

PROTOTIPO DE MODELO ESTRUCTURAL DE ARMADURA TIPO WARREN PARA EL
LABORATORIO DE ESTRUCTURAS

CATHERINE CALDERON RAMIREZ
EDISON GREGORIO RAMIREZ MORALES

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA CIVIL
BOGOTA 2019

PROTOTIPO DE MODELO ESTRUCTURAL DE ARMADURA TIPO WARREN PARA EL
LABORATORIO DE ESTRUCTURAS

CATHERINE CALDERON RAMIREZ
EDISON GREGORIO RAMIREZ MORALES

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero civil

Director Proyecto
Ingeniero Jairo Edmundo Yepes Heredia

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA CIVIL
BOGOTA 2019

NOTA DE ACEPTACION

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá, noviembre 2019

“Dedico esta tesis principalmente en memoria a mi abuelita Ángela Fuentes quien siempre me apoyo, me acompañó en cada momento de mi vida y quien fue mi ejemplo a seguir. A mis padres, Manuel Calderón y María Ramírez quienes siempre vi en ellos ejemplo de perseverancia, dedicación, superación lo cual es un espejo para lograr esta y muchas metas más; a mis hermanos Paola Calderón y Alejandro Calderón, aunque cada uno tengamos diferentes caminos siempre estuvieron pendiente de mí y me han brindado su ayuda cuando lo he necesitado; A mi novio Juan Pablo quien siempre me motivo a seguir adelante, me brindo su conocimiento y fue mi compañía para lograr esta meta.”

Catherine Calderón Ramírez

“Dedico esta tesis a mi mamita María Virgiliana Ramírez, a mi mama Luz Marina Ramírez quienes siempre estuvieron y están conmigo y me dieron las bases de lo que soy y quiero ser; A la mujer de mi vida Katherine Bolívar quien siempre ha estado conmigo y me ha motivo a seguir adelante.

Edison Gregorio Ramírez

Agradecimientos

Expreso mis agradecimientos a:

Ingeniero Jairo Edmundo Yepes Heredia, director de tesis

Profesores de la facultad de Ingeniería Civil, quienes aportaron experiencia, conocimiento y

dedicación en el transcurso de la carrera como profesional.

Catherine Calderón Ramírez

Agradecimientos

Expreso mis agradecimientos a:

Ingeniero Jairo Edmundo Yepes Heredia, director de tesis

A los profesores de la facultad que se han tomado el tiempo de guiarnos para el buen desarrollo
del presente trabajo.

Edison Gregorio Ramírez

Tabla de contenido

1. INTRODUCCION	13
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
2.1 Descripción problema	15
2.2 Contexto problemático	15
2.3 Pregunta problema	16
2.4 Justificación	16
3. OBJETIVOS	17
3.1 Objetivo General	17
3.2 Objetivos Específicos.....	17
4. ESTADO DEL ARTE	18
4.1 Prototipos relevantes en diferentes países	18
4.1.1 Estudio experimental sobre el comportamiento estático de armaduras tubulares de sección circular.	18
4.1.2 Mola estructural	18
4.1.3 Desarrollo de aplicación de prueba virtual para la enseñanza de la ingeniería estructural.	19
4.1.4 Prototipo didáctico para la enseñanza de la ingeniería estructural.....	19
4.1.5 Armadura triangular con voladizo	21
4.1.6 Estructura de marcos con contravientos.....	22
4.1.7 Modelo de enseñanza para estructuras de armadura	23
4.1.8 Armadura Howe.....	24
5. GLOSARIO	25
6. MARCO TEORICO	26
6.1 Prototipo didáctico	26
6.2 Funciones estructurales	27
6.2.1 Orígenes de las cargas	27
6.2.2 Cargas muertas y vivas	28
6.2.3 Reacciones	28
6.3 Ley de Hooke	28
6.3.1 Módulo de elasticidad	29
6.3.2 Modulo de corte	31
6.3.3 Esfuerzo y deformación	32
6.3.4 Relación esfuerzo-deformación	32
6.3.5 Cirulo de morth	34

6.4 Diseño con respecto al comportamiento estructural.....	35
6.5 Materiales estructurales	35
6.5.1 Aluminio	39
6.6 Armaduras.....	39
6.6.1 Tipos de armaduras	40
6.6.2 Uniones	42
6.6.3 Apoyos	43
7. METODOLOGIA.....	44
7.0.1 Dimensionamiento estructura	45
7.0.2 Análisis de la estructura	45
7.0.3 Realizar planos de estructura	48
7.0.4 Construcción del prototipo.....	49
7.0.5 Elaboración de pesas en concreto	50
7.1 Ensayo de laboratorio.....	52
7.1.1 Procedimiento	54
7.1.2 Datos obtenidos estructura No. 1	56
7.1.3 Datos obtenidos estructura No. 2	57
7.2 Análisis de resultados	58
8. CONCLUSIONES.....	63
9. LIMITACIONES Y APORTE.....	67
9.1 Limitaciones.....	67
9.2 Aporte	67
10. BIBLIOGRAFÍA.....	68
11. ANEXOS.....	70
11.1 Guía de laboratorio	70
11.2 Plano general estructura	77
11.3 Artículo	79

Lista de ilustraciones

Ilustración 1 prototipo puente de Puerto Salgar- Colombia.....	20
Ilustración 2 Viga en voladizo	21
Ilustración 3 Marco con contravientos.....	22
Ilustración 4 Viga espacial modelo en celosía (sin carga) Warren, Con detalles.	23
Ilustración 5 Prototipo de armadura Howe	24
Ilustración 6 Diagrama de cuerpo libre del prototipo de armadura Howe.....	24
Ilustración 7 tipos de apoyos.....	43
Ilustración 8 Silueta estructura idealizada	46
Ilustración 9 Secciones de elementos	46
Ilustración 10 Vista isométrica estructura.....	47
Ilustración 11 Comportamiento estructura sometida a carga vertical.....	47
Ilustración 12 Vista isométrica deformación de estructura.....	48
Ilustración 13 Vista frontal y posterior de estructura.....	50
Ilustración 14 Estructura tipo Warren (prototipo)	50
Ilustración 15 Tubo 4 pulgadas para pesas	51
Ilustración 16 Recorte de tubo para pesa	51
Ilustración 17 Forma de pesas tubo 4 pulgadas	52
Ilustración 18 Comprador de caratula.....	53
Ilustración 19 Montaje comparador de caratula.....	54
Ilustración 20 Montaje de la estructura.....	55
Ilustración 21 Montaje de estructura y lectura del comparador de caratula con 30 Kg.....	55
Ilustración 22 Torsión en diagonal estructura No. 2.....	61
Ilustración 23 Vista frontal estructura No.2.....	62
Ilustración 24 Deformación en cero cordones opuestos sometidos a carga.....	63
Ilustración 25 Falla por torsión.....	64
Ilustración 26 falla en conexiones.....	64
Ilustración 27 falla por flexo compresión	65

Lista de tablas

Tabla 1 Valores del módulo de elasticidad (E) para materiales estructurales comunes	34
Tabla 2 Ventaja, desventaja y uso de materiales estructurales	36
Tabla 3 Tipos de armaduras, origen y características principales	40
Tabla 4 Datos obtenidos ensayo estructura No.1	56
Tabla 5 Datos obtenidos ensayo estructura No.2.....	57

Lista de Graficas

Grafica 1 Formas del comportamiento esfuerzo-deformación	33
Grafica 2 Esfuerzo Vs Deformación ensayo estructura No.1	56
Grafica 3 Esfuerzo Vs Deformación ensayo estructura No.2	57
Grafica 4 Pendiente ensayo estructura 1	58
Grafica 6 Esfuerzo Vs Deformación ensayo estructura No.2 con línea de tendencia	59
Grafica 7 Comportamiento esfuerzo- deformación ensayo estructura 2	60

1. INTRODUCCION

“El análisis estructural es la ciencia que se encarga de la elaboración de métodos de cálculo para establecer resistencia, rigidez, durabilidad, estabilidad y seguridad” adquiriendo los valores necesarios para un diseño estructural seguro. (Castro, 2009)

Las estructuras metálicas desde la antigüedad han tenido un papel fundamental en la historia grandes estructuras se han realizado, por ejemplo: el primer puente transbordador del mundo de estructura metálica, el puente Bizkaia donde fue inaugurado el 28 de julio de 1893 fue diseñado por Don Martin Alberto de Palacio y Elissague. Esta estructura lleva aproximadamente 126 años y se encuentra en óptimas condiciones, es un monumento emblemático como también lo es la torre Eiffel ubicada en Francia con una altura máxima de 324m.

Lo anterior son ejemplos donde se debe profundizar en el tema de estructuras metálicas ya que son estructuras livianas, se realizan insitu y su material hace que se conserven al pasar los años; Colombia cuenta con pocas estructuras metálicas de ese tipo pero las que se encuentran esta relacionada con los puentes, estos puentes son de gran ayuda en el territorio nacional donde hay poco acceso de transporte de material convencional, el ejército nacional en la mayoría de casos es el encargado de realizar estas estructuras. El puente militar Vereda entre ríos sobre el rio Ariguanicito es una estructura que beneficio a más 450 familias del sector rural, son 7 veredas que en temporada de invierno se dificultaba el tránsito por esta zona quedando incomunicados con la cabecera municipal, esto al crecimiento de dicho rio



Ilustración 1 Puente Militar

Fuente: (Cesar, 2019)

Teniendo en cuenta cada uno del ejemplo anteriormente mencionado, las estructuras metálicas tienen un gran nivel de importancia para la sociedad por eso se toma la iniciativa de realizar un prototipo de una armadura tipo Warren, donde se estableció como objetivo calcular y analizar las deformaciones de este modelo sometido a diferentes cargas, lo anterior para crear un laboratorio de modelos estructurales con la finalidad de ofrecer un concepto teórico-práctico.

El diseño del modelo estructural se realizó con el propósito de brindar un prototipo didáctico, para lo cual se tuvo en cuenta tipo de material ya que es importante para los diferentes ensayos.

Para el uso y manipulación del prototipo se realizó una guía la cual es un aporte para que la práctica de laboratorio se puede realizar satisfactoriamente obteniendo los objetivos que se plantean en ella y brindar un concepto básico del comportamiento de las armaduras cuando estas se encuentran sometidas a diferentes cargas.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Descripción problema

La evolución y desarrollo en las estructuras que se visualiza a diario ha permitido que en los últimos años se logren avances significativos en la infraestructura en Colombia, trayendo consigo un mejoramiento del entorno y realizando obras con un alto estándar de calidad.

Las estructuras metálicas han ido ocupado gradualmente un papel importante en el país, por la facilidad de corregir problemas en obra, su tiempo de ejecución es mucho más corto que una obra convencional y son estructuras livianas.

Debido a la importancia de las estructuras metálicas en la sociedad, la Universidad Antonio Nariño requiere de laboratorios de modelos estructurales a escalas menores como por ejemplo una armadura tipo Warren, donde se pueda visualizar cada uno de sus elementos, analizarlo y por medio de la teórica vista en clase lleguen a concluir como actúan dichos elementos cuando la estructura se encuentra sometida a diferentes cargas.

2.2 Contexto problemático

El presente proyecto pretende implementar un modelo estructural a escala para el laboratorio de la Universidad Antonio Nariño donde el estudiante de la facultad de Ingeniería Civil pueda obtener un conocimiento teórico-práctico.

2.3 Pregunta problema

¿Cómo en un entorno inteligible se puede visualizar y analizar las deflexiones que tiene una armadura tipo Warren al estar sometida a diferentes cargas?

2.4 Justificación

La Propuesta de este trabajo es relevante debido a que por medio de este prototipo se brinda un apoyo didáctico para estudiantes de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Antonio Nariño para fortalecer el aprendizaje en los temas estructurales. A través de este prototipo se logra visualizar e identificar cada uno de los elementos, las deformaciones que se generan debido a las diferentes cargas que es sometida y demostrar los modelos de esfuerzo vs deformación.

La importancia de este proyecto recae en el hecho de que los prototipos actuales que se encuentran en el mercado son de difícil acceso por su costo elevado, por eso, se pretende construir este modelo estructural a escala con materiales económicos y que logran llegar a obtener resultados complejos para hallar conclusiones técnicas sobre este.

No obstante, en este documento se pretende resaltar la importancia de las estructuras y de los modelos estructurales de armaduras realizados en otras universidades, realizando investigaciones de antecedentes históricos.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

- Construir un prototipo a escala donde se puedan calcular las deformaciones de una armadura tipo Warren que se encuentra sometida a diferentes cargas, como aporte al laboratorio de estructuras con propósito de proponer una percepción teórico-práctica sobre el funcionamiento de las estructuras a los estudiantes de la facultad de ingeniería civil de la Universidad Antonio Nariño.

3.2 Objetivos Específicos

- Visualizar las deflexiones estructurales, teniendo en cuenta el peso a la que estará sometida.
- Manipular adecuadamente los elementos (aparatos) para realizar un análisis más detallado de las relaciones de esfuerzo- deformación.
- Calcular módulo de elasticidad y módulo de corte en cada uno de los ensayos.
- Realizar guía de laboratorio para el ensayo de laboratorio.

4. ESTADO DEL ARTE

4.1 Prototipos relevantes en diferentes países

Debido a la importancia de la temática de modelos estructurales hay universidades, revistas y páginas web donde se han realizado modelos de diferentes tipos de armaduras a pequeña escala para realizar diferentes ensayos con el fin de lograr visualizar y analizar su comportamiento.

4.1.1 Estudio experimental sobre el comportamiento estático de armaduras tubulares de sección circular.

Se realizaron cuatro tipos de cerchas tubulares tipo Warren, uniendo sus elementos con soldaduras incluida una con soldaduras escondidas pero reforzada cada una de estas vigas, tenían diferentes tipos de soldaduras y refuerzos para verificar su comportamiento. Se estudió cada una y se identificó que las fallas son básicamente las mismas en cada uno de los prototipos construidos. En las cuerdas inferiores se presentan fracturas en las soldaduras por la flexión producida donde también se evidencia que las deformaciones axiales en la cuerda superior son más pequeñas que la deformación del rendimiento del material de acero mientras que la cuerda inferior indica lo contrario. Estos tipos de vigas se verificaron por el método de elementos finitos. Cada prototipo se comparó los resultados con prueba experimental y análisis, los cuales se ajustan al cálculo analítico. (Wenwei Yang, 2018)

4.1.2 Mola estructural

Esta estructura es un modelo interactivo que muestra el comportamiento de varios tipos de estructuras, donde varias piezas que se unen magnéticamente pueden formar diferentes tipos

de estructuras a escala y ver sus interacciones cuando se someten a cargas externas, se visualiza los comportamientos y deformaciones en cada elemento.

Este tipo de prototipo es interesante ya que ayuda a comprender fácilmente los comportamientos de las estructuras, donde los objetivos de estudio son más claros para los estudiantes ya que nos da una percepción más clara cuando vamos a iniciar un proyecto y como este puede llegar a comportarse de acuerdo a su diseño y que tipo de conexiones pueden ser más convenientes a la hora de concebir un diseño. (Sequeira, 2019).

4.1.3 Desarrollo de aplicación de prueba virtual para la enseñanza de la ingeniería estructural.

En este artículo se propone crear una plataforma virtual donde se realizan varios experimentos de las estructuras y cómo se comportan de acuerdo al cambio geométrico de esta, donde se realizan varios experimentos y se verifica que geometría funciona mejor para poder concebir el diseño final de la estructura. Esta aplicación desarrollada en 2D llamada ISA (Instant Structural Analysis) es un entorno de prototipo de aprendizaje. Esta aplicación tiene como objetivo proporcionar un entorno de autoaprendizaje virtual de la ingeniería estructural, se desarrolló con el método de la rigidez matricial y por tal motivo se convierte en herramienta adecuada para el aprendizaje de este método. (Sritawat Kitipornchai, 2010)

4.1.4 Prototipo didáctico para la enseñanza de la ingeniería estructural

Se realizó un prototipo a escala 1:20 de un puente que está ubicado en Puerto Salgar, lo cual se realizó mediante sistemas electrónicos y se calcularon “*deformaciones unitarias y fuerzas internas*” que se generan para cada elemento estructural cuando está sometida a cargas dinámicas. (Edgar Muñoz Díaz, 2007)

Lo anterior se realiza y se analiza con galgas extensiométricas donde por medio de un software (LabView y Visual Basic) se puede verificar la información. Esto se hace y verifica con galgas extensiométricas.

