods for in plane shear flexibility of metal roof deck diaphragms using 3D non-linear finite element analysis*. (1er ed.) Lisboa, Portugal, World conference on earthquake Engineering.
- Beer, Johnston, Cornwell. (2010). *Mecánica Vectorial para Ingenieros*. Dinámica. (9na ed.). México D.F., Mc Graw Hill.
- Colin A. Rogers, Patrick Pautre, Jean Proulx, Carlos E. Ventura, Robert Tremblay, Charle Philippe Lamarche, Martin Turek .(2004). *Experimental Investigation and Dynamic Simulations of Low Rise Steel Buildings for Efficient Seismic Design*. (1er ed.) Vancouver, World Conference on Earthquake Engineering.
- C.A.Rogers, R Tremblay, W Yang, E Martin. (2004). *Ductile Design of Steel Deck Diaphragms for Earthquake Resistance*. (1era ed ed.) Vancouver, World Conference on Earthquake Engineering.
- CFIA. (2010). *Código Sísmico Costarricense*. Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Dassault Systemes.(2007). *Abaqus: Getting Started with Abaqus*.(1er ed). EEUU, Dassault Systemes.
- Dubina, D. Ungureanu, V. Landolfo, Raffaele. (2011). *Design of cold-formed steel structures: Eurocode 3: part 1-3*. DOI:10.1002/9783433602256.ch8.

- ESSS. (2019). *Método de los elementos finitos*. Recuperado de <https://www.esss.co/blog/es>
- Hong, J.-K. (2007). *Development of a seismic design procedure for metal building systems*. (1er ed.). Universidad de California, San Diego.
- Larry D. Luttrell. (2004). *Steel deck institute diaphragm desing manual*. (3er ed.). Missouri, Missouri University of Science and Technology.
- Luttrell, L. D. (1967). *Strength and Behavior of Light Gage Steel Shear Diaphragms Department of Structural Engineering*. (1er ed.). Cornell, Cornell University.
- McCormac, J. C., S. (2013). *Diseño de estructuras de acero*. (13 ed.). México, D.F.: Alfaomega Grupo Editor.
- Medhekar, M. (1999). *Seismic evaluation of single storey steel buildings*. (1er ed.) Canada, Canadian Journal of Civil Engineering.
- Metalco. (2019). *lamina-rectangular*. Recuperado de <http://www.metalco.net/productos/>
- Newman A. (2003). *Metal building desing and specifications*. (2ª ed.) Estados Unidos de America The McGraw-Hill Companies.
- Popov, E. P. (2000). *Mecánica de Sólidos*. (2ª ed.). México: Pearson.
- Álvarez, R. (2014). *Introducción al método de los elementos finitos*. (1er ed.) Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid.
- Rao. (2004). *The Finite Elemento Method in Enginneering* .(4ta ed,). EEUU, Elsevier Science & Technology Books.
- Rogers, A.; Tremblay, R. (2010). Impact of Diaphragm Behavior on the Seismic Design of Low-Rise Steel Buildings. *Engineering Journal, American Institute of Steel Construction* (47), pp. 21-36. (1er ed.) Vancouver, World Conference on Earthquake Engineering.
- Rogers, R Tremblay, W Yang, E Martin. (2004). *Ductil Desing os Steel Deck Diaphragms for Earthquake Resistance*. (1er ed.) Vancouver, World Conference on Earthquake Engineering.
- Smith, M. D. (2013). *Seismic Testing and Analytical Studies for the Development of New Seismic Force Resisting Systems for Metal Buildings*. (1er ed.) California: Universidad de California, San Diego.

