

ELABORACIÓN DE UN PROTOTIPO DE MÁQUINA PARA EL ENSAYO DE VIGAS A
ESCALA REDUCIDA CON PROPÓSITOS EDUCACIONALES

LUIS ANDRÉS MARTÍNEZ SÁNCHEZ

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

Bogotá 2020

ELABORACIÓN DE UN PROTOTIPO DE MÁQUINA PARA EL ENSAYO DE VIGAS A
ESCALA REDUCIDA CON PROPOSITOS EDUCACIONALES.

LUIS ANDRÉS MARTÍNEZ SÁNCHEZ

Trabajo de grado para optar el título de ingeniero civil

DIRECTOR DE PROYECTO:

EDISON OSORIO BUSTAMANTE

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

Bogotá 2020

Notas de Aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá,

Resumen

Este proyecto el principal objetivo es elaborar una máquina de prototipo para ensayos de vigas a escala reducida y para el beneficio de los estudiantes de la Universidad Antonio Nariño en pro del aprendizaje por medio de la practica en las clases magistrales y en los comportamientos de los diferentes elementos que componen las estructuras sean de hormigón armado o estructura metálica, ya que la experimentación es una parte fundamental en la formación de un ingeniero civil. En este proyecto se trata de que la Universidad no cuenta con los suficientes equipos en el área de estructuras por eso fue la creación de este proyecto para la formación de los futuros estudiantes en el área de estructuras como lo son estática, mecánica de materiales, análisis de estructuras y diseño de hormigón. En la investigación se describen las actividades que se necesitaron para la elaboración de este prototipo como es la concepción, el diseño y la fabricación donde se utilizaron varios procesos con el de soldadura y pintura. Con lo que se concluyo fue con su funcionamiento para hacer el ensayo de prueba para comparar los resultados con los teóricos a los experimentales, los cuales estos resultados fueron acordes con los planteados y sea la herramienta funcional en el laboratorio de estructuras.

“Dedico esta tesis a mis padres, Marlene Sánchez, Luis Martínez y a mi novia, quienes me han acompañado y apoyado a lo largo de mi carrera, y quienes me impulsan para seguir adelante y seguir cumpliendo mis metas.”

Luis Andrés Martínez Sánchez

“Agradezco a los profesores que me brindaron su apoyo y conocimiento desde el inicio de la carrera hasta este último momento”.

CONTENIDO

Tabla de figuras.....	9
Tablas	12
Introducción.....	1
Objetivos	3
Objetivo general	3
Objetivos específicos	3
Marco teórico.....	4
Los prototipos didácticos y los modelos	5
Elementos de tamaño reducido	6
El proceso del modelado experimental.....	7
Ejemplos de modelos estructurales.....	8
Modelos experimentales para apoyar la enseñanza de la mecánica estructural.....	8
Nuevos experimentos y equipos	10
Laboratorio modelos estructurales.....	10
Modelos experimentales aplicados a vigas.....	12
Momentos flectores y deflexión en vigas	12
Estado del arte	13
Documentos por autor	13
Documentos por año	14
documentos por área de temática	14
Desarrollo de una impresora 3D para hormigón estructural.	14
Impresión 3D de hormigón reforzado.....	15
Exploración experimental de cable metálico como refuerzo.....	15
Prototipo didáctico para la enseñanza de la ingeniería estructural.	15
Perfiles de acero para la reparación de extremos de vigas de madera deteriorados	16
Resistencia de vigas esbeltas de acero inoxidable bajo cargas concentradas mediante análisis por elementos finitos.	16
Análisis numérico experimental de un prototipo de sección mixta de hormigón madera.	
17	
Metodología	18
Resultados	24
Fuerza máxima del gato hidráulico.....	28

Conclusiones	34
Limitaciones y aportes	35
Limitaciones	35
Aporte.....	35
Referencias bibliograficas	36
Anexos	39
Resolución de la cercha manualmente para una carga de 20kN	39
Cálculo de nodos.....	40
Diseño de planos de máquina.	42
Anexo – Fotográfico de la fabricación.....	43
Proceso de corte con pulidora y disco de corte.....	44
Armado del marco con las piezas cortadas.....	45
Fabricación de los apoyos para la viga.....	48
Montaje del gato armado con el manómetro a la estructura.	49
Terminado de la máquina.	50
Proceso de soldadura.	50
Proceso de pintura anticorrosiva y pintura esmalte.	51
Anexo – Registro fotográfico del ensayo	51

Tabla de figuras

Figura 1 Ensayos destructivos y no destructivos.	5
Figura 2 Pasos para estudio de un modelado.	8
Figura 3 Equilibrio de fuerzas.	9
Figura 4 Fotoelasticidad.	9
Figura 5 Reacciones.	10
Figura 6 Prototipo educacional.	11
Figura 7 Aparato para la demostración y medición de momentos.	11
Figura 8 Armadura triangular con voladizo.	12
Figura 9 Relación fuerzas externas.	12
Figura 10 Ecuación para la deformación simple en la viga	13
Figura 9 Esquema del método de empujes sucesivos y zona afectada por la distribución de esfuerzos en el alma de la viga.(Ayestarán et al., 2017).....	17
Figura 10 Diagrama de flujo.	18
Figura 11 Perfiles	19
Figura 12 Gato hidráulico.	19
Figura 13 Configuraciones analizadas 1.	20
Figura 14 Configuraciones analizadas 2	20
Figura 15 Configuraciones analizadas 3	21
Figura 16 Configuraciones analizadas 4	21
Figura 17 Proceso de pintura.	22
Figura 17 Proceso de soldadura.	22
Figura 19 Plano de prototipo en 3D.....	24