Mediante este modelo los estudiantes se instruyen de los antecedentes históricos ingenieriles, con el fin de evaluar procedimientos de análisis y construcción de un puente primordial en Colombia. Por medio del prototipo, se puede exponer a los estudiantes las bases principales de las estructuras metálicas como: “*cordón inferior, cordón superior, diagonal, elementos a tensión, elementos a compresión, secciones compactas, secciones esbeltas, pandeo global, pandeo local, uniones, remaches, soldadura, apoyos, conectores de cortante, etc.* Además de explorar las técnicas modernas de diseño y construcción de puentes en acero y su comportamiento ante cargas móviles”. (Edgar Muñoz Díaz, 2007)

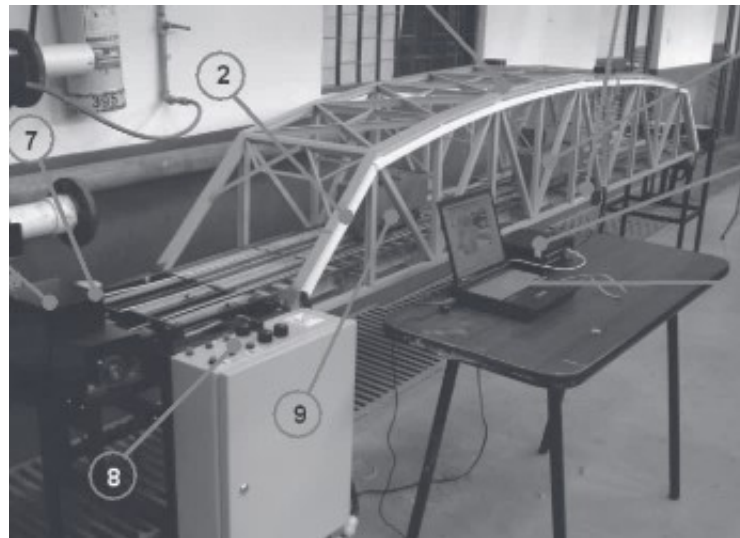


Ilustración 2 prototipo puente de Puerto Salgar- Colombia

Fuente: adaptada de (Edgar Muñoz Díaz, 2007)

4.1.5 Armadura triangular con voladizo

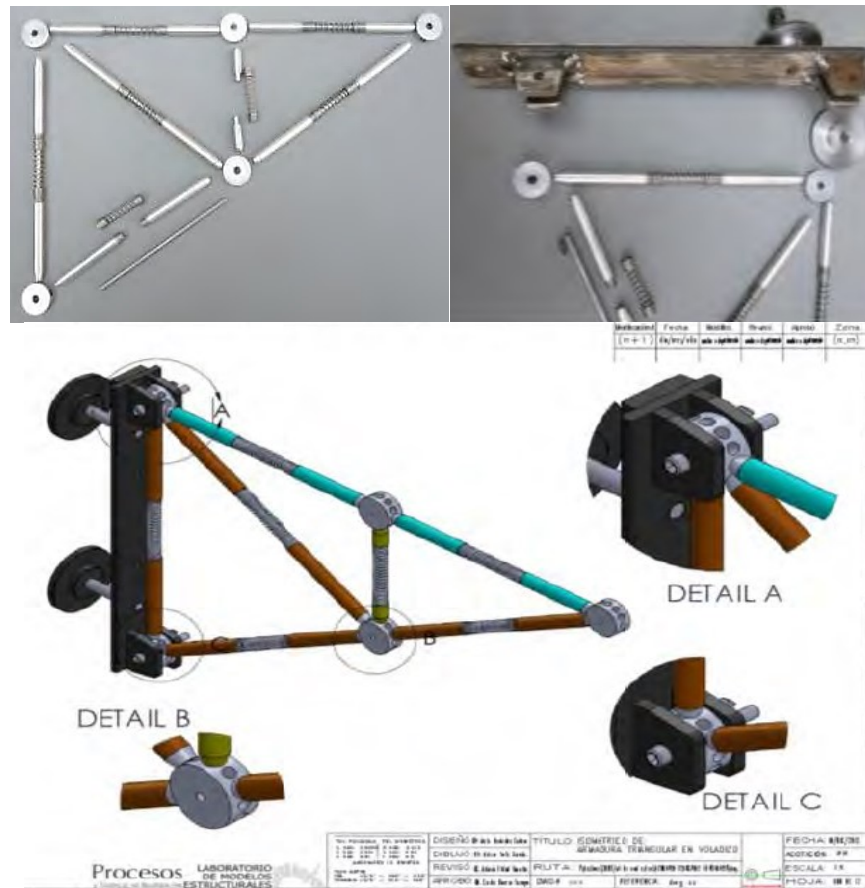


Ilustración 3 Viga en voladizo

Fuente: adaptada de (metropolitana, 2014)

Prototipo desarrollado para la enseñanza de estructuras. Una de las maneras de comprobar y conocer el comportamiento mecánico de las estructuras es construir modelos a escala de dichas estructuras a estudiar y así poder verificarlas, se puede observar si los elementos se encuentran a tensión o a compresión. El objeto principal es demostrar los esfuerzos a los que están sometidos cada uno de los elementos de la estructura.

Este prototipo de armadura triangular en cantiliver está conformado con un sistema de barras articuladas en sus nodos, estas barras tienen la propiedad de indicar “los esfuerzos a los

que está sometida la estructura” y cada uno de los elementos que la conforman; cuenta con resortes en la parte central de cada elemento. (metropolitana, 2014)

4.1.6 Estructura de marcos con contravientos



Ilustración 4 Marco con contravientos

Fuente: Adaptada de (metropolitana, 2014)

Prototipo elaborado para el entendimiento didáctico de las estructuras, tiene como objetivo entender los efectos que tiene la orientación de las columnas en su rigidez lateral del marco rígido, demostrar lo importante que son los rigidizadores que se logran a través de las diagonales para que no se presenten deformaciones mayores en la estructura., indicar los efectos de torsión que se generan en la estructura. (metropolitana, 2014)

4.1.7 Modelo de enseñanza para estructuras de armadura

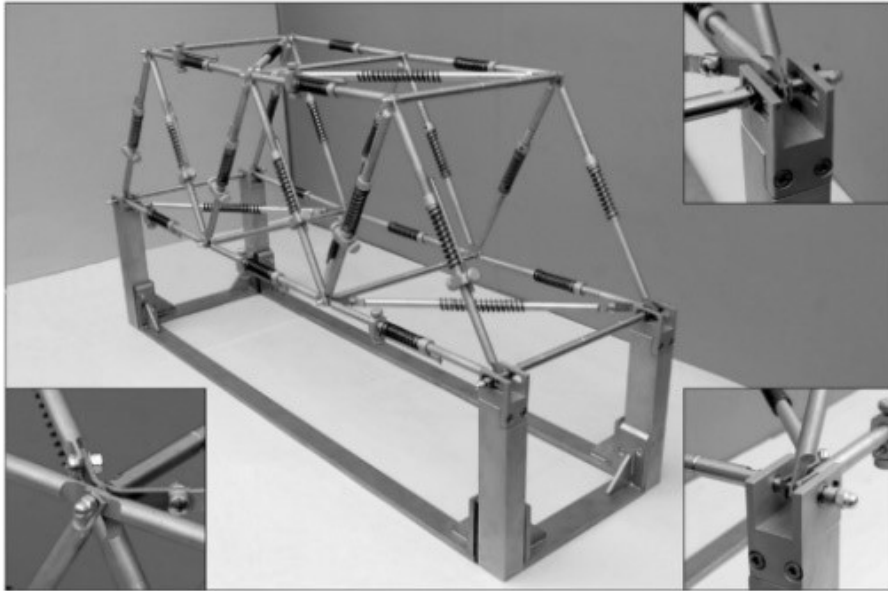


Ilustración 5 Viga espacial modelo en celosía (sin carga) Warren, Con detalles.

Fuente: Adaptado de (Davide Bigoni, 2012)

Modelo de enseñanza se comienza a diseñar y construir con un simple pasador de articulación de una estructura plana tipo Warren en los que los elementos se han elaborado con resortes. Ha sido utilizado cualitativamente para mostrar el comportamiento de toda la estructura y explicar que le pasa a cada uno de los elementos que conforman la viga en celosía, verificar si están a compresión o tensión.

Este modelo se puede utilizar para proporcionar diagnósticos o experimentos donde la estructura puede actuar con cargas muertas y verificar alargamientos o acortamientos de las barras. Se puede medir en la estructura con inspección visual la elongación de las barras en los nodos y se puede medir con un comparador mecánico.

Un modelo físico simple que facilita eficazmente la comprensión del comportamiento mecánico de las estructuras de celosía, son formas estructurales para la comprensión de varios modelos conceptuales empleados en micro y nano-tecnologías, por ejemplo, redes cristalinas y nano materiales ultraligero. (Davide Bigoni, 2012)

4.1.8 Armadura Howe

Este prototipo está basado en aplicar una carga vertical en el nodo central para verificar cómo se comporta cada uno de estos, en este caso las barras trabajan a tracción y otras a compresión donde se puede visualizar cuando los resortes se alargan y se acortan según el caso. (metropolitana, 2014)



Ilustración 6 Prototipo de armadura Howe

Fuente: Adaptada de (metropolitana, 2014)

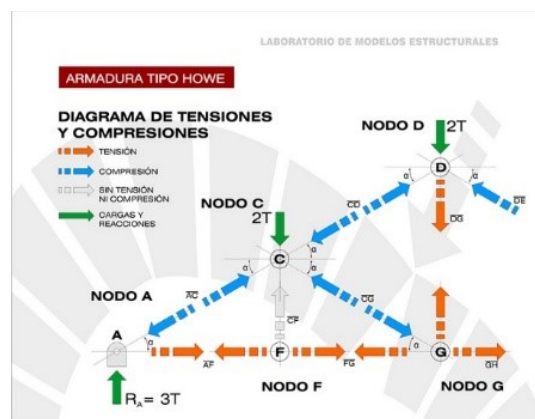


Ilustración 7 Diagrama de cuerpo libre del prototipo de armadura Howe

Fuente: Adaptada de (metropolitana, 2014)

5. GLOSARIO

Apoyo articulado: Limita desplazamientos, pero admite giros de la estructura de los ejes que están en el punto.

Apoyo empotrado: Limita desplazamientos, lo que indica que la estructura se encuentra fija en un punto determinado.

Armadura: Estructura conformada principalmente por triángulos de diferentes tipos donde permiten la estabilidad optima en cada uno de sus elementos.

Calculo: Especificación ordenada y racional, por medio de procesos matemáticos.

Carga: Diferentes tipos de fuerzas (activa o combinada) realizada en alguna estructura.

Comportamiento por esfuerzo- deformación: Relación del esfuerzo con la deformación con un material o estructura. Principalmente se representa por medio de una gráfica que cubre entre carga cero y falla.

Conexión: Unión de dos o más elementos diferentes en una determinada estructura.

Deformación: Variación de longitud de un determinado elemento y/o cuerpo.

Elemento estructural: Elementos que constituyen una estructura y que soporta diferentes cargas.

Fatiga: Colapso estructural que ocurre como resultado de una carga aplicada y retirada (o invertida) repetidamente durante una gran numero de ciclos.

Flexión: acción de volteo que provoca una modificación en la encorvadura de algún elemento lineal, caracterizada por la generación de esfuerzos de compresión y tensión internos opuestos.

Fuerza: Esfuerzo que tiende a cambiar la forma o el estado de movimiento de un objeto.

Resistencia: Capacidad para soportar una fuerza.

6. MARCO TEORICO

6.1 Prototipo didáctico

Un prototipo didáctico es aquel que permite la interrelación del estudiante con los temas abarcados en una asignatura para tener una mayor perspectiva de sus respectivas aplicaciones y funcionalidades, lo que hace referencia a una herramienta “*pedagógica para la enseñanza del concepto de un tema específico*”. (Julio Enrique Duarte, Guerly Gutierrez, Flavio Fernandez Morales, 2007)

La metodología que desarrolla este tipo de prototipos al estudiante se basada en aprendizajes por innovación, demostración y cognoscitivo por medio de la manipulación deducen conceptos implicados. (Julio Enrique Duarte, Guerly Gutierrez, Flavio Fernandez Morales, 2007) .

El diseño e implementación de un prototipo didáctico debe incluir los siguientes componentes pedagógicos:

- Identificar el concepto científico a resolver.
- Se debe tener en cuenta para qué y para quien es el prototipo.
- Establecer los preconceptos de la temática.
- Conceptos e ideas que se quieren transmitir.
- Que sea llamativo e impactante.
- Los conceptos estudiados se integren en la comprensión con la realidad.
- Seguridad a la hora de la manipulación.

(Julio Enrique Duarte, Guerly Gutierrez, Flavio Fernandez Morales, 2007)

La construcción del prototipo deberá tener las siguientes fases:

- Revisión bibliográfica (contenido teóricos y conceptuales).
- Desarrollo del prototipo (diseño, construcción, prueba y puesta en laboratorio).

(Julio Enrique Duarte, Guerly Gutierrez, Flavio Fernandez Morales, 2007)

6.2 Funciones estructurales

Son las diferentes cargas, reacciones y comportamientos que se generan en todas las estructuras en general, estas son las que llegan a generar grandes impactos sobre estas y a la hora de diseñar las estructuras se deben tener en cuenta para que no se vean afectadas. (Zerpa, 2014)

6.2.1 Orígenes de las cargas

“Se refiere a cualquier efecto que resulte la necesidad de cierto esfuerzo resistente por parte de la estructura”. (Ambrose, 1998) Las principales cargas y orígenes son:

- Gravedad
- Viento.
- Terremotos (impacto sísmico).
- Presión hidráulica.
- Presión del suelo (activa).
- Cambio de temperatura.
- Cálculo.
- Dirección y sentido.
- Contracción.
- Vibración.

- Acciones internas.
- Manejo.

6.2.2 Cargas muertas y vivas

Una carga muerta es fija, hace referencia del peso estructural y una carga viva es aquella que no es permanente en la estructura, son fuerzas que actúan sobre la estructura por lo tanto son cargas de diseño “*la forma de cargas gravitacionales distribuidas sobre la superficie de techo y piso, debidas a la ubicación y al uso particular de la estructura*”. (Ambrose, 1998)

6.2.3 Reacciones

Las reacciones son aquellas fuerzas en los apoyos que permiten la estabilidad, rigidez y resistencia interna de la estructura, esto permite que no se generen esfuerzo en el material ni deformaciones excesivas por lo tanto los apoyos son muy importantes debido a que estos son los que permiten que la estructura no se mueva o colapse.

6.3 Ley de Hooke

Al aplicarse una fuerza determinada a un determinado cuerpo esta tiende a deformarse y de igual manera tiende a recuperar su estado inicial lo que se denomina elasticidad.

Esta ley propone el vínculo entre magnitudes que contribuyen en un fenómeno físico de forma cuantitativa y cualitativa, lo que indica que determina el “*límite de tensión elástica de un determinado cuerpo sea directamente proporcional a una fuerza aplicada.*” (Cevera & Blanco, 2001)

“En un elevado número de cuerpos, si las fuerzas no sobrepasan determinados valores, las deformaciones permanentes son muy pequeñas, y, en consecuencia, dichos cuerpos pueden considerarse elásticos”. (Cevera & Blanco, 2001)

La ley de Hooke es expresada de la siguiente manera:

$$\delta = k P$$

P: Fuerza aplicada

δ : Desplazamiento

Se visualiza en la gráfica No.1 donde se logra visualizar cada una de las etapas que esta conlleva identificando este comportamiento con la curva No.3 la cual es donde se logra identificar que no hay una deformación permanente, generando el límite plástico y posteriormente si la carga excede este límite se general *“deformaciones permanentes y se indica que el comportamiento no es perfectamente elástico”*. En esta misma grafica donde se encuentra Q y R son los *“limites proporcionales”* porque para cargas menores *“los desplazamientos son proporcionales a las fuerzas que lo originan”*, tienen como comportamiento elástico lineal y es conocido como Ley de Hooke. (Mazurek, Eisenberg, Beer, & Johnston, 2010)

Si las fuerzas de deformación generadas superan el *“límite de elasticidad”* en este caso no se podrá emplear la Ley de Hooke. (Nonnast, 1993)

6.3.1 Módulo de elasticidad

La importancia de esta propiedad para la ingeniería donde se pueden evidenciar varios tipos de características de los materiales cuantos estos se encuentran sometidos a fuerzas externas. Donde podemos evidenciar y conocer los puntos frágiles y fuertes de los elementos. Y podemos estudiar el comportamiento básico de módulos de elasticidad. Y tomando como ayudas

elementos de medición para tomar la información de prácticas laboratorio. Y dar caracterizaciones de las propiedades y su comportamiento.

“La propiedad que relaciona la deformación elástica con la tensión es el módulo de elasticidad, que tiene diferentes definiciones dependiendo del tipo de carga o fuerza aplicada. Además de los módulos elásticos, la resistencia mecánica y la ductilidad (en el caso de materiales metálicos) son propiedades igualmente importantes”. (Antico, 2008)

Comúnmente los materiales se seleccionan para diferentes aplicaciones, como las estructurales. Pues por las diferentes combinaciones mecánicas de los materiales donde encontramos resistencia, durabilidad y economía en busca de minimizar el uso de los recursos. Aquí entra en actuación los ingenieros estructurales donde su papel es determinar los comportamientos teóricos de los materiales al momento de que estos se encuentran sometidos a fuerzas o cargas externas que estén definidas. Podemos estudiar estos comportamientos a través de estudios experimentales, teóricos o matemáticos.

La relación entre esfuerzo tensor, esfuerzo normal y esfuerzo tangencial con sus deformaciones ejerce una parte significativa en la *“rama de la física denominada resistencia de materiales”*. Al graficar el esfuerzo en función a la deformación, se encuentra que el diagrama obtenido esfuerzo-deformación expone formas diferentes” ya que cada una de las gráficas están basadas en los diferentes materiales existentes, cada uno de estos tiene un comportamiento diferente respecto a su nivel de resistencia. (Cevera & Blanco, 2001)

En este módulo se pueden representar diferentes etapas como lo es el límite de proporcionalidad donde el esfuerzo y la deformación son proporcionales, este segmento es considerado Ley de Hooke, el Comportamiento elástico, la deformación reversible es cuando el material después de estar sometido a una carga vuelve a su forma original, se recupera de la

deformación. Después de esta etapa está sometido a más carga el material no vuelve a su estado original lo que indica que el material presenta una deformación permanente. Por último, si es agregada más carga se genera una mayor deformación y es allí se produce la fractura y se dice que es una “*deformación plástica*”. (Antico, 2008)

“Una deformación plástica es irreversible si la deformación plástica entre el límite de elasticidad y el punto de falla es grande”; y el punto de falla tiene lugar después del límite de elasticidad, el material llega a fracturarse. (Castro, 2009)

En el diseño de la mayoría de las estructuras se realiza para que sufran pequeñas deformaciones.

El módulo de elasticidad es representado gráficamente por el esfuerzo Vs deformación y su ecuación es:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1}$$

6.3.2 Modulo de corte

Este módulo representa la rigidez de un elemento y/o material, es la relación que se establece entre el esfuerzo de corte y la deformación de corte, es la diferencia entre la longitud final y la inicial.

El módulo de corte o rigidez es representado por (G) las unidades son las mismas que las del esfuerzo (adimensional), en la mayoría de los casos el resultado obtenido es la mitad o 1/3 del módulo de elasticidad lo que indica que estos dos módulos están relacionados de la siguiente manera:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Donde ν es el módulo de Poisson lo cual es una constante elástica del material que es 0,33.

Las tensiones de corte están relacionadas con las fuerzas que se aplican externamente que puede ser aplicada paralelamente a una superficie.