- Sriramulu V. (2006). *Estructuras de acero: comportamiento y LRFD*. (1er ed.) México D.F., México. McGraw-Hill Interamericana.
- Prontubeam. (2019). *Método elemento finito*. Recuperado de <http://www.prontubeam.com/articulos/>
- Tremblay, C.A. Rogers. (2005). *Influence of seismic Desing Requirements and Building Period and the Desing of Low Rise Steel Building*. (1er ed.). Montreal, Canada, Departament of civil engineering and applied mechanics.
- Tremblay, R., & Stiemer, S. (1994). *Seismic response of single-storey steel buildings*. (1er ed.) St. Louis, Missouri, EE.UU Twelfth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures.
- Vinnakota, S. (2006). *Estructuras de acero: comportamiento y LRFD*. México: McGraw-Hill.
- Wei-Wen Yu. (2000). *Cold Formed Steel Desing*.(3er ed) Rolla, Missouri. Jhon Wiley & sons.
- Zapata, B. (1991). *Diseño Estructural en Acero*. (1er ed). Lima, Perú, Colegio de ingenieros Perú.

ANEXOS

Anexo A

Periodo CSCR-10	
NAVE A - SIN DIAFRAGMA	
Tipo de Zona	III
Suelo	s3
Aceleración Pico efectiva	0.36
Factor de importancia	1
Sobre Resistencia	2
ductilidad	1.5
α	1
Altura (cm)	905
Sistema estructural	Tipo Marco
Limite superior de la razon deriva inelastica	0.03
Peso Sísmico	
Cp (sin P.P. de elementos)	14.22 Tonf
Peso Propio Elementos	11.08 Tonf
CP Total	25.30 Tonf
Sismo en X	
To (periodo inicial) (s)	0.12 segundos
FED inicial	1.74
Coficiente Sismico inicial	0.31
Cortante Basal CV	7.92 Tonf
Fuerza Sísmica	7.92 Tonf
Desplazamiento elastico	17.47 cm
T (periodo 1)	1.50 segundos
Iteracion 1	
FED	0.63
Coficiente Sismico	0.11
CV	2.86 Tonf
FS	2.86 Tonf
Desplazamiento elastico	6.19 cm
Desplazamiento inelastico	18.57 cm
Deriva / altura	0.021
To (periodo Iteracion 1)	1.48 segundos
Sismo en Y	
To (periodo inicial)	0.12 segundos
FED inicial	1.74
Coficiente Sismico inicial	0.31
Cortante Basal CV	7.92 Tonf
Fuerza Sísmica	7.92 Tonf
Desplazamiento elastico	1.19 cm
T (periodo 1)	0.39 segundos
Iteracion 1	
FED	1.77
Coficiente Sismico	0.32
CV	8.05 Tonf
FS	8.05 Tonf
Desplazamiento elastico	1.23 cm
Desplazamiento inelastico	3.69 cm
Deriva / altura	0.004
To (periodo Iteracion 1) (s)	0.39 segundos

Periodo CSCR-10	
NAVE B - SIN DIAFRAGMA	
Tipo de Zona	III
Suelo	s3
Aceleración Pico efectiva	0.36
Factor de importancia	1
SobreResistencia	2
ductilidad	1.5
α	1
Altura (cm)	1010
Sistema estructural	Tipo Marco
Limite superior de la razon deriva inelastica	0.03
Peso Sísmico	
Cp (sin P.P. de elementos)	51.77 Tonf
Peso Propio Elementos	37.99 Tonf
CP Total	89.76 Tonf
Sismo en X	
To (periodo inicial)	0.12 segundos
FED inicial	1.74
Coefficiente Sismico inicial	0.31
Cortante Basal CV	28.10 Tonf
Fuerza Sísmica	28.10 Tonf
Desplazamiento elastico	11.23 cm
T (periodo 1)	1.20 segundos
Iteracion 1	
FED	0.79
Coefficiente Sismico	0.14
CV	12.72 Tonf
FS	12.72 Tonf
Desplazamiento elastico	5.07 cm
Desplazamiento inelastico	15.21 cm
Deriva / altura	0.015
To (periodo Iteracion 1)	1.20 segundos
Sismo en Y	
To (periodo inicial) (s)	0.12
FED inicial	1.74
Coefficiente Sismico inicial	0.31
Cortante Basal CV	28.10 Tonf
Fuerza Sísmica	28.10 Tonf
Desplazamiento elastico	2.68 cm
T (periodo 1)	0.59 segundos
Iteracion 1	
FED	1.60
Coefficiente Sismico	0.29
CV	25.89 Tonf
FS	25.89 Tonf
Desplazamiento elastico	2.51 cm
Desplazamiento inelastico	7.53 cm
Deriva / altura	0.007
To (periodo Iteracion 1)	0.59 segundos