6.3.3 Esfuerzo y deformación

“Las acciones de fuerza interna son resistidas por esfuerzo en el material de la estructura. Hay tres tipos básicos de esfuerzo: tensión, compresión y cortante.” (Ambrose, 1998). La tensión y la compresión originan un tipo lineal de deformación; la tensión y el esfuerzo de compresión se denominan esfuerzos directos, unos se consideran positivos y los otros negativos. (Ambrose, 1998)

6.3.4 Relación esfuerzo-deformación

Anteriormente se estableció que era esfuerzo y deformación, pero no se hizo la respectiva relación entre estos dos fenómenos. En la siguiente grafica No.1 se identifica los 3 tipos básicos de relaciones esfuerzo-deformación., cada una de estas se refiere a la respuesta del material como:

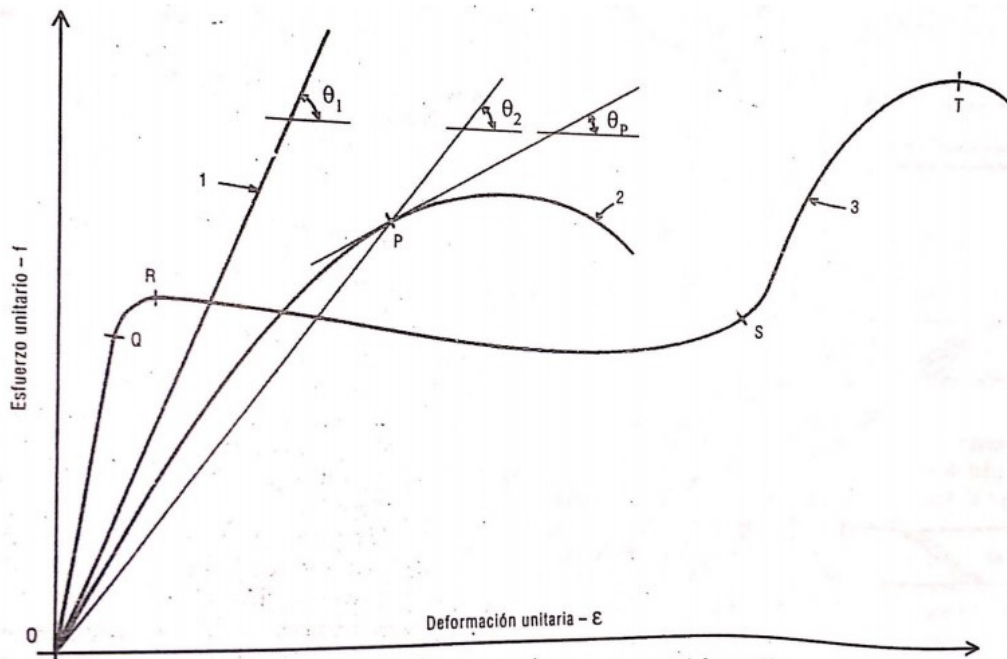
- Comportamiento elástico: Esfuerzo y deformación es proporcionalmente constante.
- Comportamiento inelástico: El esfuerzo y la deformación no son constantes en el lapso de incremento de esfuerzo.
- Comportamiento plástico: El incremento de la deformación es relativamente constante al esfuerzo. (Brotons, 2009)

En la Grafica No.1 se puede observar que la curva No. 1 representa un material elástico. Para hallar el módulo de elasticidad se realiza definiendo la pendiente la cual es la relación de esfuerzo a deformación. Este módulo se denota como E . (Ambrose, 1998)

$$E = \text{Tan } \theta = \frac{\text{Esfuerzo}}{\text{Deformacion}}$$

En la curva No. 2 representa un material como la madera o el concreto, estos materiales tienen la relación de esfuerzo a deformación la cual es variada continuamente en el intervalo del esfuerzo. Con esta curva no se puede establecer un valor E . (Ambrose, 1998)

En la curva No. 3 “representa la forma general de respuesta a la tensión del acero de grado específicamente ordinario”. (Ambrose, 1998)



Grafica 1 Formas del comportamiento esfuerzo-deformación

Fuente: Adaptada de (Ambrose, 1998)

Tabla 1 Valores del módulo de elasticidad (E) para materiales estructurales comunes

Material	E		Tipo de esfuerzo
	kilolibras/pulg ²	Gpa	
Acero	29000	200	Tensión, compresión
Aluminio (aleaciones estructurales)	10000	70	Tensión, compresión
Concreto (agregado de roca)	3.0- 5000	20-35	Compresión
Madera (abeto Douglas)	1.5-2000	10-14	Tensión, compresión paralela al grano
Plástico			
Duro (acrílico)	1000	7	Tensión, compresión
Suave (vinilo)	350	2.4	Tensión, compresión

Fuente: Elaboración propia adaptada de (Ambrose, 1998)

6.3.5 Círculo de Mohr

Estudiado por Christian Otto Mohr (1835-1918), “el círculo de Mohr es un procedimiento gráfico para designar el estado tensional de distintos puntos en un cuerpo, las tensiones que existentes en un cuerpo sometido a un estado de cargas y con ciertas restricciones, allí las tensiones de corte son nulas”. (Antico, 2008)

De igual forma ayuda a la interpretación gráfica de los esfuerzos en elementos que se encuentran sometidos a fuerzas externas. Donde estos esfuerzos pueden variar si las fuerzas externas que están actuando sobre un elemento varían. Donde podemos encontrar unos esfuerzos máximos. Se pueden representar en una gráfica x, y. se grafican los datos de esfuerzos y sus deformaciones. Conociendo el momento de falla. Y graficando así antes de esta.

Al momento de trazar el círculo se pueden determinar otros valores de tensión que están presentes por los esfuerzos de los elementos los cuales sobre estos están actuando fuerzas

externas. Se identifica en el plano que en los ejes están presentes las deformaciones y esfuerzos que se encuentran en estudio.

6.4 Diseño con respecto al comportamiento estructural

La información del comportamiento estructural es relevante para el proceso de diseño. Para incorporar esta investigación al trabajo de diseño, el proyectista necesita lograr algunas capacidades, incluyendo las siguientes:

1. *“Capacidad de concebir y evaluar las fuentes que producen cargas sobre la estructura”*. (Construction, 2019)
2. *“Capacidad para analizar la respuesta de la estructura a las cargas en términos de fuerza, esfuerzo y deformaciones”*.
3. *“Habilidad para determinar los límites de capacidad de la estructura para soportar cargas”*. (Construction, 2019)
4. *“Capacidad para manejar las variables de materiales, formas y detalles de construcción para la estructura, a fin de optimizar sus respuestas a las cargas”*. (Construction, 2019)

6.5 Materiales estructurales

Son usados e implementados materiales útiles, se puede hacer amplias clasificaciones con diversas propiedades químicas y físicas que distinguen unos materiales de otros. Las características estructurales son:

- *“Resistencia: varia para los diversos patrones de fuerzas, en diferentes orientaciones, en diferentes valores de temperatura o contenido de humedad”*. (Brotons, 2009)

- *“Resistencia a la deformación: Grado de rigidez, elasticidad, ductilidad; variación con el tiempo, la temperatura, etc.” (E.Gustin, 1980)*
- *“Dureza: Resistencia al corte de las superficie, raspaduras, abrasión o desgaste.” (E.Gustin, 1980)*
- *“Resistencia a la fatiga: pérdida de la resistencia con el tiempo; fractura progresiva; Cambio de forma con el tiempo”. (Nozada, 2018)*

“Las propiedades generales de uso y evaluación de materiales estructurales incluyen forma, peso, resistencia al fuego, coeficiente de expansión, durabilidad, trabajabilidad, apariencia y disponibilidad”. (Clement, 2010)

Es importante para la elección del material tener cuenta las propiedades estructurales y generales, estas indicaran cual es el material apto para realizar la estructura.

Tabla 2 Ventaja, desventaja y uso de materiales estructurales

Material	Uso	Ventaja	Desventaja	Referencia
Madera	Se usa ampliamente para construcción secundaria, permanente y temporal, andamios contravientos, cimbra para concreto colado	-Suave. -Bajo costo. -Facilidad para trabajarla.	-Daños con facilidad. -Infestación de insectos. -Podredumbre	(Ambrose, 1998)
Acero		-Versátil - Fuerte.	-Alto costo.	(Ambrose, 1998)

	Es utilizado para enormes columnas hasta pequeños clavos.	-Resistente al envejecimiento. -Confiable en cuanto a calidad.	-Rápida adsorción al calor. -Pérdida de resistencia cuando se expone a fuego. -Corrosión	
Concreto	Construcción de diferentes estructuras (autopistas, puentes, pistas de aterrizaje, muelles, aceras etc.)	-Bajo costo. -Resistente a la humedad, oxidación, los insectos, el fuego y el desgaste.	- Falta de resistencia al esfuerzo de la tensión.	(Ambrose, 1998)
Aluminio	Es utilizado para gran variedad de elementos estructurales, decorativos y funcionales como son: - Tableros.	-Peso ligero. -Alta resistencia a la corrosión. - Moldeo en producción.	-Suavidad. -Baja rigidez. - Expansión térmica. - Baja resistencia. -Costo relativamente alto.	(Ambrose, 1998)

	<ul style="list-style-type: none"> - Recubrimiento de muros y techos. - Marcos de puertas y ventanas. 			
Mampostería	En la construcción tradicional (muros en las estructuras)	-Resistencia a sismos.	<ul style="list-style-type: none"> -Contracción del mortero. -Agrietamiento por expansión térmica. 	(Ambrose, 1998)
Plástico	<ul style="list-style-type: none"> -Revestimiento. -Adhesivo. -Elementos moldeados. -Espumas (aislante o rellenos). 	<ul style="list-style-type: none"> -Bajo costo. -Sustitución de materiales convencionales (vidrio). 	<ul style="list-style-type: none"> -No es resistente al fuego. -Escasa. -Grandes variaciones por expansión térmica. -Inestabilidad química o física con el tiempo. -poca durabilidad. 	(Ambrose, 1998)

Fuente: Elaboración propia adaptada de (Ambrose, 1998)

6.5.1 Aluminio

En la tabla No. 2 encontramos la generalidad de los materiales que son utilizados en las estructuras, pero especialmente nos enfocamos en el aluminio debido a que este es el material en que se fabricó nuestro prototipo.

El aluminio es uno de los materiales más ligeros, versátil y ligero *“con una densidad de aproximadamente 1/3 de la del acero; Esta relación de 1/3 también es válida para el módulo de elasticidad, que a menudo se toma como unos 70GPa (10.000 ksi) para el aluminio. Su resistencia y otras propiedades mecánicas, que son muy bajas en su estado puro, pueden mejorarse por aleación y tratamiento térmico, como es el caso de acero”*. (Nonnast, 1993)

Principalmente para mejorar su resistencia se utiliza la aleación con cobre, manganeso, silicio, magnesio y zinc, cada uno de estos materiales aporta diferentes características al aluminio haciendo que mejoren sus propiedades mecánicas.

6.6 Armaduras

“Las armaduras están compuestas de elementos rectos y unidos en sus extremos por conexiones articuladas para formar una configuración estable”. (Kassimall, 2015)

El material de construcción usado comúnmente para este tipo de estructuras es la madera o barras metálicas. Cuando es aplicada una fuerza a la estructura, los nodos estarán sometidos a tensión o compresión uniforme. *“La armadura debido a su poco peso, pero de gran resistencia se encuentra en una de las estructuras más utilizadas”*. (Clement, 2010)



Para que las armaduras sean una estructura estable debe satisfacer con cualquiera de los siguientes requisitos:

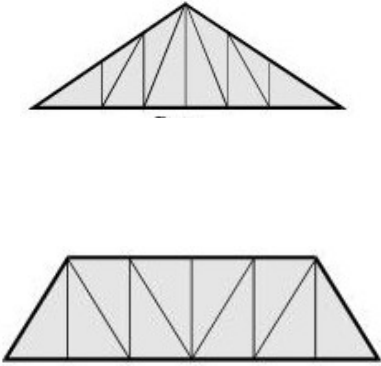
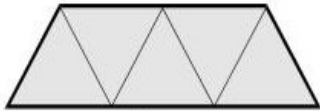
1. Uso de las juntas rígidas, lo que permite cortante y flexión en los cada uno de los miembros de la estructura y movimiento o deflexiones cuando está sometida a cargas laterales.

2. Para estabilizar una estructura se debe realizar “*por medio de arreglos de los miembros con patrones de triángulos coplanares o tetraedros lo que se llama celosía.*” (Crisafulli, 2018)

6.6.1 Tipos de armaduras

Tabla 3 Tipos de armaduras, origen y características principales

<p>Armadura Long</p>		<p>Origen en 1835 por el ingeniero Stephen H. Long.</p>	<p>Cordon superior e inferior horizontal se unen mediante montones verticales arriostrado por diagonales doble, de esta forma se aumenta la rigidez.</p>
<p>Armadura Howe</p>		<p>Patentada en 1840 por William Howe</p>	<p>Son barras inclinadas en sentido contrario , de forma que las diagonales se someten a traccion y las verticales a compresión</p>

<p>Armadura Pratt</p>		<p>Diseñada en 1844 por Thomas y Caleb Pratt</p>	<p>Las diagonales se unen en sus extremos haciendo que encajen un poste con el cordón superior o inferior. Las diagonales están sometidas a compresión y el montante a tracción.</p>
<p>Armadura Warren</p>		<p>Patentada en 1848 por James Warren y Willboughby Monzoni</p>	<p>Esta conformada por triángulos isosceles o equiláteros, lo que indica que cada diagonal tiene la misma longitud</p>

Fuente: Elaboración propia adaptada de (arancibia, 2010) y (Mazurek, Eisenberg, Beer, & Johnston, 2010)

6.6.2 Uniones



REMACHES O ROBLONES

- Su funcionamiento se basa en introducirse a través de las piezas a unir, previamente perforadas con taladro y así introducido se forme una segunda cabeza para que efectúe el cierre de la unión.
- En uniones estructurales son mayormente utilizados los remaches cabeza semiesférica.
- Fueron utilizados para las uniones estructurales durante muchos años.
- Deben cumplir con la norma ASTM A502.



ATORNILLADO

- Son utilizados para formar uniones desmontables.
- Se diferencian tres tipos de tornillos que son: Tornillo ordinario, Tornillo calibrado y tornillo de alta resistencia.
- Son utilizados principalmente con arandelas para que la cabeza del tornillo no sobrepase el agujero y esta le de un mejor agarre.
- Cada tipo de tornillo estructural debe cumplir con las siguientes normas: ASTM A449-A325-A490-A307



SOLDADURA

- Consiste en unir dos piezas mediante una impecable unión entre ellas, de forma que la unión quede rígida.
- Método más antiguo es el de soldadura por forja.
- Existen más de cuarenta sistemas para soldar pero el más utilizado en las estructuras metálicas es por fusión.
- Soldadura por medio de fusión, se funde los extremos del objeto y al solidificarse se genera la unión.

Fuente: Elaboración propia adaptada de (Iranzo, 2007) (McCorman & Csernak, 2012) (IMCA, 2002)

6.6.3 Apoyos

Los apoyos son los que restringen los movimientos de una determinada estructura y permite la transmisión de esfuerzo directamente a los cimientos, lo que indica que son importantes debido a que en estos son donde la estructura va a descargar todo su peso y por ello se debe comprender el comportamiento y la influencia sobre la estructura. En el caso del diseño del prototipo que se realizó la armadura se encuentra simplemente apoyada.

En la ilustración No. 8 se visualiza los diferentes tipos de apoyos o enlace con su respectiva reacción y la cantidad de incógnitas.

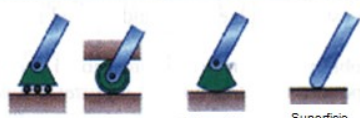

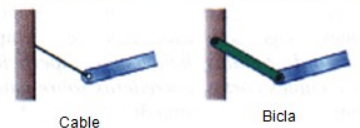



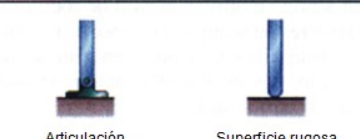
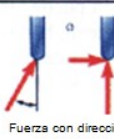


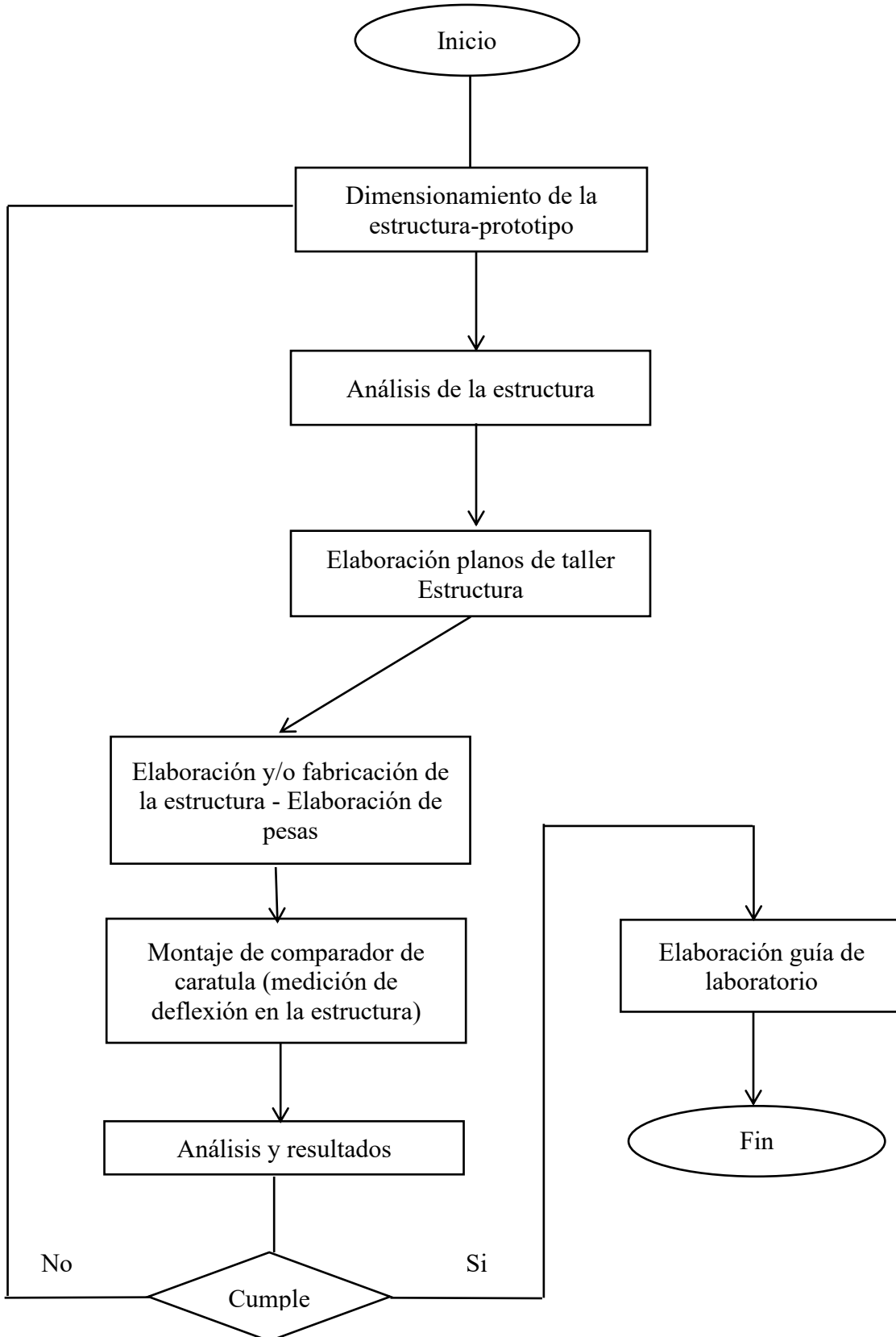
Apoyo o enlace	Reacción	No. de incógnitas
 <p>Rodillos Balancín Superficie lisa</p>	 <p>Fuerza con recta soporte conocida</p>	1
 <p>Cable Bicla</p>	 <p>Fuerza con recta soporte conocida</p>	1
 <p>Corredera o cursor Pasador en ranura lisa</p>	 <p>Fuerza con recta soporte conocida</p>	1
 <p>Articulación Superficie rugosa</p>	 <p>Fuerza con dirección desconocida</p>	2
 <p>Empotramiento</p>	 <p>Fuerza y par</p>	3

Ilustración 8 tipos de apoyos

Fuente: adaptada de (Mazurek, Eisenberg, Beer, & Johnston, 2010)

7. METODOLOGIA



7.0.1 Dimensionamiento estructura

El principal objetivo ha sido estudiar el comportamiento de una estructura en celosía cuando se encuentra sometida a cargas verticales, este tipo de configuraciones son usadas en puentes, cerchas, cubiertas etc.

Son implementadas cuando hay claros grandes, este tipo de configuraciones ayudan a dirigir las fuerzas o esfuerzos a los que se encuentran a cada uno de los elementos y nodos que la componen.

7.0.2 Análisis de la estructura

Se realizó por medio del programa SAP200, teniendo en cuenta las condiciones de la disposición física y las cargas para el análisis, buscando una estructura eficiente que trabaje armónicamente con las solicitaciones a las cuales será sometido la estructura o prototipo.

La estructura se analizó con perfiles en aluminio y elementos angulares comerciales en el mercado. El propósito del análisis es hallar la resistencia estructural para resistir cargas verticales para estudiar los esfuerzos de la estructura y así lograr llevarla a la falla.

El proceso fue construir tres estructuras, dos de estas llevarla a la falla para así representar los modelos de esfuerzo vs deformación. La otra estructura es un aporte para el laboratorio para su estudio, donde no solamente es verificar los modelos de esfuerzo-deformación, sino que también se podrá visualizar cada uno de sus elementos como lo son sus uniones, tipo de estructura, tipo de apoyo para tener una idea del funcionamiento de este tipo de estructuras que se utilizan cotidianamente en diferentes infraestructuras a nivel mundial.

A continuación, se representa el análisis realizado en el software de diseño, teniendo en cuenta solo las cargas verticales a la que será sometida la estructura.

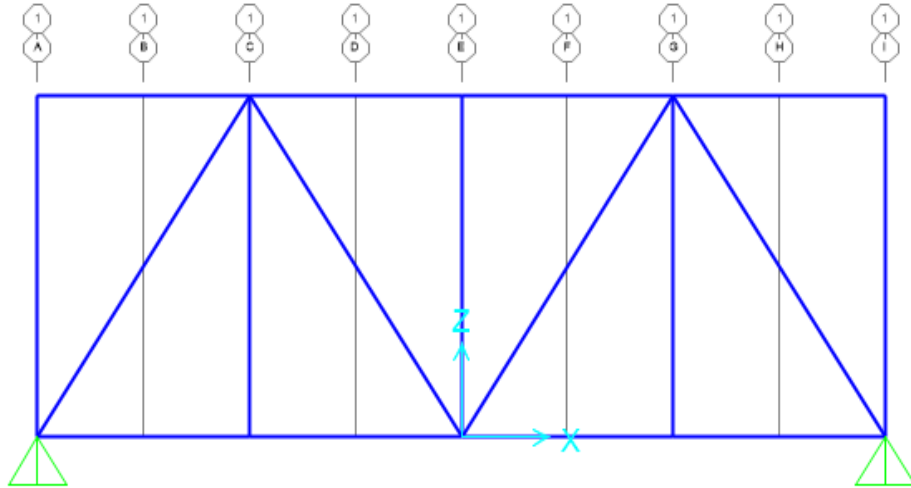


Ilustración 9 Silueta estructural idealizada

Fuente: Elaboración propia

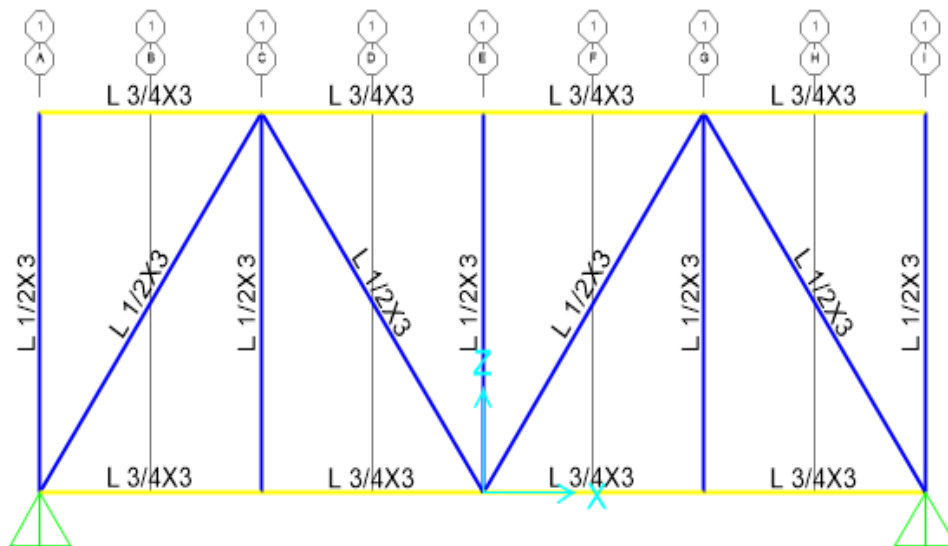


Ilustración 10 Secciones de elementos

Fuente: Elaboración propia

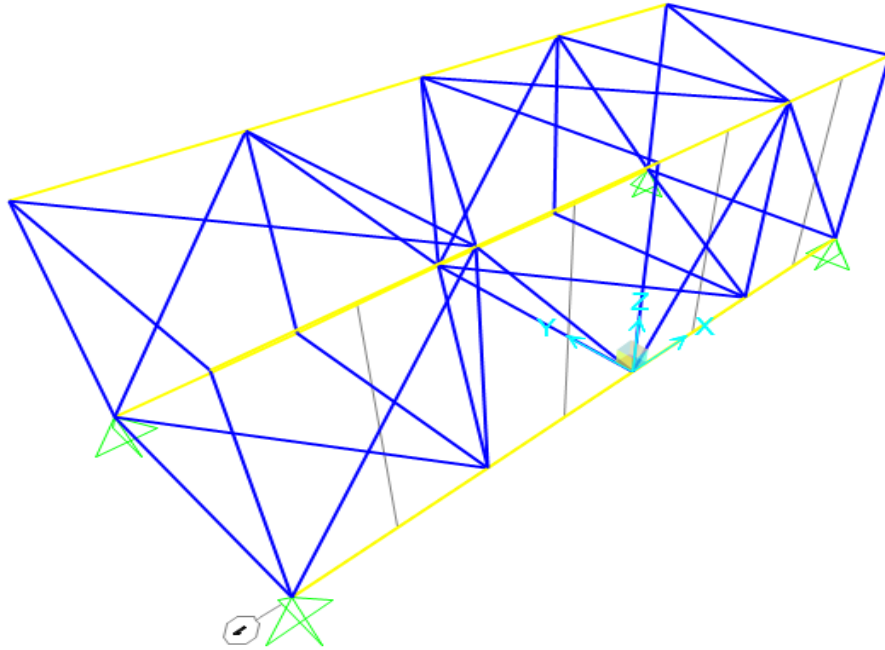


Ilustración 11 Vista isométrica estructura

Fuente: Elaboración propia

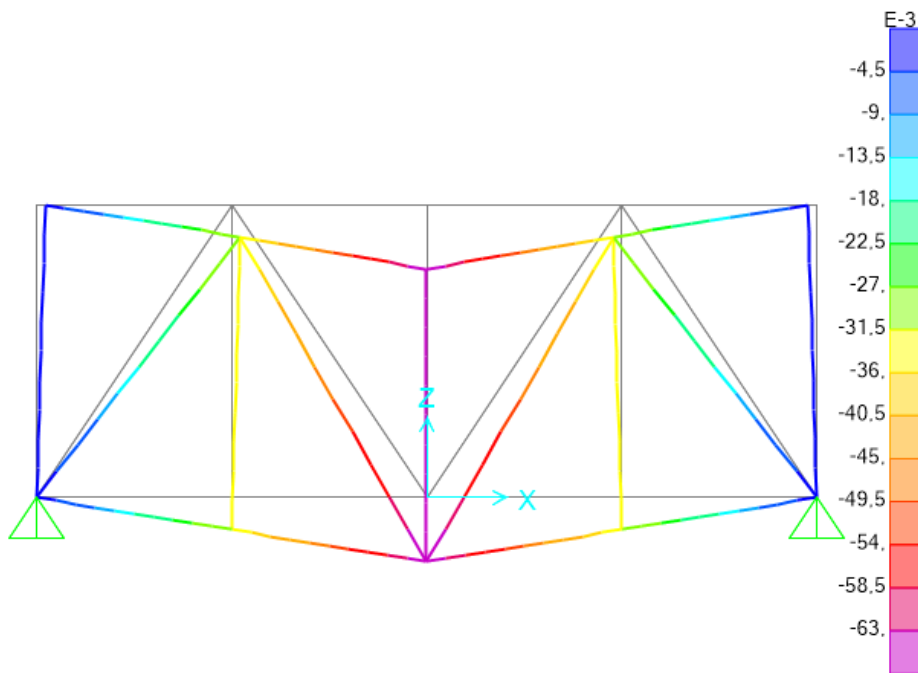


Ilustración 12 Comportamiento estructura sometida a carga vertical

Fuente: Elaboración propia

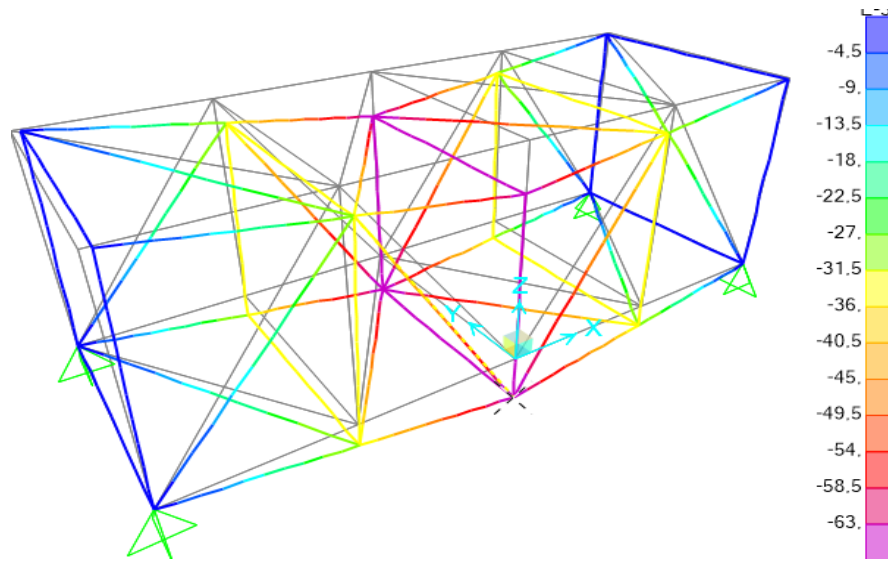


Ilustración 13 Vista isométrica deformación de estructura

Fuente: Elaboración propia

Propiedades mecánicas del aluminio

- Sección de los elementos= L19.1X2mm L12.7x2mm
- Área sección transversal = 76mm² 52mm²
- Módulo de elasticidad = 6900kg/mm²

7.0.3 Realizar planos de estructura

Terminado el análisis de la estructura y la definición de elementos se procede a la realización de los planos de taller para la fabricación del prototipo, de acuerdo con el diseño propuesto.

Al momento del diseño de la silueta es idealizada, donde cada uno de los elementos llegan a los nodos, pero al momento de la realización de los planos constructivamente los

elementos no ensamblan en el mismo nodo por tal motivo la conexión diseñada. (ver plano en anexos).

7.0.4 Construcción del prototipo

Compra de los materiales, tomando como partida la lista de materiales prevista en los planos de taller para la elaboración de la estructura. Se tendrán herramienta como la remachadora y remaches para el anclaje de los elementos angulares de la estructura.

Altura	520
Ancho	319
Largo	870
Longitud Diagonales	352
Cantidad de uniones	88
Total, de remaches	88
Peso de la estructura	1Kg

Como primer paso se realizó el corte de material, los perfiles utilizados son ángulos en aluminio de $\frac{3}{4}$ " para las cuerdas inferior y superior, aluminio de $\frac{1}{2}$ " para diagonales.

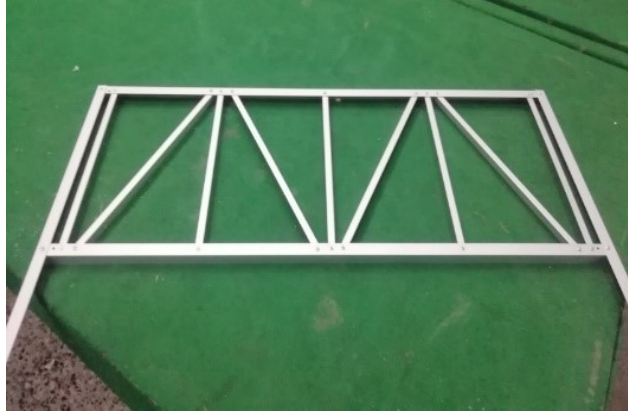


Ilustración 14 Vista frontal y posterior de estructura

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 15 Estructura tipo Warren (prototipo)

Fuente: Elaboración propia

7.0.5 Elaboración de pesas en concreto

Como primer paso se calculó el volumen de mezcla que se requiere para elaborar una pesa de 10Kg y se utilizó tubo de 6 pulgadas.



Ilustración 16 Tubo 4 pulgadas para pesas

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 17 Recorte de tubo para pesa

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 18 Forma de pesas tubo 4 pulgadas

Fuente: Elaboración propia

Se realizó corte de tubo de 4 pulgadas cada uno de 15cm para elaborar 10 pesas de 10Kg con un peso total de 100Kg, de igual forma se realizaron pesas adicionales con arena que tenían un peso de 2 Kg, 3 Kg, 5 Kg y 6 kg, el cual la estructura tipo Warren soportará como carga vertical y permitirá realizar las pruebas de laboratorio con el fin de realizar el análisis de los módulos de esfuerzo Vs deformación de la estructura y analizar el material empleado.

7.1 Ensayo de laboratorio

Se realizó previamente una verificación teniendo en cuenta cada una de las cargas estructurales que estará sujeta, el análisis se realizó mediante el programa o software SAP2000 teniendo en cuenta su peso propio; por medio del programa se conocieron las fuerzas internas, reacciones en los apoyos, deflexiones en los elementos y por medio teórico (análisis de estructuras indeterminadas).

En el ensayo de laboratorio se consideraron cada uno de los elementos empleados para luego así lograr tener resultados óptimos para su respectivo análisis.

Comparador de caratula

El comparador de caratula (Dial gage) “*instrumento de medición en el cual un pequeño movimiento del husillo se amplifica mediante un tren de engranes que mueven en forma angular una aguja indicadora sobre la caratula del dispositivo, la aguja indicadora puede dar tantas vueltas*” (Edgar Muñoz Díaz, 2007)

Al ser un dispositivo de comparación, es necesario estar sostenida a la base de referencia (base magnética).

Estos instrumentos ayudaran a medir la deformación de la estructura cuando esta se encuentre sometida a las cargas verticales. La precisión es de 0.01mm.



Ilustración 19 Comprador de caratula

Fuente: Elaboración propia

Soporte base magnética



Ilustración 20 Montaje comparador de caratula

Fuente: Elaboración propia.

La base magnética es necesaria para la sujeción del comparador ya que da una fijación al aparato y por ende en la precisión de los datos que se pretenden medir y analizar.

7.1.1 Procedimiento

Como primer paso se coloca la estructura en una parte alta para darle espacio al momento de posicionar cada pesa, se instala el comparador de caratula de manera que esté perpendicularmente al cordón inferior de la estructura.

Antes de empezar a colocar las pesas se debe verificar que la aguja principal del comparador de caratula este en cero y también se tiene que tener en cuenta el posicionamiento del gancho para la sujeción de las pesas.



Ilustración 21 Montaje de la estructura

Fuente: elaboración propia

Se procede a colocar una a una las pesas en el gancho para visualizar su deformación en el comparador de caratula.

Es importante recalcar que a medida que se fue colocando las pesas se realizó la lectura del comparador.



Ilustración 22 Montaje de estructura y lectura del comparador de caratula con 30 Kg

Fuente: elaboración propia

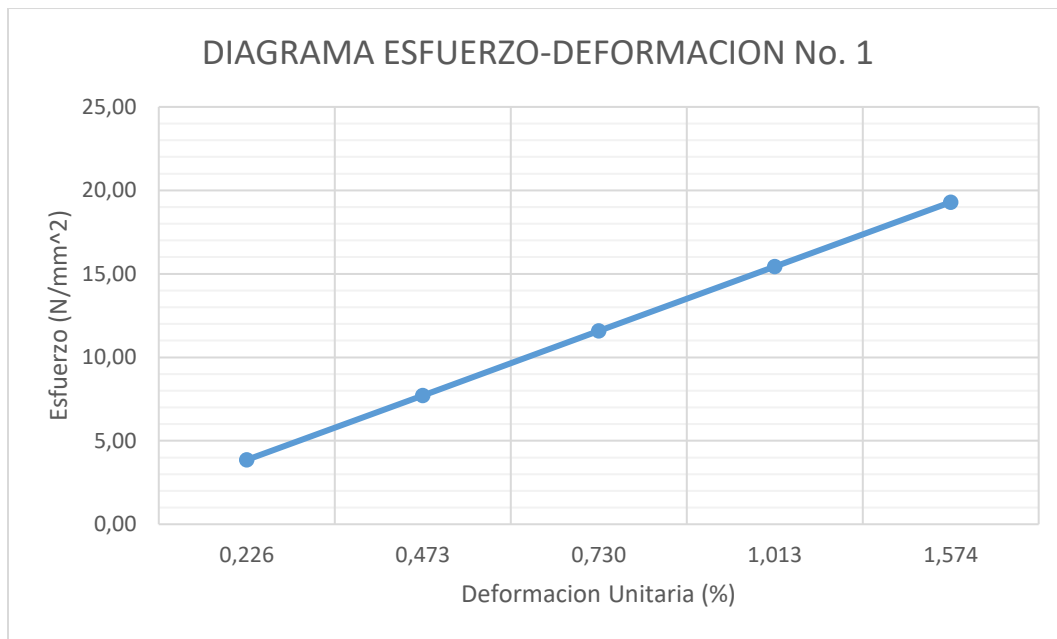
7.1.2 Datos obtenidos estructura No. 1

Se realizaron dos ensayos donde en el primero ensayo se aplicaron cargas constantes y esto llevo a una falla repentina como se visualiza en la ilustración 26.