Periodo CSCR-10	
NAVE C - SIN DIAFRAGMA	
Tipo de Zona	III
Suelo	s3
Aceleración Pico efectiva	0.36
Factor de importancia	1
SobreResistencia	2
ductilidad	1.5
α	1
Altura (cm)	1115
Sistema estructural	Tipo Marco
Limite superior de la razon deriva inelastica	0.03
Peso Sísmico	
Cp (sin P.P. de elementos)	119.41 Tonf
Peso Propio Elementos	65.09 Tonf
CP Total	184.50 Tonf
Sismo en X	
To (periodo inicial)	0.12 segundos
FED inicial	1.74
Coficiente Sismico inicial	0.31
Cortante Basal CV	57.75 Tonf
Fuerza Sísmica	57.75 Tonf
Desplazamiento elastico	9.62 cm
T (periodo 1)	1.11 segundos
Iteracion 1	
FED	0.85
Coficiente Sismico	0.15
CV	28.26 Tonf
FS	28.26 Tonf
Desplazamiento elastico	4.66 cm
Desplazamiento inelastico	13.98 cm
Deriva / altura	0.013
To (periodo Iteracion 1)	1.11 segundos
Sismo en Y	
To (periodo inicial)	0.12 segundos
FED inicial	1.74
Coficiente Sismico inicial	0.31
Cortante Basal CV	57.75 Tonf
Fuerza Sísmica	57.75 Tonf
Desplazamiento elastico	6.12 cm
T (periodo 1)	0.89 segundos
Iteracion 1	
FED	1.07 segundos
Coficiente Sismico	0.19
CV	35.54 Tonf
FS	35.54 Tonf
Desplazamiento elastico	3.75 cm
Desplazamiento inelastico	11.25 cm
Deriva / altura	0.010
To (periodo Iteracion 1)	0.89 segundos

Periodo CSCR-10	
NAVE D - CON DIAFRAGMA	
Tipo de Zona	III
Suelo	s3
Aceleración Pico efectiva	0.36
Factor de importancia	1
SobreResistencia	2
ductilidad	1.5
α	1
Altura (cm)	905
Sistema estructural	Tipo Marco
Limite superior de la razon deriva inelastica	0.03
Peso Sísmico	
Cp (sin P.P. de elementos)	14.22 Tonf
Peso Propio Elementos	11.18 Tonf
CP Total	25.40 Tonf
Sismo en X	
To (periodo inicial)	0.12 segundos
FED inicial	1.74
Coefficiente Sísmico inicial	0.31
Cortante Basal CV	7.95 Tonf
Fuerza Sísmica	7.95 Tonf
Desplazamiento elastico	20.00 cm
T (periodo 1)	1.60 segundos
Iteracion 1	
FED	0.60
Coefficiente Sísmico	0.11
CV	2.73 Tonf
FS	2.73 Tonf
Desplazamiento elastico	7.11 cm
Desplazamiento inelastico	21.33 cm
Deriva / altura	0.024
To (periodo Iteracion 1)	1.63 segundos
Sismo en Y	
To (periodo inicial)	0.12 segundos
FED inicial	1.74
Coefficiente Sísmico inicial	0.31
Cortante Basal CV	7.95 Tonf
Fuerza Sísmica	7.95 Tonf
Desplazamiento elastico	1.52 cm
T (periodo 1)	0.44 segundos
Iteracion 1	
FED	1.77
Coefficiente Sísmico	0.32
CV	8.08 Tonf
FS	8.08 Tonf
Desplazamiento elastico	1.57 cm
Desplazamiento inelastico	4.71 cm
Deriva / altura	0.005
To (periodo Iteracion 1)	0.45 segundos

Periodo CSCR-10	
NAVE E - CON DIAFRAGMA	
Tipo de Zona	III
Suelo	s3
Aceleración Pico efectiva	0.36
Factor de importancia	1
SobreResistencia	2
ductilidad	1.5
α	1
Altura (cm)	1010
Sistema estructural	Tipo Marco
Limite superior de la razon deriva inelastica	0.03
Peso Sísmico	
Cp (sin P.P. de elementos)	51.18 Tonf
Peso Propio Elementos	32.56 Tonf
CP Total	83.74 Tonf
Sismo en X	
To (periodo inicial)	0.12 segundos
FED inicial	1.74
Coficiente Sismico inicial	0.31
Cortante Basal CV	26.21 Tonf
Fuerza Sísmica	26.21 Tonf
Desplazamiento elastico	10.78 cm
T (periodo 1)	1.18 segundos
Iteracion 1	
FED	0.80
Coficiente Sismico	0.14
CV	12.08 Tonf
FS	12.08 Tonf
Desplazamiento elastico	4.87 cm
Desplazamiento inelastico	14.61 cm
Deriva / altura	0.014
To (periodo Iteracion 1)	1.17 segundos
Sismo en Y	
To (periodo inicial)	0.12 segundos
FED inicial	1.74
Coficiente Sismico inicial	0.31
Cortante Basal CV	26.21 Tonf
Fuerza Sísmica	26.21 Tonf
Desplazamiento elastico	1.77 cm
T (periodo 1)	0.48 segundos
Iteracion 1	
FED	1.77
Coficiente Sismico	0.32
CV	26.65 Tonf
FS	26.65 Tonf
Desplazamiento elastico	1.83 cm
Desplazamiento inelastico	5.49 cm
Deriva / altura	0.005
To (periodo Iteracion 1)	0.48 segundos

Período CSCR-10	
NAVE F - CON DIAFRAGMA	
Tipo de Zona	III
Suelo	s3
Aceleración Pico efectiva	0.36
Factor de importancia	1
Sobre Resistencia	2
ductilidad	1.5
α	1
Altura (cm)	1115
Sistema estructural	Tipo Marco
Limite superior de la razon deriva inelastica	0.03
Peso Sísmico	
Cp (sin P.P. de elementos)	119.41 Tonf
Peso Propio Elementos	59.83 Tonf
CP Total	179.24 Tonf
Sismo en X	
To (periodo inicial)	0.12 segundos
FED inicial	1.74
Coefficiente Sismico inicial	0.31
Cortante Basal CV	56.11 Tonf
Fuerza Sísmica	56.11 Tonf
Desplazamiento elastico	8.56 cm
T (periodo 1)	1.05 segundos
Iteracion 1	
FED	0.90
Coefficiente Sismico	0.16
CV	29.07 Tonf
FS	29.07 Tonf
Desplazamiento elastico	4.42 cm
Desplazamiento inelastico	13.26 cm
Deriva / altura	0.012
To (periodo Iteracion 1)	1.05 segundos
Sismo en Y	
To (periodo inicial) (s)	0.12 segundos
FED inicial	1.74
Coefficiente Sismico inicial	0.31
Cortante Basal CV	56.11 Tonf
Fuerza Sísmica	56.11 Tonf
Desplazamiento elastico	2.68 cm
T (periodo 1)	0.59 segundos
Iteracion 1	
FED	1.60
Coefficiente Sismico	0.29
CV	51.69 Tonf
FS	51.69 Tonf
Desplazamiento elastico	2.50 cm
Desplazamiento inelastico	7.50 cm
Deriva / altura	0.007
To (periodo Iteracion 1)	0.59 segundos