Tabla 4 Datos obtenidos ensayo estructura No.1

ENSAYO ESTRUCTURA No. 1						
No. CARGA	CARGA (kg)	CARGA (N)	ENLONGACION (mm)	ESFUERZO (N/mm ²)	DEFORMACION UNITARIA (mm/mm)	DEFORMACION UNITARIA (%)
1	10	98	0,72	3,86	0,002257053	0,226
2	20	196	1,51	7,72	0,004733542	0,473
3	30	294	2,33	11,57	0,007304075	0,730
4	40	392	3,23	15,43	0,010125392	1,013
5	50	490	5,02	19,29	0,015736677	1,574

Fuente: Elaboración propia



Grafica 2 Esfuerzo Vs Deformación ensayo estructura No.1

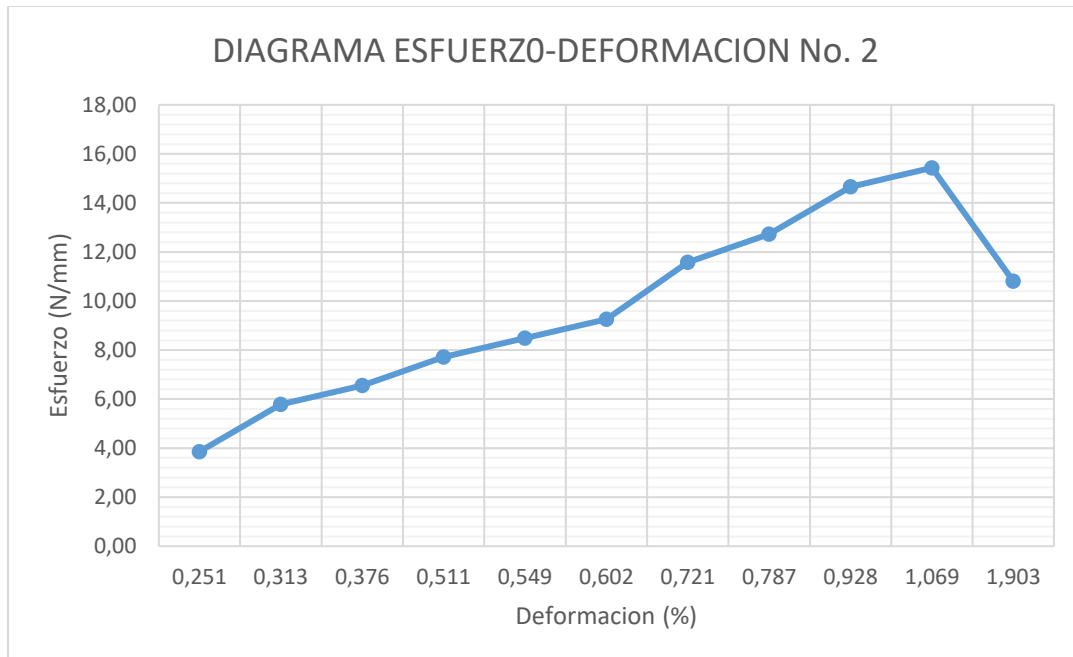
Fuente Elaboración propia

7.1.3 Datos obtenidos estructura No. 2

En el segundo ensayo se aplicaron cargas variables teniendo así un total de once cargas, logrando identificar cada uno de los componentes de la curva de esfuerzo Vs deformación.

Tabla 5 Datos obtenidos ensayo estructura No.2

ENSAYO A ESTRUCTURA No. 2						
No. CARGA	CARGA (kg)	CARGA (N)	ENLARGACION (mm)	ESFUERZO (N/mm)	DEFORMACION UNITARIA (mm/mm)	DEFORMACION UNITARIA (%)
1	10	98	0,8	3,86	0,002507837	0,251
2	15	147	1	5,79	0,003134796	0,313
3	17	166,6	1,2	6,56	0,003761755	0,376
4	20	196	1,63	7,72	0,005109718	0,511
5	22	215,6	1,75	8,49	0,005485893	0,549
6	24	235,2	1,92	9,26	0,006018809	0,602
7	30	294	2,3	11,57	0,007210031	0,721
8	33	323,4	2,51	12,73	0,007868339	0,787
9	38	372,4	2,96	14,66	0,009278997	0,928
10	40	392	3,41	15,43	0,010689655	1,069
11	28	274,4	6,07	10,80	0,019028213	1,903



Grafica 3 Esfuerzo Vs Deformación ensayo estructura No.2

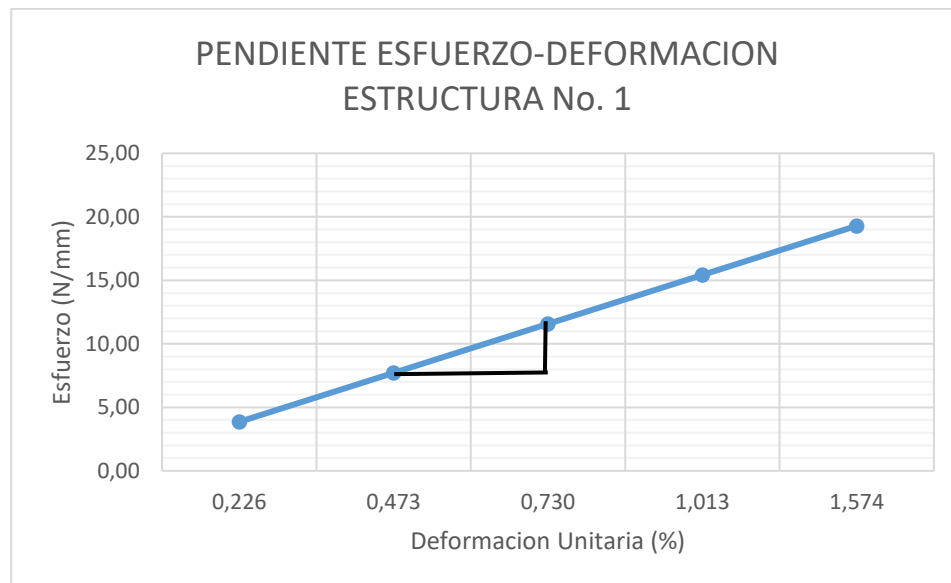
Fuente Elaboración propia

7.2 Análisis de resultados

Teniendo en cuenta los datos obtenidos anteriormente, se grafica la línea de tendencial lineal en cada una de ellas para luego hallar el módulo de elasticidad en cada estructura (Ley de Hooke) y el módulo de corte.

El coeficiente de Poisson que se utilizó en el módulo de corte para cada uno de los ensayos fue de 0,33.

El primer ensayo la gráfica que se obtuvo no hubo necesidad de graficar la línea de tendencia debido a que esta dio lineal, lo que indica que procedimos a hallar su pendiente y el punto máximo para si verificar el punto de falla.



Grafica 4 Pendiente ensayo estructura 1

Fuente Elaboración propia

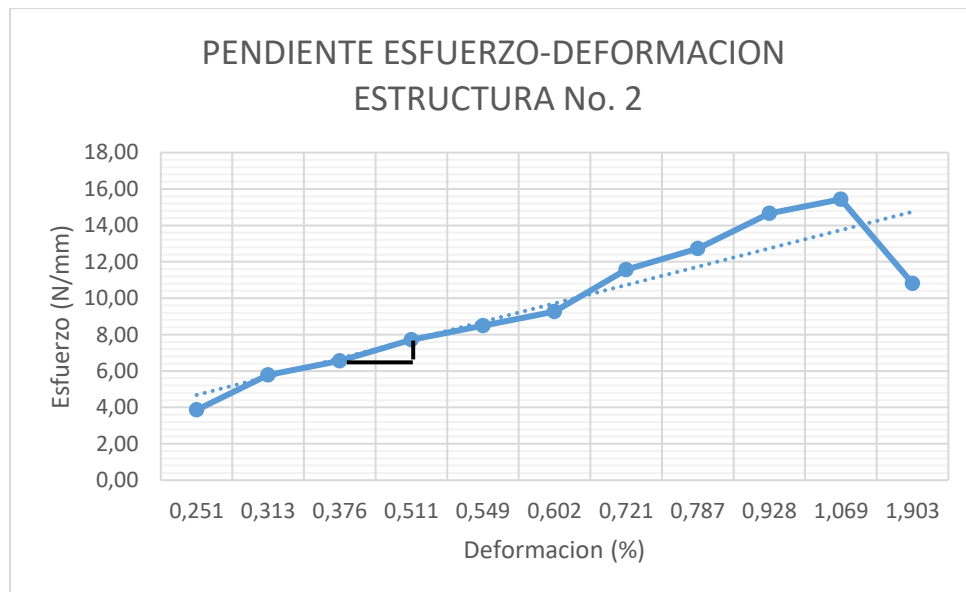
Teniendo en cuenta la gráfica su punto máximo es $\epsilon = 1,574 \text{ N/mm}^2$, los puntos en la recta tenemos:

$\sigma 1$	7,72 N/mm ²
$\sigma 2$	11,57 N/mm ²
$\epsilon 1$	0,00473 mm/mm
$\epsilon 2$	0,00730 mm/mm

$$E = \frac{11,57 - 7,72}{0,00730 - 0,00473} = 1498,05 \text{ N/mm}^2 \text{ Modulo de elasticidad}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{1498,05}{2(1+0,33)} = 563,18 \text{ N/m m}^2 \text{ Modulo de Corte}$$

En el segundo ensayo se graficó la línea de tendencia y se identificó su punto máximo lo cual es $\epsilon = 15,43 \text{ N/mm}^2$.



Grafica 5 Esfuerzo Vs Deformación ensayo estructura No.2 con línea de tendencia

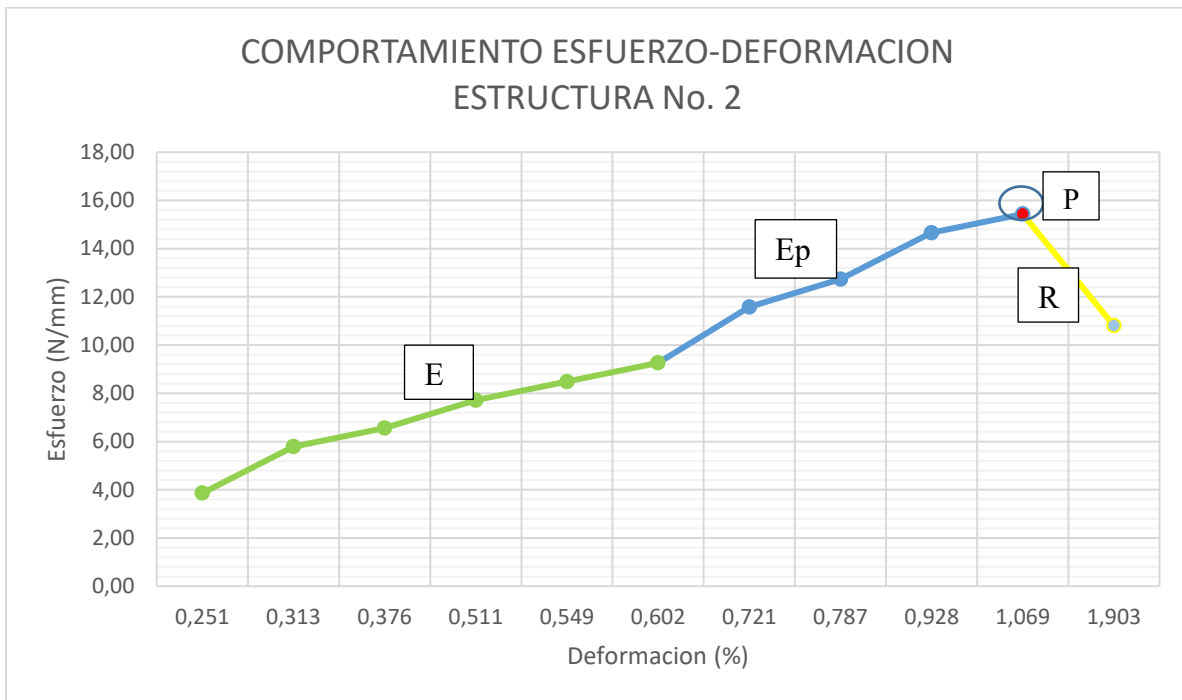
Fuente Elaboración propia

$\sigma 1$	6,56 N/mm ²
$\sigma 2$	7,72 N/mm ²

$\epsilon 1$	0,0038 mm/mm
$\epsilon 2$	0,00511 mm/mm

$$E = \frac{7,72-6,56}{0,00511-0,00376} = 892,30 \text{ N/m m}^2 \text{ Modulo de elasticidad}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{892,30}{2(1+0,33)} = 335,45 \text{ N/m m}^2 \text{ Modulo de corte}$$



Gráfica 6 Comportamiento esfuerzo- deformación ensayo estructura 2

Fuente Elaboración propia

En el intervalo color verde identificado con la E el material es elástico, este intervalo se caracteriza por ser la sección más recta del diagrama. El intervalo de color azul señalado con las letras Ep tiene la característica elastoplástica lo que indica que allí la estructura tiende

recuperarse o no recuperarse, en este caso la estructura tuvo tendencia a no recuperarse lo que quiere decir el punto P.

El punto P encontramos la plasticidad la cual indica un estado no recuperable del material ese es el punto máximo, es allí donde se genera la falla de la estructura. Por último, tenemos el tramo color amarillo que indica el comportamiento después de la falla llamado residual.

De igual forma se visualizó que la estructura No.2 tuvo efectos de torsión, la deformación que esta tuvo es llamado compresión diagonal lo que incito a un aplastamiento en espiral en algunas diagonales de la estructura llevándola al colapso.



Ilustración 23 Torsión en diagonal estructura No. 2

Fuente Elaboración propia



Ilustración 24 Vista frontal estructura No.2

Fuente Elaboración propia

8. CONCLUSIONES

A partir de la modelación en software de la armadura tipo Warren se verifico su comportamiento teórico y experimental.

Se fabricaron tres estructuras, dos de ellas para llevarla a la falla y la restante para el laboratorio de estructuras, su finalidad no solo es realizar la práctica de laboratorio, sino que también los estudiantes puedan tener un concepto acerca del comportamiento de la estructura y la importancia que tienen las uniones en este tipo armaduras.

Se evidencio que al momento de iniciar el ensayo se colocó una pesa en el nodo contrario donde se encontraba el aparato de medición y se visualizó que no genero ninguna deformación, esto se debe a que el elemento estaba trabajando a flexión en el cordón inferior y no afectaba al cordón opuesto de acuerdo a lo analizado y estudiado con las pruebas de carga.



Ilustración 25 Deformación en cero cordones opuestos sometidos a carga

Fuente Elaboración propia

Cuando la estructura No. 2 fallo se pudo identificar que se produjo por flexo-torsión ya que el peso se estaba aplicando únicamente en uno de los nodos, de igual manera la estructura No.1 fallo de forma repentina haciendo que el nodo donde se aplicó la carga constante se rompiera por completo.

En el tema de diseño se pudo identificar que se puede mejorar la estructura reforzándola con crucetas en vista transversal para que tenga mayor estabilidad y rigidez, para evitar que falle por torsión como se aprecia en la ilustración 26.



Ilustración 26 Falla por torsión

Fuente Elaboración propia

Se analizo visualmente la estructura y se evidencia que otra razón por la que produjo la falla fue por la conexión ya que algunas sufrieron agrietamientos y por esta causa los elementos podrían haber fallado como se evidencia en la ilustración 27



Ilustración 27 falla en conexiones

Fuente Elaboración propia

Por otra parte, lo que hace que la estructura tenga mayor rigidez y resista este tipo de cargas fueron las diagonales que son las que realizaron el mayor esfuerzo ya sea por tracción, compresión o flexo-compresión.



Ilustración 28 falla por flexo compresión

Fuente Elaboración propia

Se puede concluir que el comportamiento del aluminio a cargas constantes no se logra visualizar ningún tipo de agrietamientos, flexión, torsión en la estructura, sino que simplemente esta genera una flexión mínima y de repente una falla súbita.

Al realizar los 2 ensayos a las dos estructuras obtuvimos para cada una de estas el modelo de elasticidad y corte, los resultados prácticos son aproximados a los resultados teóricos cada uno de estos métodos ayudaron para verificar la resistencia del aluminio y de igual forma la estructura tiene una geometría que permite una rigidez optima, ya que puede llegar a resistir 40 veces más de su peso propio. Se Comprobaron los resultados obtenidos con el modelo de análisis realizado en el software (SAP200) y se concluye que los elementos fallaron por compresión.

De igual manera se logró obtener un prototipo didáctico de una armadura tipo Warren para que los estudiantes tengan una visión amplia del comportamiento de este tipo de estructuras y como puede llegar a tener un funcionamiento armónico al momento que se aplican las cargas.

9. LIMITACIONES Y APORTE

9.1 Limitaciones

En este proyecto se encontraron varias limitaciones debido a la complejidad del proyecto, las cuales a medida que íbamos avanzando se iban hallando como lo son:

1. La caratula comparadora es un elemento de exactitud esto conlleva a que tiene un rango de medición, en este caso la caratula que adquirimos solo mide hasta 10mm de elongación, lo que indica que si al colocar las pesas la estructura tiene una elongación mayor a 10 mm esta no serviría.
2. El límite de peso que puede resistir la estructura es de 40kg en los nodos analizados y 50kg ya llega a su falla, se recomienda no pasar de 40kg.
3. Se debe tener en cuenta en el momento de verificar o analizar la deformación de la estructura en los cordones inferiores, el aparato de medición debe estar perpendicular a este.