Anexo B

TABLA: Analisis modal Nave Industrial A

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	1.463315	0.7112	0	0	0.7112	0	0	0	0.0132	0	0	0	0.0132
MODAL	Mode	2	1.313525	0	0	0	0.7112	0	0	0	0	0.6827	0	0.0132	0.6827
MODAL	Mode	3	1.299314	0.2888	0	0	1	0	0	0	0.0053	0	0	0.0185	0.6827
MODAL	Mode	4	0.443463	0	0.2331	0	1	0.2331	0	0.0128	0	0	0.0128	0.0185	0.6827
MODAL	Mode	5	0.423124	0	0	0.191	1	0.2331	0.191	0	0	0	0.0128	0.0185	0.6827
MODAL	Mode	6	0.391541	0	0	0.2252	1	0.2331	0.4162	0	0	0	0.0128	0.0185	0.6827
MODAL	Mode	7	0.375201	0	0.2334	0	1	0.4665	0.4162	0.3397	0	0	0.3524	0.0185	0.6827
MODAL	Mode	8	0.321932	0	0.5105	1.397E-20	1	0.977	0.4162	0.0272	8.206E-20	0	0.3796	0.0185	0.6827

TABLA: Analisis Modal Nave Industrial B

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	1.195994	0.9085	0	0	0.9085	0	0	0	0.0002856	0	0	0.0002856	0
MODAL	Mode	2	1.066356	0	0	0	0.9085	0	0	0	0	0.4498	0	0.0002856	0.4498
MODAL	Mode	3	1.007722	0.0598	0	0	0.9682	1.382E-20	0	0	0.00001766	0	0	0.0003033	0.4498
MODAL	Mode	4	0.634589	2.234E-20	0.3981	1.997E-18	0.9682	0.3981	1.997E-18	0.0033	1.463E-19	5.721E-19	0.0033	0.0003033	0.4498
MODAL	Mode	5	0.57137	0	1.505E-20	0.3267	0.9682	0.3981	0.3267	1.781E-20	0	0	0.0033	0.0003033	0.4498
MODAL	Mode	6	0.520767	0	0	0.29	0.9682	0.3981	0.6166	0	0	0	0.0033	0.0003033	0.4498
MODAL	Mode	7	0.51517	0	0.0389	1.316E-19	0.9682	0.437	0.6166	0.5833	1.178E-20	9.149E-20	0.5866	0.0003033	0.4498
MODAL	Mode	8	0.341415	0	0.5357	9.081E-19	0.9682	0.9727	0.6166	0.0233	4.378E-20	2.733E-20	0.61	0.0003033	0.4498

TABLA: Analisis Modal Nave Industrial C

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	1.076572	0.8633	4.032E-11	0.00002392	0.8633	4.032E-11	0.00002392	3.473E-13	0.0075	5.481E-10	3.473E-13	0.0075	5.481E-10
MODAL	Mode	2	0.986627	2.871E-10	0.00003482	8.095E-12	0.8633	0.00003482	0.00002392	0.000008714	2.174E-12	0.2807	0.000008714	0.0075	0.2807
MODAL	Mode	3	0.94521	0.0654	2.406E-08	1.494E-08	0.9287	0.00003484	0.00002394	1.057E-09	0.0005391	1.061E-08	0.000008715	0.008	0.2807
MODAL	Mode	4	0.911392	3.603E-09	0.4473	8.446E-12	0.9287	0.4474	0.00002394	0.0332	4.674E-11	0.00002721	0.0332	0.008	0.2808
MODAL	Mode	5	0.726904	0.00001755	2.234E-13	0.3672	0.9288	0.4474	0.3673	2.087E-13	0.000004117	1.712E-13	0.0332	0.008	0.2808
MODAL	Mode	6	0.673728	0.00001051	1.071E-09	0.2655	0.9288	0.4474	0.6327	1.364E-07	9.993E-07	1.371E-12	0.0332	0.008	0.2808
MODAL	Mode	7	0.67315	1.366E-12	0.0049	6.203E-08	0.9288	0.4523	0.6327	0.578	1.387E-13	0.000006167	0.6112	0.008	0.2808
MODAL	Mode	8	0.387283	5.555E-11	0.5021	3.389E-11	0.9288	0.9544	0.6327	0.0219	1.004E-10	0.00009712	0.6331	0.008	0.2809

TABLE: Analisis Modal Nave Industrial D

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	1.621262	0.9944	2.379E-12	2.864E-11	0.9944	2.379E-12	2.864E-11	1.153E-13	0.0044	3.889E-08	1.153E-13	0.0044	3.889E-08
MODAL	Mode	2	0.781331	0.00007299	1.069E-10	2.169E-07	0.9944	1.093E-10	2.169E-07	1.284E-11	0.0028	6.388E-08	1.295E-11	0.0072	1.028E-07
MODAL	Mode	3	0.737131	1.045E-09	4.663E-10	0.0058	0.9944	5.756E-10	0.0058	2.716E-07	2.022E-09	1.57E-08	2.716E-07	0.0072	1.185E-07
MODAL	Mode	4	0.734615	5.237E-10	3.836E-11	5.39E-09	0.9944	6.139E-10	0.0058	1.108E-07	1.021E-09	0.0128	3.824E-07	0.0072	0.0128
MODAL	Mode	5	0.697935	6.446E-12	0.00003635	2.182E-08	0.9944	0.00003635	0.0058	0.0443	7.603E-11	1.082E-07	0.0443	0.0072	0.0128
MODAL	Mode	6	0.651079	2.489E-08	1.375E-09	0.0002164	0.9944	0.00003635	0.0061	7.578E-09	0.00003456	7.038E-09	0.0443	0.0072	0.0128
MODAL	Mode	7	0.650575	9.46E-09	1.508E-10	0.0000292	0.9944	0.00003635	0.0061	9.376E-10	0.0001652	1.34E-08	0.0443	0.0074	0.0128
MODAL	Mode	8	0.646718	0.0002165	2.516E-10	5.254E-07	0.9947	0.00003639	0.0061	9.139E-10	0.0113	2.429E-10	0.0443	0.0187	0.0128
MODAL	Mode	9	0.626792	2.351E-08	4.106E-08	0.000003212	0.9947	0.00003639	0.0061	4.208E-08	8.324E-09	0.887	0.0443	0.0187	0.8997
MODAL	Mode	10	0.626581	1.94E-08	1.02E-08	0.03	0.9947	0.0000364	0.0361	3.444E-07	0.000001548	0.00009045	0.0443	0.0187	0.8998
MODAL	Mode	11	0.616309	5.853E-13	0.00004172	5.897E-07	0.9947	0.00007812	0.0361	0.0006575	6.423E-10	0.00001108	0.0449	0.0187	0.8998
MODAL	Mode	12	0.614724	1.676E-10	6.705E-07	6.501E-09	0.9947	0.00007879	0.0361	0.000009755	1.147E-09	0.0004333	0.0449	0.0187	0.9003
MODAL	Mode	13	0.56173	7.66E-09	0.00001099	0.0003716	0.9947	0.00007989	0.0365	0.0001814	0.000004947	8.643E-09	0.0451	0.0187	0.9003
MODAL	Mode	14	0.560173	1.092E-07	4.609E-07	8.454E-07	0.9947	0.00008035	0.0365	0.00008428	0.00003026	3.755E-08	0.0452	0.0187	0.9003
MODAL	Mode	15	0.559477	3.719E-11	0.0011	1.506E-08	0.9947	0.0012	0.0365	0.2065	2.591E-10	0.000003277	0.2517	0.0187	0.9003
MODAL	Mode	16	0.558785	0.00001068	5.351E-09	0.000001262	0.9947	0.0012	0.0365	9.986E-07	0.0018	2.245E-07	0.2517	0.0205	0.9003
MODAL	Mode	17	0.558692	1.684E-08	9.09E-08	3.657E-07	0.9947	0.0012	0.0365	0.00001784	0.00002091	1.338E-08	0.2517	0.0206	0.9003
MODAL	Mode	18	0.552158	1.806E-09	4.537E-08	1.23E-10	0.9947	0.0012	0.0365	0.000006198	1.204E-08	0.075	0.2517	0.0206	0.9753
MODAL	Mode	19	0.546896	8.339E-10	6.511E-09	0.00009502	0.9947	0.0012	0.0366	4.857E-07	5.342E-08	5.285E-07	0.2517	0.0206	0.9753
MODAL	Mode	20	0.54585	9.571E-09	5.212E-09	0.000009986	0.9947	0.0012	0.0366	0.000001129	0.000000171	2.065E-08	0.2517	0.0206	0.9753
MODAL	Mode	21	0.53803	1.757E-12	1.078E-08	1.862E-07	0.9947	0.0012	0.0366	0.000002803	2.05E-11	0.00008779	0.2517	0.0206	0.9753
MODAL	Mode	22	0.536868	1.073E-13	6.875E-07	1.435E-09	0.9947	0.0012	0.0366	0.0004478	1.521E-10	3.531E-07	0.2522	0.0206	0.9753
MODAL	Mode	23	0.52695	3.305E-11	0.00002124	0.000001563	0.9947	0.0012	0.0366	0.00008653	2.794E-10	0.000001331	0.2523	0.0206	0.9753
MODAL	Mode	24	0.525553	4.955E-12	0.000001488	0.0001267	0.9947	0.0012	0.0367	0.000009014	8.893E-10	0.00002773	0.2523	0.0206	0.9754