9.2 Aporte

Este prototipo se realizó con la finalidad de crear un laboratorio de estructuras donde se puedan analizar cada uno de los elementos y verificar su comportamiento, por ello se realizó una estructura que no se encuentra sometida a ningún tipo de carga para que los estudiantes realicen su ensayo de laboratorio y logren sacar sus propias conclusiones respecto a este tipo de armaduras e incentivarlos para que realicen diferentes tipos de prototipos.

De igual forma el proyecto se deja abierto debido a que se intentó realizar el cálculo de las deformaciones por medio galgas extensiométricas, pero por cuestión de tiempo no fue posible su instalación y programación. Cabe aclarar que se entregó la galga extensiométrica de 20 cm y el arduino a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Antonio Nariño.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Ambrose, J. (1998). *Analisis y Diseño de Estructuras*. Mexico : Limusa.
- Antico, F. (2008). *CIRCULO DE MOHR*. Buenos Aires.
- arancibia, F. (26 de Marzo de 2010). *Ingenieria y Construccion*. Obtenido de <https://facingyconst.blogspot.com/2010/03/concepto-basicos-sobre-cerchas.html>
- Bartolome, A. S. (1998). *Analisis de edificios* . Perú: Pontificia Universidad Catolica de Perú.
- Brockenbrough, R. L., & Merritt, F. S. (1999). *Structural Steel Designers Handbook* . McGraw-Hill Professional .
- Brotons, P. U. (2009). *Construccion de estructuras metalicas*. Editorial Club Universitario.
- Castro, G. V. (2009). *Analisis estructural* . Lima, Peru.
- Cesar, A. M. (19 de Diciembre de 2019). *Alcaldia Municipal de El Copey Cesar*. Obtenido de <https://elcopeycesar.micolombiadigital.gov.co/noticias/inauguracion-del-puente-militar-vereda-entre-rios-sobre>
- Cevera, M., & Blanco, E. (2001). *Mecanica de estructuras- resistencia de materiales*. Barcelona: Edicions UPC.
- Clement, G. V. (2010). *Diseño basico de estructuras de acero de acuerdo con NSR-10*. Bogota: Escuela Colombiana de Ingenieria .
- Construction, A. I. (2019). *Companion to the aisc steel construction manual* . EEUU: American Institute of Steel Construction .
- Cossolino, L. C. (21 de 10 de 2010). *ATCP*. Obtenido de ATCP.
- Crisafulli, F. J. (2018). *Diseño sismo resistente de construcciones en acero*. Argentina : Universidad nacional de Cuyo.
- Davide Bigoni, F. D. (2012). un modelo de enseñanza para estructuras en celosia. *scopus*.
- E.Gustin. (1980). *estructuras metalicas*. Barcelona: Edictores tecnicos.
- Edgar Muñoz Díaz, F. N. (2007). *PROTOTIPO DIDÁCTICO PARA LA ENSEÑANZA DE LA Ingeniería*.
- electricidad, C. F. (2008). *Manual de diseño de obras civiles Seccion C estructuras c 1.2*. Intituto de investigaciones electricas .
- Hibbeler, R. C. (2012). *Analisis estructural*. Mexico : Pearson .
- IMCA. (2002). *Manual de Construccion en Acero* . MEXICO: Limusa.
- Iranzo, A. P. (11 de Mayo de 2007). *Universidad Politecnica de Madrid*. Obtenido de <http://oa.upm.es/3786/1/Picazo-E15.pdf>
- Julio Enrique Duarte, Guerly Gutierrez, Flavio Fernandez Morales. (2007). Desarrollo de un prototipo didactico como alternativa pedagogica para la enseñanza del concepto de induccion electromagnetica. *Revista Universidad Pedagogica*, 7.
- Kassimall, A. (2015). *Analisis estructural*. Mexico: CENGAGE Learning .
- Maria, C. C. (2012). *DISEÑO DE VIGAS POSTENSADAS LANZADAS EN CELOSÍA*. Quito.
- Mazurek, Eisenberg, Beer, & Johnston. (2010). *Mecanica vectorial para ingenieros*. Mexico: McGraw Hill.
- McCorman, J., & Csernak, S. (2012). *Diseño de estructuras en acero*. Mexico: Alfaomega.
- metropolitana, u. a. (2014). laboratorio de modelos estructurales. *laboratorio de modelos estructurales*.
- Monterrey, U. m. (s.f.). *Manual de estructuras metalicas*. Mexico: Tecnar.
- Nonnast, R. (1993). *El proyectista de estructuras metalicas*. Editorial paraninfo.
- Nozada, P. R. (2018). Practicas con modelos fisicos . *Sistemas Estructurales* , 214.
- Pardo, M. d. (2012). *Estatica en arquitectura* . Editorial Trillas .

- Portafolio. (2018). Así va la obra del edificio de cristal que se levanta sobre la 26 . *Portafolio* , 1.
- Sequeira, M. (2019). *molamodel*. Obtenido de <https://molamodel.com/pages/info>
- Soto, J. R. (2012). *% proyectos de estructuras metálicas* . Bellisco Ediciones .
- Sritawat Kitipornchai, T. R. (2010). Desarrollo de una aplicación de prueba virtual para la enseñanza y aprendizaje de ingeniería estructural. *scopus*.
- Up, S. (2017). Prototipo de estructura sísmo resistente inspirada en el cuerpo humano . *Start Up* , 3.
- Wenwei Yang, J. L.-n. (2018). Experimental study on the static behavior of reinforced warren circular hollow section (CHS) tubular trusses. *scopus*.
- White, Gergely, & Sexsmith. (1980). *Ingeniería Estructural: Introducción a los conceptos de análisis y diseño* . Mexico: Limusa.
- Zerpa, J. P. (2014). Análisis de solicitaciones y deformaciones en vigas curvas . *Facultad de ingeniería, Universidad la república* , 26.

11. ANEXOS

11.1 Guía de laboratorio



UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL ANALISIS ESTRUCTURAL

Laboratorio: Análisis de armadura tipo Warren

1 objetivos

- Identificar cada uno de los elementos que componen la armadura.
- Determinar los parámetros de los módulos de esfuerzo y deformación.
- Analizar los resultados obtenidos para realizar la gráfica esfuerzo Vs deformación.
- Realizar modelo en SAP2000 y realizar comparación con la práctica de laboratorio.

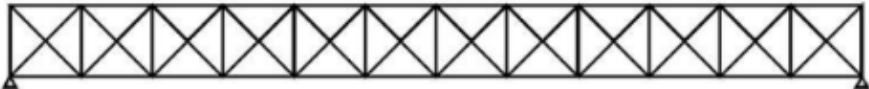
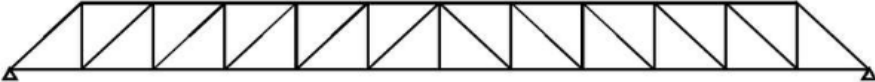
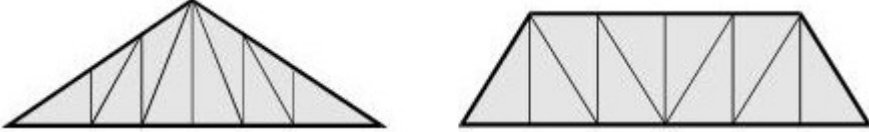
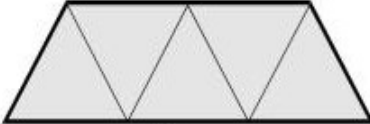
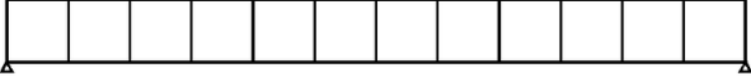
2 Marco Teórico

Una armadura es una estructura que se compone principalmente de triángulos de diferentes tipos con el fin de distribuir las cargas a los soportes por medio de una combinación de miembros conectados por uniones articuladas, “*donde cada uno de los miembros trabajan de formas diferentes como lo son a tensión o compresión, pueden ser construidas con materiales como: madera, aluminio, acero, etc. y sus uniones son articuladas o rígidas*”. (Bartolome, 1998)

Tipos armaduras

La mayoría de armaduras son empleadas en puentes, cubiertas, cada una de las armaduras son tienen como nombre el apellido se quien la diseño y/o creo.

(Brockenbrough & Merritt, 1999)

Long	
Howe	
Armadura Pratt	
Warren	
Vierendeel	

Comparador de caratula

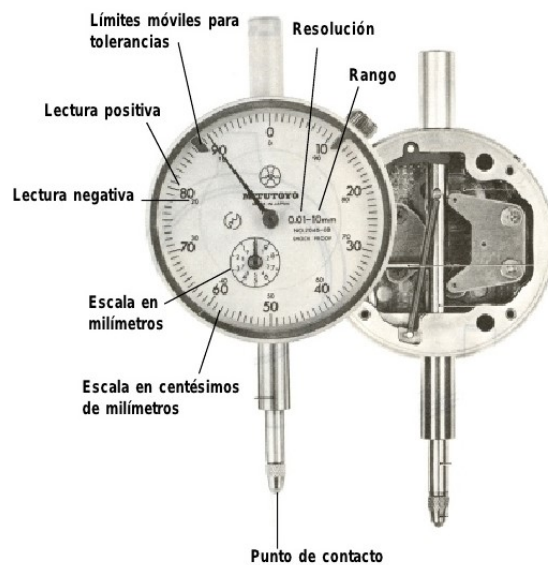
“Instrumento de medición en el cual con un movimiento del husillo se desarrolla con un tren de engranes que giran en forma angular donde una aguja indicadora sobre la caratula del dispositivo”. (Edgar Muñoz Díaz, 2007)

Al ser un dispositivo de comparación, es necesario durante su manejo este sostenida a la base de referencia (base magnética).

Tipos de caratula comparadora



Partes del comparador de caratula



Lectura del comparador caratula

La lectura del comparador de caratula se realiza de la siguiente forma:

1. Identificar principalmente la caratula secundario para que posteriormente se realice su medición.

2. Identificar la caratula principal para su medición.



Ejemplo:

$$\begin{array}{r}
 1. 0.00 \text{ mm} + \\
 2. \underline{0.41 \text{ mm}} \\
 \hline
 0.41 \text{ mm}
 \end{array}$$

Ejemplo:

$$\begin{array}{r}
 1. 0.100 \text{ in} + \\
 2. \underline{0.006 \text{ in}} \\
 \hline
 0.106 \text{ in}
 \end{array}$$

3 equipos y elementos

- Prototipo de armadura tipo Warren.
- Caratula Comparadora.
- Pesas de 100 Kg.

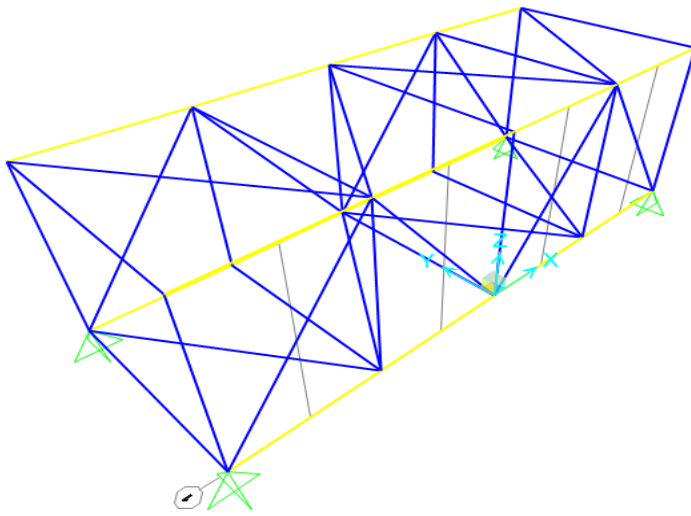
4 procedimiento

1. Familiarizarse con la estructura y haber leído previamente el funcionamiento de la caratula comparadora.
2. Instalar caratula comparadora sobre la barra que desean analizar.
3. Colocar la pesa y visualizar en la caratula comparadora cuantos mm se defleto la barra.
4. Colocar paulatinamente cada pesa y visualizar la deflexión que se genera en cada peso.
5. Tabular datos obtenidos.
6. Realizar grafica esfuerzo Vs deformación.
7. Hallar módulo de elasticidad y módulo de corte.

ENSAYO DE LABORATORIO						
No. CARGA	CARGA (kg)	CARGA (N)	ENLONGACION (mm)	ESFUERZO (N/mm)	DEFORMACION UNITARIA (mm/mm)	DEFORMACION UNITARIA (%)

5 ejercicio

1. Identificar cada uno de los elementos que compone el prototipo de armadura tipo Warren.



ELEMENTOS

- Cuerda superior.
- Cuerda inferior.
- Nodo.
- Apoyos.
- Diagonal.
- Celosía.
- Luz de la armadura.
- Pendiente.

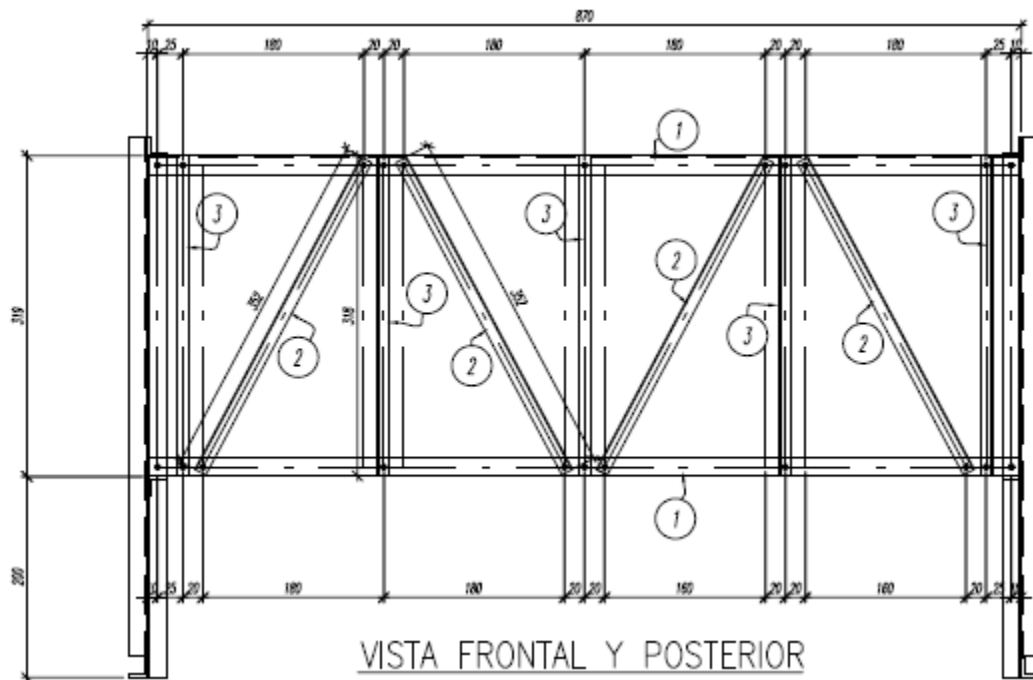
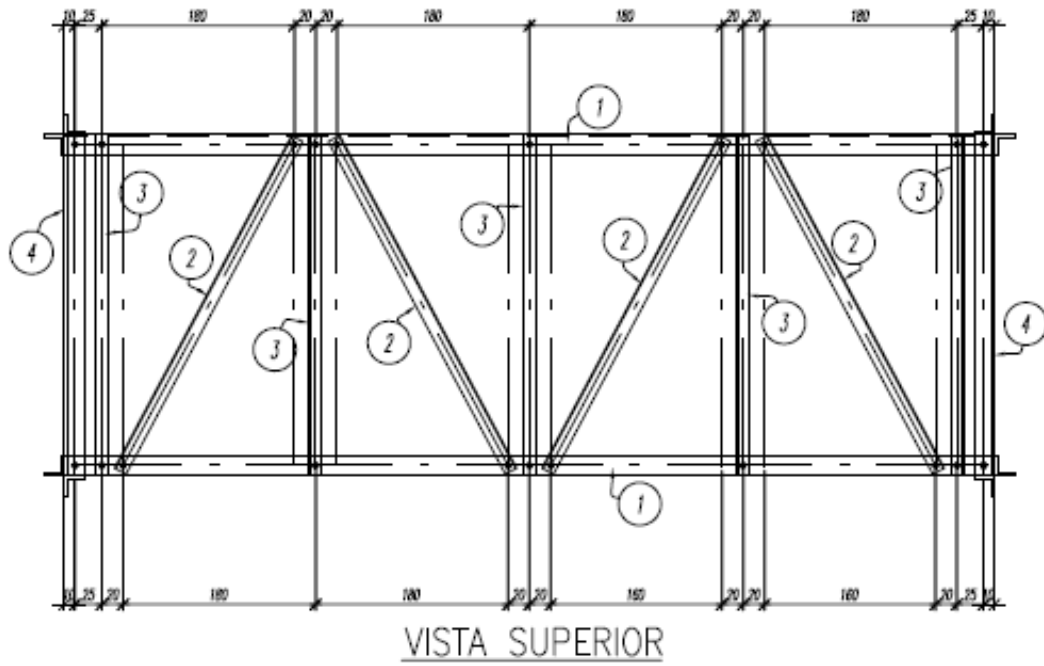
2. Realizar el modelo en SAP2000 y realizar comparación con la práctica de laboratorio.