MODAL	Mode	25	0.524204	1.629E-08	2.486E-09	0.3712	0.9947	0.0012	0.04079	0.000001064	0.000001178	2.899E-08	0.2523	0.0206	0.9754
MODAL	Mode	26	0.505883	1.414E-07	4.434E-10	0.000001838	0.9947	0.0012	0.04079	2.631E-10	0.00015	3.857E-09	0.2523	0.0207	0.9754
MODAL	Mode	27	0.504982	1.547E-10	3.235E-08	0.0002754	0.9947	0.0012	0.04082	3.484E-08	0.000001319	2.391E-10	0.2523	0.0207	0.9754
MODAL	Mode	28	0.504005	4.582E-12	0.0003259	0.000002195	0.9947	0.0015	0.4082	0.00002404	5.042E-10	4.987E-08	0.2523	0.0207	0.9754
MODAL	Mode	29	0.500119	2.993E-10	1.187E-07	3.907E-08	0.9947	0.0015	0.4082	1.081E-08	1.976E-08	0.0001537	0.2523	0.0207	0.9755
MODAL	Mode	30	0.497922	2.842E-09	3.326E-10	0.0001652	0.9947	0.0015	0.4084	1.666E-07	9.492E-08	5.319E-10	0.2523	0.0207	0.9755
MODAL	Mode	31	0.495999	9.739E-08	3.031E-10	0.000007134	0.9947	0.0015	0.4084	1.738E-09	0.000003813	1.849E-10	0.2523	0.0207	0.9755
MODAL	Mode	32	0.492589	0.0013	2.013E-08	0.000002417	0.996	0.0015	0.4084	1.243E-09	0.083	2.265E-09	0.2523	0.1037	0.9755
MODAL	Mode	33	0.475219	4.49E-08	1.59E-08	6.094E-08	0.996	0.0015	0.4084	6.551E-10	0.00001723	6.009E-09	0.2523	0.1037	0.9755
MODAL	Mode	34	0.472203	1.961E-10	1.215E-07	8.296E-09	0.996	0.0015	0.4084	0.00001263	4.047E-10	0.00000526	0.2523	0.1037	0.9756
MODAL	Mode	35	0.47157	8.664E-12	0.00000811	5.005E-08	0.996	0.0015	0.4084	0.0014	8.297E-09	1.979E-07	0.2537	0.1037	0.9756
MODAL	Mode	36	0.467937	8.634E-11	0.0012	6.745E-07	0.996	0.0028	0.4084	0.009	5.195E-08	2.478E-07	0.2627	0.1037	0.9756
MODAL	Mode	37	0.465536	1.786E-09	0.000005889	8.844E-11	0.996	0.0028	0.4084	0.00003654	1.018E-07	8.955E-08	0.2627	0.1037	0.9756
MODAL	Mode	38	0.464464	1.496E-09	0.00004821	0.000000203	0.996	0.0028	0.4084	0.00003285	2.729E-07	0.0001603	0.2627	0.1037	0.9757
MODAL	Mode	39	0.458871	9.717E-09	6.496E-09	0.0052	0.996	0.0028	0.4136	1.825E-07	0.000001256	3.547E-09	0.2627	0.1037	0.9757
MODAL	Mode	40	0.456206	0.00001454	8.166E-09	1.231E-07	0.996	0.0028	0.4136	2.045E-08	0.0166	7.421E-10	0.2627	0.1203	0.9757
MODAL	Mode	41	0.450069	0.000001974	3.551E-08	4.151E-07	0.996	0.0028	0.4136	7.597E-09	0.0002903	1.035E-08	0.2627	0.1206	0.9757
MODAL	Mode	42	0.446779	0.000001731	4.774E-09	0.000003546	0.996	0.0028	0.4136	1.063E-09	0.0036	1.364E-09	0.2627	0.1242	0.9757
MODAL	Mode	43	0.446369	1.683E-08	1.041E-08	0.0003274	0.996	0.0028	0.4139	6.251E-09	0.00003001	1.244E-12	0.2627	0.1242	0.9757
MODAL	Mode	44	0.444375	2.199E-10	1.436E-10	0.0062	0.996	0.0028	0.4201	2.619E-07	4.13E-09	2.808E-09	0.2627	0.1242	0.9757
MODAL	Mode	45	0.440317	7.448E-08	1.162E-07	0.00001177	0.996	0.0028	0.4201	1.496E-07	0.000116	2.807E-09	0.2627	0.1243	0.9757
MODAL	Mode	46	0.432278	5.082E-09	0.000001127	0.0001358	0.996	0.0028	0.4203	1.988E-07	2.36E-09	1.311E-08	0.2627	0.1243	0.9757
MODAL	Mode	47	0.432142	6.788E-10	0.000006508	3.46E-08	0.996	0.0028	0.4203	0.000002334	5.002E-08	0.00003083	0.2627	0.1243	0.9758
MODAL	Mode	48	0.428041	4.568E-11	0.8722	7.96E-08	0.996	0.875	0.4203	0.0183	3.429E-09	2.303E-08	0.2811	0.1243	0.9758
MODAL	Mode	49	0.425392	2.661E-11	0.0945	8.697E-08	0.996	0.9695	0.4203	0.0000238	5.083E-10	1.128E-08	0.2813	0.1243	0.9758

TABLE: Analisis Modal Nave Industrial E

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	1.216384	0.967	4.358E-12	7.316E-11	0.967	4.358E-12	7.316E-11	2.333E-11	0.0032	2.961E-10	2.333E-11	0.0032	2.961E-10
MODAL	Mode	2	0.56592	7.725E-10	0.00001681	0.6429	0.967	0.00001681	0.6429	0.00003398	2.177E-09	1.016E-10	0.00003398	0.0032	3.978E-10
MODAL	Mode	3	0.538665	5.89E-11	0.2494	0.00004575	0.967	0.2494	0.643	0.5242	2.113E-11	1.809E-09	0.5242	0.0032	2.207E-09
MODAL	Mode	4	0.437295	2.32E-12	0.7492	1.441E-09	0.967	0.9986	0.643	0.1151	3.937E-10	5.734E-07	0.6393	0.0032	5.756E-07
MODAL	Mode	5	0.414069	1.371E-09	5.134E-07	3.703E-10	0.967	0.9986	0.643	0.000000212	2.204E-08	0.9457	0.6393	0.0032	0.9457

TABLE: Analisis Modal Nave Industrial F

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	1.103884	0.9319	3.489E-09	1.127E-09	0.9319	3.489E-09	1.127E-09	3.261E-11	0.0206	5.987E-07	3.261E-11	0.0206	5.987E-07
MODAL	Mode	2	0.733708	6.575E-10	0.0096	0.6298	0.9319	0.0096	0.6298	0.028	2.615E-09	4.921E-09	0.028	0.0206	6.037E-07
MODAL	Mode	3	0.724877	2.14E-09	0.1828	0.0328	0.9319	0.1924	0.6625	0.5409	2.281E-10	3.783E-08	0.5688	0.0206	6.415E-07
MODAL	Mode	4	0.509664	1.401E-09	0.8032	2.154E-07	0.9319	0.9956	0.6625	0.0919	1.681E-10	3.417E-07	0.6607	0.0206	9.831E-07