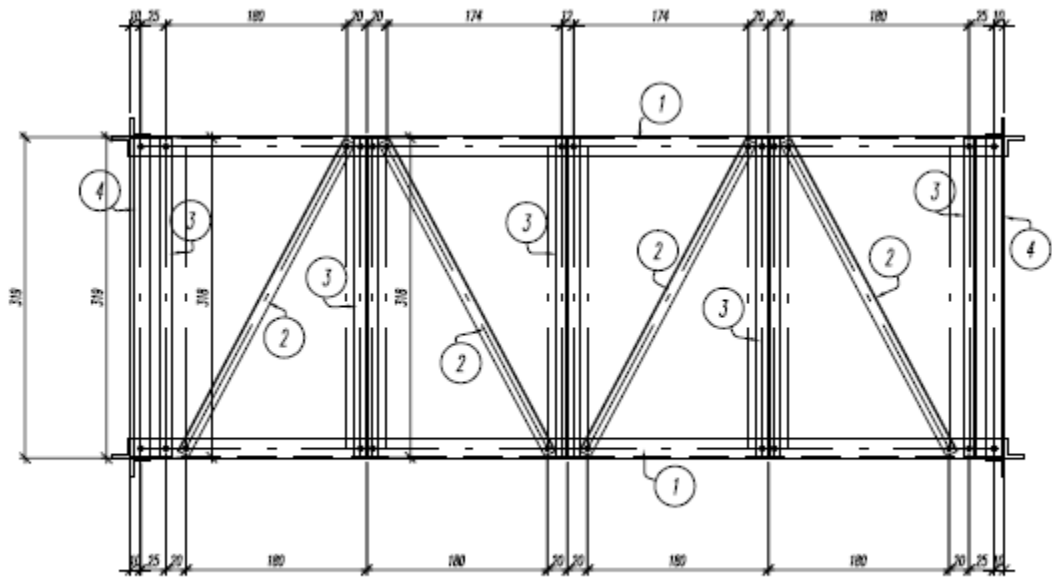
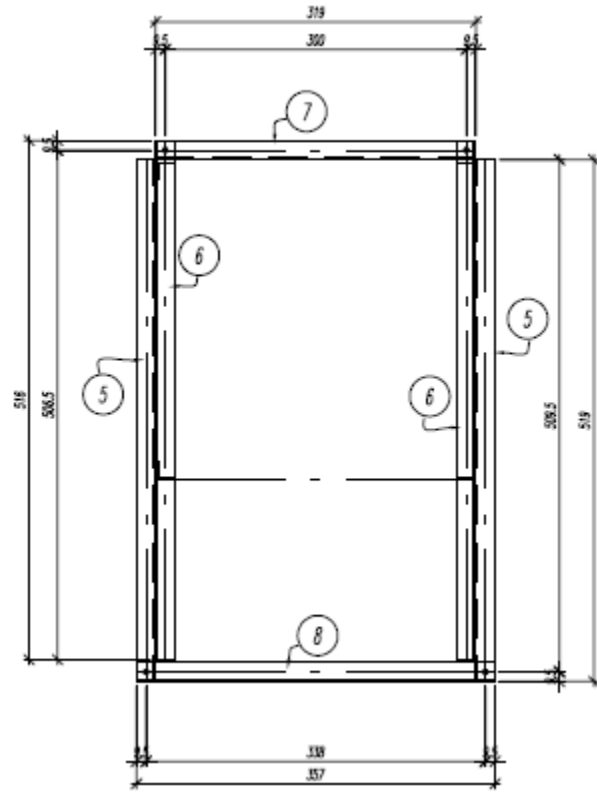
6 Webgrafía

<https://www.slideshare.net/REYNERCASTILLO/20-capitulo-6-analisis-estructural-armaduras/9>

<https://vdocuments.mx/historia-de-las-armaduras-estructurales.html>

11.2 Plano general estructura





VISTA INFERIOR

11.3 Artículo

PROTOTIPO DE MODELO ESTRUCTURAL DE ARMADURA TIPO WARREN PARA EL LABORATORIO DE ESTRUCTURAS

Catherine calderón Ramírez
Édison Gregorio Ramírez
Morales

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es construir un prototipo a escala donde se puedan medir o calcular las deformaciones de una armadura tipo Warren la cual se encuentra sometida a cargas verticales al igual que a su propio peso. También se desarrolla Como aporte al crecimiento del laboratorio de estructuras, con el propósito de proponer un percepción teórico-práctico sobre el funcionamiento de las estructuras a los estudiantes de la facultad de ingeniería civil de la Universidad Antonio Nariño y se incentive al estudio de este tipo de estructuras y los elementos que la componen. La investigación cuenta con un diseño alámbrico donde se definieron cada uno de los elementos que construyen la viga. Se construyó el prototipo de esta y se realizaron pruebas de laboratorio hasta llevarla a la falla aplicando cargas verticales en los nodos centrales, esto con el fin de medir las deflexiones de la viga, estos se miden con un comparador de caratula el cual cuenta con una precisión de 0.01m.

Palabras clave: armadura; conexión; deflexión; esfuerzo; compresión; tracción; fuerza; pandeo.

Abstract

The objective of this research is to build a prototype to scale where the deformations of a Warren- type armor can be measured or calculated, which is subject to vertical loads as well as

its own weight. It is also developed as a contribution to the growth of the structure laboratory, with the purpose of proposing a theoretical-practical concept on the behavior of structures to the student community and to encourage the study of this type of structure and the elements that comprise it. The research has a wired design where each of the elements that build the beam were defined.

The prototype of this was built and laboratory tests were carried out to bring it to the fault by applying vertical loads on the central nodes, this in order to measure the deflections of the beam, these are measured with a face comparator which has a precision of 0.01m.

Key words: armor; Connection; deflection; effort; compression; traction; force; buckling.

INTRODUCCION

“El análisis estructural es la ciencia que se encarga de la elaboración de métodos de cálculo para establecer resistencia, rigidez, estabilidad, durabilidad y seguridad” adquiriendo los valores necesarios para un diseño estructural seguro. (Castro, 2009)

Las estructuras metálicas desde la antigüedad han tenido un papel fundamental en la historia grandes estructuras se han realizado, por ejemplo: el primer puente transbordador del mundo de estructura metálica, el puente Bizkaia donde fue inaugurado el 28 de julio de 1893 fue diseñado por Don Martin Alberto de Palacio y Elissague. Esta estructura lleva aproximadamente 126 años y se encuentra en óptimas condiciones, es un monumento emblemático como también lo es la torre Eiffel ubicada en Francia con una altura máxima de 324m.

Lo anterior son ejemplos donde se debe profundizar en el tema de estructuras metálicas ya que son estructuras livianas, se realizan insitu y su material hace que se conserven al pasar los años; Colombia cuenta con pocas estructuras metálicas de ese tipo pero las que se encuentran está

relacionada con los puentes, estos puentes son de gran ayuda en el territorio nacional donde hay poco acceso de transporte de material convencional, el ejército nacional en la mayoría de casos es el encargado de realizar estas estructuras. El puente militar Vereda entre ríos sobre el río Ariguanicito es una estructura que beneficio a más 450 familias del sector rural, son 7 veredas que en temporada de invierno se dificultaba el tránsito por esta zona quedando incomunicados con la cabecera municipal, esto al crecimiento de dicho río



Ilustración 1 Puente Militar

Fuente: (Cesar, 2019)

Teniendo en cuenta cada uno del ejemplo anteriormente mencionado, las estructuras metálicas tienen un gran nivel de importancia para la sociedad por eso se toma la iniciativa de realizar un prototipo de una armadura tipo Warren, donde se estableció como objetivo calcular y analizar las deformaciones de este modelo sometido a diferentes cargas, lo anterior para crear un laboratorio de modelos estructurales con la finalidad de ofrecer un concepto teórico-práctico.

El diseño del modelo estructural se realizó con el propósito de brindar un prototipo didáctico, para lo cual se tuvo en cuenta tipo de material ya que es importante para los diferentes ensayos. Para el uso y manipulación del prototipo se realizó una guía la cual es un aporte para

que la práctica de laboratorio se puede realizar satisfactoriamente obteniendo los objetivos que se plantean en ella y brindar un concepto básico del comportamiento de las armaduras cuando estas se encuentran sometidas a diferentes cargas.

METODOLOGIA

Dimensionamiento estructura

El principal objetivo ha sido estudiar el comportamiento de una estructura en celosía cuando se encuentra sometida a cargas verticales, este tipo de configuraciones son usadas en puentes, cerchas, cubiertas.

Son implementadas cuando hay claros de grandes longitudes, este tipo de configuraciones ayudan a dirigir las fuerzas o esfuerzos a los que se encuentran a cada uno de los elementos y nodos que la componen.

Análisis de la estructura

Se realizó en el programa SAP200, teniendo en cuenta las condiciones de la disposición física y las cargas para el análisis, buscando una estructura eficiente que trabaje armónicamente con las solicitaciones a las cuales será sometido la estructura o prototipo.

La estructura se analizó con perfiles en aluminio y elementos angulares comerciales en el mercado. El propósito del análisis es hallar la resistencia estructural para resistir cargas verticales que estará con fatiga para estudiar los esfuerzos de la estructura y así lograr llevarla a la falla.

El proceso fue construir tres estructuras, dos de estas llevarla a la falla para así representar los modelos de esfuerzo vs deformación. La otra estructura es un aporte para el laboratorio para su estudio, donde no solamente es verificar los modelos de esfuerzo-deformación, sino que

también se podrá visualizar cada uno de sus elementos como lo son sus uniones, tipo de estructura, tipo de apoyo para tener una idea del funcionamiento de este tipo de estructuras que se utilizan cotidianamente en diferentes infraestructuras a nivel mundial.

Realizar planos de estructura

Terminado el análisis de la estructura y la definición de elementos se procede a la realización de los planos de taller para la fabricación del prototipo, de acuerdo con el diseño propuesto.

Al momento del diseño de la silueta es idealizada, donde cada uno de los elementos llegan a los nodos, pero al momento de la realización de los planos constructivamente los elementos no ensamblan en el mismo nodo por tal motivo la conexión diseñada. (ver plano en anexos).

Construcción del prototipo

Compra de los materiales, tomando como partida la lista de materiales prevista en los planos de taller para la elaboración de la estructura. Se tendrán herramienta como la remachadora y remaches para el anclaje de los elementos angulares de la estructura.

Elaboración de pesas en concreto

Se realizó corte de tubo de 4 pulgadas cada uno de 15cm para elaborar 10 pesas de 10Kg con un peso total de 100Kg, de igual forma se realizaron pesas adicionales con arena que tenían un peso de 2 Kg, 3 Kg, 5 Kg y 6 kg, el cual la estructura tipo Warren soportará como carga vertical y permitirá realizar las pruebas de laboratorio con el fin de realizar el análisis de los módulos de esfuerzo Vs deformación de la estructura y analizar el material empleado.

Ensayo de laboratorio

Se realizó previamente una verificación teniendo en cuenta cada una de las cargas estructurales estará sujeta, el análisis se realizó mediante el programa o software SAP2000 teniendo en cuenta su peso propio; por medio del programa se conocieron las fuerzas internas, reacciones en los apoyos, deflexiones en los elementos y por medio teórico (análisis de estructuras indeterminadas).

En el ensayo de laboratorio se consideraron cada uno de los elementos empleados para luego así lograr tener resultados óptimos para su respectivo análisis.

Comparador de caratula

El comparador de caratula (Dial gage) *“instrumento de medición en el cual un pequeño movimiento del husillo se amplifica mediante un tren de engranes que mueven en forma angular una aguja indicadora sobre la caratula del dispositivo. La aguja indicadora puede dar tantas vueltas como lo permita”* (Edgar Muñoz Díaz, 2007)

Al ser un instrumento de comparación, es necesario que se encuentre sostenida a la base de referencia (base magnética).

Estos instrumentos ayudaran a medir la deformación de la estructura cuando esta se encuentre sometida a las cargas verticales. La precisión es de 0.01mm.

La base magnética es necesaria para la sujeción del comparador ya que da una fijación al aparato y por ende en la precisión de los datos que se pretenden medir y analizar.

Procedimiento

Como primer paso se coloca la estructura en una parte alta para darle espacio al momento de posicionar cada pesa, se instala el comparador de caratula de manera que esté perpendicularmente al cordón inferior de la estructura.

Antes de empezar a colocar las pesas se debe verificar que la aguja principal del comparador de caratula este en cero y también se tiene que tener en cuenta el posicionamiento del gancho para la sujeción de las pesas.

Se procede a colocar una a una las pesas en el gancho para visualizar su deformación en el comparador de caratula.

Es importante recalcar que a medida que se fue colocando las pesas se realizó la lectura del comparador.



Ilustración 1 Montaje de estructura y lectura del comparador de caratula con 30 Kg

Fuente: elaboración propia

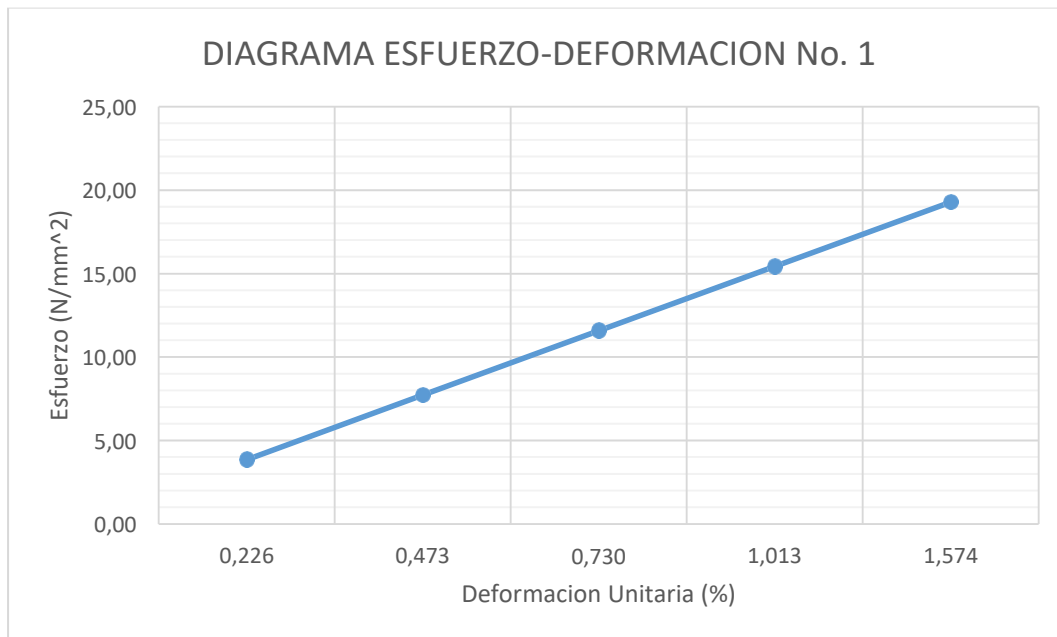
Datos obtenidos estructura No. 1

Se realizaron dos ensayos donde en el primero ensayo se aplicaron cargas constantes y esto llevo a una falla repentina como se visualiza en la ilustración 26.

Tabla 1 Datos obtenidos ensayo estructura No.1

ENSAYO ESTRUCTURA No. 1						
No. CARGA	CARGA (kg)	CARGA (N)	ENLONGACION (mm)	ESFUERZO (N/mm ²)	DEFORMACION UNITARIA (mm/mm)	DEFORMACION UNITARIA (%)
1	10	98	0,72	3,86	0,002257053	0,226
2	20	196	1,51	7,72	0,004733542	0,473
3	30	294	2,33	11,57	0,007304075	0,730
4	40	392	3,23	15,43	0,010125392	1,013
5	50	490	5,02	19,29	0,015736677	1,574

Fuente: Elaboración propia



Grafica 1 Esfuerzo Vs Deformación ensayo estructura

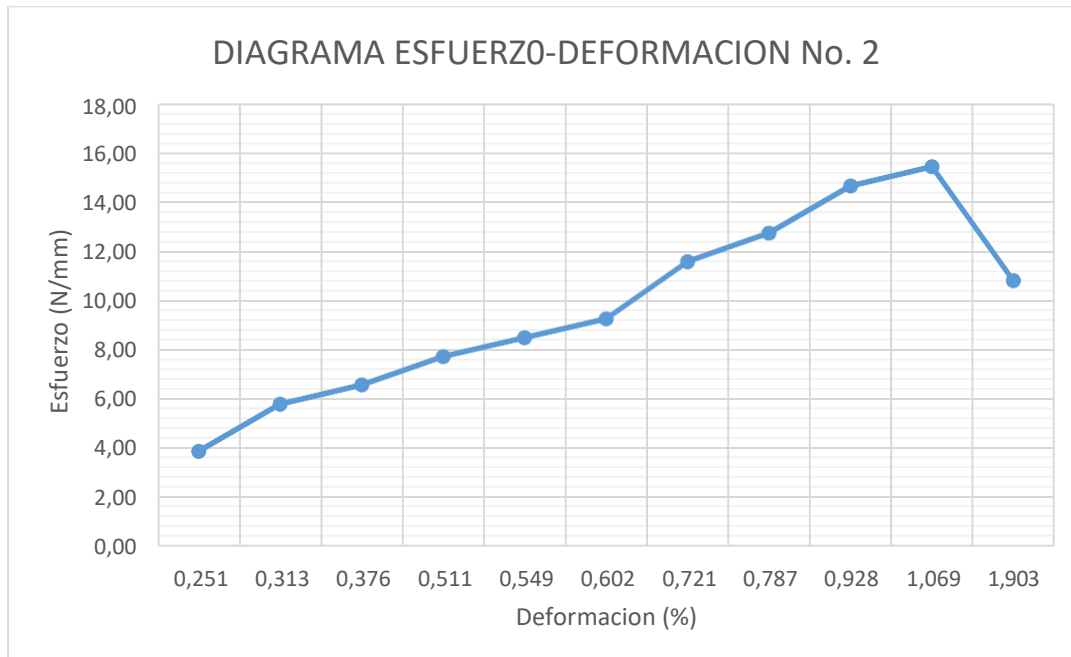
No.1 Fuente Elaboración propia

Datos obtenidos estructura No. 2

En el segundo ensayo se aplicaron cargas variables teniendo así un total de once cargas, logrando identificar cada uno de los componentes de la curva de esfuerzo Vs deformación.

Tabla 2 Datos obtenidos ensayo estructura No.2

ENSAYO A ESTRUCTURA No. 2						
No. CARGA	CARGA (kg)	CARGA (N)	ENLONGACION (mm)	ESFUERZO (N/mm)	DEFORMACION UNITARIA (mm/mm)	DEFORMACION UNITARIA (%)
1	10	98	0,8	3,86	0,002507837	0,251
2	15	147	1	5,79	0,003134796	0,313
3	17	166,6	1,2	6,56	0,003761755	0,376
4	20	196	1,63	7,72	0,005109718	0,511
5	22	215,6	1,75	8,49	0,005485893	0,549
6	24	235,2	1,92	9,26	0,006018809	0,602
7	30	294	2,3	11,57	0,007210031	0,721
8	33	323,4	2,51	12,73	0,007868339	0,787
9	38	372,4	2,96	14,66	0,009278997	0,928
10	40	392	3,41	15,43	0,010689655	1,069
11	28	274,4	6,07	10,80	0,019028213	1,903



Grafica 2 Esfuerzo Vs Deformación ensayo estructura

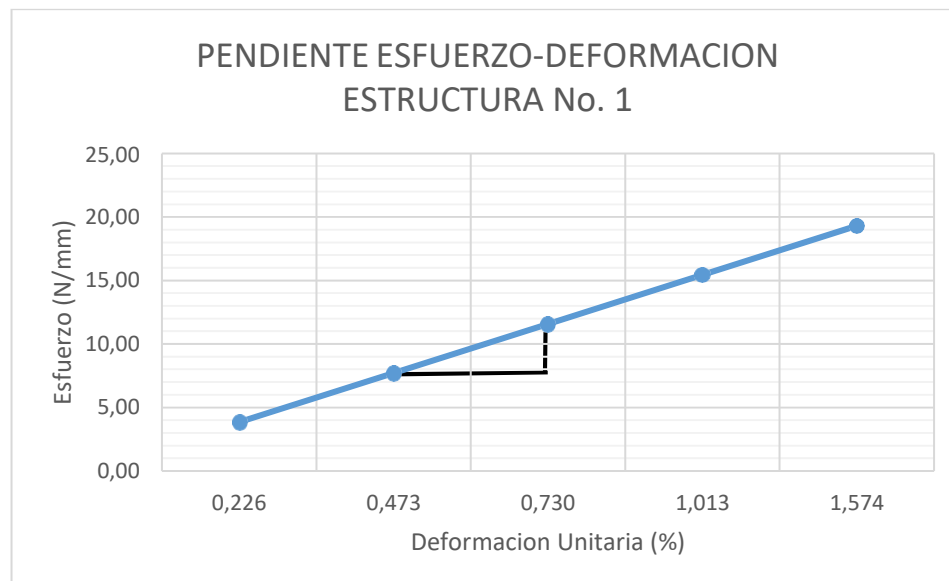
No.2 Fuente Elaboración propia

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Teniendo en cuenta los datos obtenidos anteriormente, se grafica la línea de tendencial lineal en cada una de ellas para luego hallar el módulo de elasticidad en cada estructura (Ley de Hooke) y el módulo de corte.

El coeficiente de Poisson que se utilizó en el módulo de corte para cada uno de los ensayos fue de 0,33.

El primer ensayo la gráfica que se obtuvo no hubo necesidad de graficar la línea de tendencia debido a que esta dio lineal, lo que indica que procedimos a hallar su pendiente y el punto máximo para si verificar el punto de falla.



Grafica 3 Pendiente ensayo estructura

1 Fuente Elaboración propia

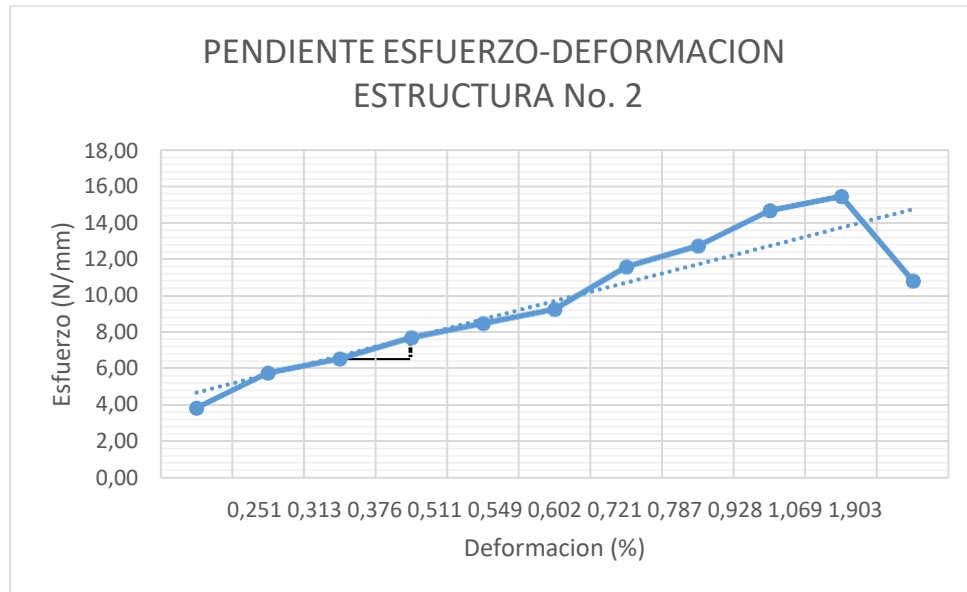
Teniendo en cuenta la gráfica su punto máximo es $\epsilon = 1,574$ N/mm², los puntos en la recta tenemos:

$\sigma 1$	7,72 N/mm ²
$\sigma 2$	11,57 N/mm ²
$\varepsilon 1$	0,00473 mm/mm
$\varepsilon 2$	0,00730 mm/mm

$$E = \frac{11,57 - 7,72}{0,00730 - 0,00473} = 1498,05 \text{ N/mm}^2 \text{ Modulo de elasticidad}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{1498,05}{2(1+0,33)} = 563,18 \text{ N/mm}^2 \text{ Modulo de Corte}$$

En el segundo ensayo se graficó la línea de tendencia y se identificó su punto máximo lo cual es $\epsilon = 15,43 \text{ N/mm}^2$.

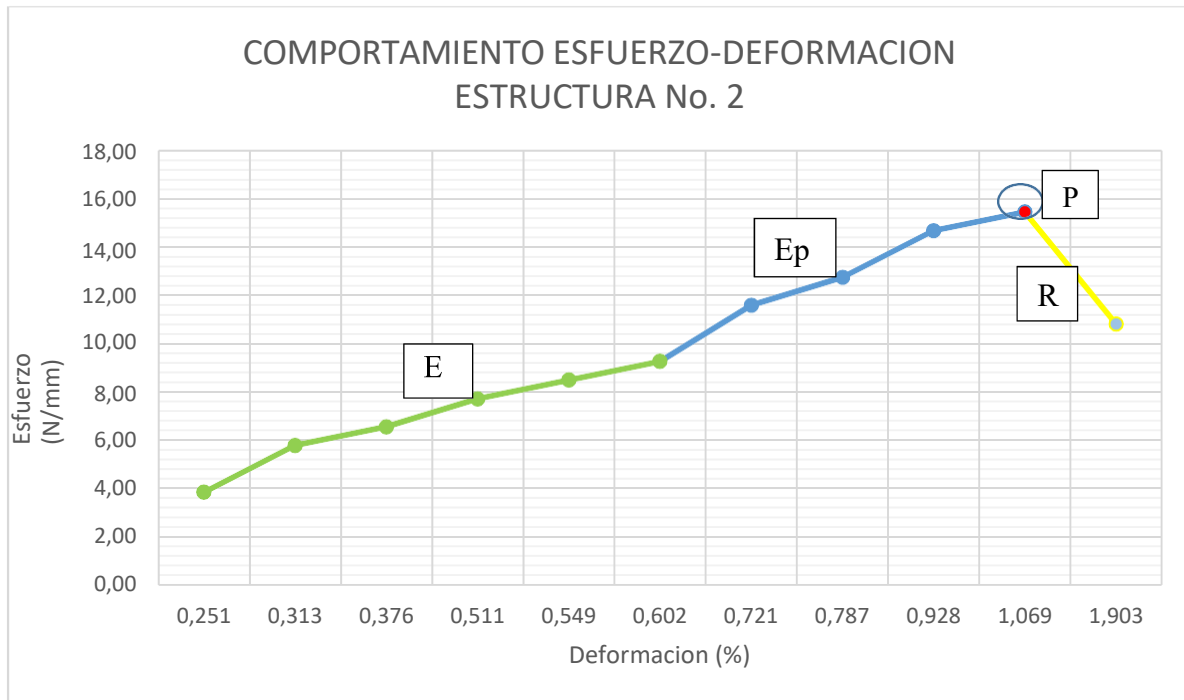


Grafica 4 Esfuerzo Vs Deformación ensayo estructura No.2 con línea de tendencia Fuente Elaboración propia

$\sigma 1$	6,56 N/mm ²
$\sigma 2$	7,72 N/mm ²
$\epsilon 1$	0,0038 mm/mm
$\epsilon 2$	0,00511 mm/mm

$$E = \frac{7,72 - 6,56}{0,00511 - 0,00376} = 892,30 \text{ N/mm}^2 \text{ Modulo de elasticidad}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{892,30}{2(1+0,33)} = 335,45 \text{ N/mm}^2 \text{ Modulo de corte}$$



Grafica 5 Comportamiento esfuerzo- deformación ensayo estructura 2

Fuente Elaboración propia

En el intervalo color verde identificado con la E el material es elástico, este intervalo se caracteriza por ser la sección más recta del diagrama. El intervalo de color azul señalado con las letras Ep tiene la característica elastoplástica lo que indica que allí la estructura tiende recuperarse o no recuperarse, en este caso la estructura tuvo tendencia a no recuperarse lo que quiere decir el punto P.

El punto P encontramos la plasticidad la cual indica un estado no recuperable del material ese es el punto máximo, es allí donde se genera la falla de la estructura. Por último, tenemos el tramo color amarillo que indica el comportamiento después de la falla llamado residual.

De igual forma se visualizó que la estructura No.2 tuvo efectos de torsión, la deformación que esta tuvo es llamado compresión diagonal lo que incito a un aplastamiento en espiral en algunas diagonales de la estructura llevándola al colapso.



Ilustración 2 Torsión en diagonal estructura No. 2

Fuente Elaboración propia



Ilustración 3 Vista frontal estructura

No.2 Fuente Elaboración propia

CONCLUSIONES

A partir de la modelación en software de la armadura tipo Warren se verifico su comportamiento teórico y experimental. Se fabricaron tres estructuras, dos de ellas para llevarla a la falla y la restante para el laboratorio de estructuras, su finalidad no solo es realizar la práctica de laboratorio, sino que también los estudiantes puedan tener un concepto acerca del comportamiento de la estructura y la importancia que tienen las uniones en este tipo armaduras. Se evidencio que al momento de iniciar el ensayo se colocó una pesa en el nodo contrario donde se encontraba el aparato de medición y se visualizó que no genero ninguna deformación, esto se debe a que el elemento estaba trabajando a flexión en el cordón inferior y no afectaba al cordón opuesto de acuerdo a lo analizado y estudiado con las pruebas de carga.



Ilustración 4 Deformación en cero cordones opuestos sometidos a carga

Fuente Elaboración propia

Cuando la estructura No. 2 fallo se pudo identificar que se produjo por flexo-torsión ya que el peso se estaba aplicando únicamente en uno de los nodos, de igual manera la estructura No.1 fallo de forma repentina haciendo que el nodo donde se aplicó la carga constante se rompiera por completo.

En el tema de diseño se pudo identificar que se puede mejorar la estructura reforzándola con crucetas en vista transversal para que tenga mayor estabilidad y rigidez, para evitar que falle por torsión como se aprecia en la ilustración 5.



Ilustración 5 Falla por

torsión Fuente

Elaboración propia

Se analizó visualmente la estructura y se evidencia que otra razón por la que produjo la falla fue por la conexión ya que algunas sufrieron agrietamientos y por esta causa los elementos podrían haber fallado como se evidencia en la ilustración 6.



*Ilustración 6 falla en
conexiones Fuente
Elaboración propia*

Por otra parte, lo que hace que la estructura tenga mayor rigidez y resista este tipo de cargas fueron las diagonales que son las que realizaron el mayor esfuerzo ya sea por tracción, compresión o flexo-compresión.



Ilustración 7 falla por flexo compresión Fuente

Elaboración propia

Se puede concluir que el comportamiento del aluminio a cargas constantes no se logra visualizar ningún tipo de agrietamientos, flexión, torsión en la estructura, sino que simplemente esta genera una flexión mínima y de repente una falla súbita.

Al realizar los 2 ensayos a las dos estructuras obtuvimos para cada una de estas el modelo de elasticidad y corte, los resultados prácticos son aproximados a los resultados teóricos cada uno de estos métodos ayudaron para verificar la resistencia del aluminio y de igual forma la estructura tiene una geometría que permite una rigidez optima, ya que puede llegar a resistir 40 veces más de su peso propio. Se Comprobaron los resultados obtenidos con el modelo de análisis realizado en el software (SAP200) y se concluye que los elementos fallaron por compresión.

De igual manera se logró obtener un prototipo didáctico de una armadura tipo Warren para que los estudiantes tengan una visión amplia del comportamiento de este tipo de estructuras y como puede llegar a tener un funcionamiento armónico al momento que se aplican las cargas.

Limitaciones y aporte

Limitaciones

En este proyecto se encontraron varias limitaciones debido a la complejidad del proyecto, las cuales a medida que íbamos avanzando se iban hallando como lo son:

1. La caratula comparadora es un elemento de exactitud esto conlleva a que tiene un rango de medición, en este caso la caratula que adquirimos solo mide hasta 10mm de elongación, lo que indica que si al colocar las pesas la estructura tiene una elongación mayor a 10 mm esta no serviría.
2. El límite de peso que puede resistir la estructura es de 40kg en los nodos analizados y 50kg ya llega a su falla, se recomienda no pasar de 40kg.
3. Se debe tener en cuenta en el momento de verificar o analizar la deformación de la estructura en los cordones inferiores, el aparato de medición debe estar perpendicular a este.

Aporte

Este prototipo se realizó con la finalidad de crear un laboratorio de estructuras donde se puedan analizar cada uno de los elementos y verificar su comportamiento, por ello se realizó una estructura que no se encuentra sometida a ningún tipo de carga para que los estudiantes realicen su ensayo de laboratorio y logren sacar sus propias conclusiones respecto a este tipo de armaduras e incentivarlos para que realicen diferentes tipos de prototipos.

De igual forma el proyecto se deja abierto debido a que se intentó realizar el cálculo de las deformaciones por medio galgas extensiométricas, pero por cuestión de tiempo no fue posible

su instalación y programación. Cabe aclarar que se entregó la galga extensiométrica de 20 cm y el arduino a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Antonio Nariño.

Bibliografía

- Ambrose, J. (1998). *Analisis y Diseño de Estructuras*. Mexico : Limusa.
- Antico, F. (2008). *CIRCULO DE MOHR*. Buenos Aires.
- arancibia, F. (26 de Marzo de 2010). *Ingenieria y Construccion*. Obtenido de <https://facingyconst.blogspot.com/2010/03/concepto-basicos-sobre-cerchas.html>
- Bartolome, A. S. (1998). *Analisis de edificios* . Perú: Pontificia Universidad Catolica de Perú.
- Brockenbrough, R. L., & Merritt, F. S. (1999). *Structural Steel Designers Handbook* . McGraw-Hill Professional .
- Brotons, P. U. (2009). *Construccion de estructuras metalicas*. Editorial Club Universitario.
- Castro, G. V. (2009). *Analisis estructural* . Lima, Peru.
- Cesar, A. M. (19 de Diciembre de 2019). *Alcaldia Municipal de El Copey Cesar*. Obtenido de <https://elcopeycesar.micolombiadigital.gov.co/noticias/inauguracion-del-puente-militar-vereda-entre-rios-sobre>
- Cevera, M., & Blanco, E. (2001). *Mecanica de estrcuturas- resistencia de materiales*. Barcelona: Edicions UPC.
- Clement, G. V. (2010). *Diseño basico de estructuras de acero de acuerdo con NSR-10*. Bogota: Escuela Colombiana de Ingenieria .
- Construction, A. I. (2019). *Companion to the aisc steel construction manual* . EEUU: American Institute ostell Construction .
- Cossolino, L. C. (21 de 10 de 2010). *ATCP*. Obtenido de ATCP.
- Crisafulli, F. J. (2018). *Diseño sismo resistente de construcciones en acero*. Argentina : Univerdad nacional de Cuyo.
- Davide Bigoni, F. D. (2012). un modelo de enseñanza para estructuras en celosia. *scopus*.
- E.Gustin. (1980). *estructuras metalicas*. Barcelona: Edictores tecnicos.
- Edgar Muñoz Díaz, F. N. (2007). *PROTOTIPO DIDÁCTICO PARA LA ENSEÑANZA DE LA. Ingenieria*.
- electricidad, C. F. (2008). *Manual de diseño de obras civiles Seccion C estructuras c 1.2*. Intituto de investigaciones electricas .
- Hibbeler, R. C. (2012). *Analisis estructural*. Mexico : Pearson .
- IMCA. (2002). *Manual de Construccion en Acero* . MEXICO: Limusa.
- Iranzo, A. P. (11 de Mayo de 2007). *Universidad Politecnica de Madrid*. Obtenido de <http://oa.upm.es/3786/1/Picazo-E15.pdf>
- Julio Enrique Duarte, Guerly Gutierrez, Flavio Fernandez Morales. (2007). Desarrollo de un prototipo didactico como alternativa pedagogica para la enseñanza del concepto de induccion electromagnetica. *Revista Universidad Pedagogica*, 7.
- Kassimall, A. (2015). *Analisis estructural*. Mexico: CENGACE Learning .
- Maria, C. C. (2012). *DISEÑO DE VIGAS POSTENSADAS LANZADAS EN CELOSÍA*. Quito.
- Mazurek, Eisenberg, Beer, & Johnston. (2010). *Mecanica vectorial para ingenieros*. Mexico: Mc Graw Hill.
- McCorman, J., & Csernak, S. (2012). *Diseño de estructuras en acero*. Mexico: Alfaomega.
- metropolitana, u. a. (2014). laboratorio de modelos estructurales. *laboratorio de modelos estructurales*.
- Monterrey, U. m. (s.f.). *Manual de estructuras metalicas*. Mexico: Tecnar.
- Nonnast, R. (1993). *El proyectista de estructuras metalicas*. Editorial paraninfo.
- Nozada, P. R. (2018). Practicas con modelos fisicos . *Sistemas Estructurales* , 214.
- Pardo, M. d. (2012). *Estatica en arquitectura* . Editorial Trillas .

- Portafolio. (2018). Así va la obra del edificio de cristal que se levanta sobre la 26 . *Portafolio* , 1.
- Sequeira, M. (2019). *molamodel*. Obtenido de <https://molamodel.com/pages/info>
- Soto, J. R. (2012). *% proyectos de estructuras metálicas* . Bellisco Ediciones .
- Sritawat Kitipornchai, T. R. (2010). Desarrollo de una aplicación de prueba virtual para la enseñanza y aprendizaje de ingeniería estructural. *scopus*.
- Up, S. (2017). Prototipo de estructura sísmo resistente inspirada en el cuerpo humano . *Start Up* , 3.
- Wenwei Yang, J. L.-n. (2018). Experimental study on the static behavior of reinforced warren circular hollow section (CHS) tubular trusses. *scopus*.
- White, Gergely, & Sexsmith. (1980). *Ingeniería Estructural: Introducción a los conceptos de análisis y diseño* . Mexico: Limusa.
- Zerpa, J. P. (2014). Análisis de solicitaciones y deformaciones en vigas curvas . *Facultad de ingeniería, Universidad la república* , 26.