Figura 20	Plano diseño de la máquina	24
Figura 21	Plano planta diseño de la máquina	25
Figura 22	Análisis estructurales 1.....	25
Figura 23	Análisis estructurales 2.....	26
Figura 24	Análisis estructural 3	26
Figura 25	Análisis estructural 4	27
Figura 26	Diámetro pistón del gato hidráulico	28
Figura 27	Pistón	28
Figura 28	Diagramas.....	30
Figura 29	Tubo 70 x 70 - 2 mm	31
Figura 30	Montaje del ensayo.....	32
Figura 31	Gráfica de deflexión vs presión.....	33
Figura 32	Diagrama para el diseño del prototipo.....	39
Figura 33	Diagrama de reacciones.....	39
Figura 34	Cálculo de las fuerzas en nodo A.	41
Figura 35	Cálculo de las fuerzas en nodo E.....	41
Figura 36	Cálculo de las fuerzas en el nodo C.....	42
Figura 37	Tubos utilizados en la fabricación del prototipo.	43
Figura 38	Corte de material.	44
Figura 39	Corte de material.	44
Figura 40	Corte de material.	45
Figura 41	Armado de la estructura.....	45
Figura 42	Armado de diagonales en la estructura.....	46

Figura 43	Unión del marco con la diagonales.....	46
Figura 44	Alargamiento y cambio de uniones rotativas a fijas.....	47
Figura 45	Instalación del manómetro al gato hidráulico.....	47
Figura 46	Estructura armada.....	47
Figura 47	Apoyos de la viga.....	48
Figura 48	Apoyos de la viga.....	48
Figura 49	Gato hidráulico montado en la estructura.....	49
Figura 50	Manómetro en funcionamiento.....	49
Figura 51	Base superior del tornillo del gato hidráulico.....	50
Figura 52	Utilizando soldadura en las uniones.....	50
Figura 53	Proceso de pintura anticorrosiva y esmalte.....	51
Figura 32	Medida del pistón del gato hidráulico.....	51
Figura 55	Gato hidráulico en posición inicial para el ensayo.....	51
Figura 56	Punto 25 bar en la prensa.....	52
Figura 57	Prensa en la posición final en el ensayo.....	52
Figura 58	Deflexión que obtuvo la viga al final del ensayo.....	53

Tablas

Tabla 1 Tabla de resultados de ensayo de vigas.....	32
Tabla 2 Presupuesto de fabricación del prototipo.	33

1. Introducción

La experimentación es parte fundamental en la formación para un ingeniero civil, aportando aprendizaje activo y vivencial en la conceptualización del comportamiento de los distintos materiales y de las estructuras (Behnejad, 2016). Además, ayuda a la formación de los estudiantes para actividades profesionales en referente a los ensayos de controles de calidad de los materiales y las pruebas de carga que desarrollan durante la ejecución de un proyecto de construcción.

En la Universidad Antonio Nariño sede Bogotá se cuenta con laboratorios y equipos de ensayos estándar para materiales de construcción y suelos. Sin embargo, es anhelado poder contar con equipos para los ensayos de estructuras para formación en las asignaturas de estática, resistencias de materiales y de análisis y diseño de estructuras, para poder desarrollar prácticas y fomentar la investigación experimental.

Los modelos experimentales son la base de los métodos empíricos de investigación y aportando a la comprensión del comportamiento de estructuras de concreto cuyo comportamiento es complejo por la propia heterogeneidad de los materiales que los componen (Harris & Sabnis, 1999).

Un elemento fundamental de interés son las vigas porque conforman estructuras de pórticos para edificios, puentes, entre otras estructuras. Con los ensayos sobre este tipo de elementos se podrán determinar deflexiones, deformaciones en los materiales, y su capacidad resistente, entre otros (Hanaor, 1998).

En ese sentido, se plantea y desarrolla un prototipo de marco de carga para ensayos a escala reducida de vigas, en pro de ayudar a fortalecer el aprendizaje de futuros estudiantes de ingeniería civil.

2. Objetivos

Objetivo general

Elaborar e implementar un prototipo didáctico para realizar ensayos a escala reducida de flexión de vigas en el laboratorio del área de estructuras de la Universidad Antonio Nariño.

Objetivos específicos

- Diseñar un marco de carga en acero para ensayo de vigas con configuraciones de tres y cuatro apoyos
- Fabricar el marco de carga en estructuras metálica para ensayos de vigas incorporando un dispositivo de carga y su medición.
- Realizar un ensayo de una viga de tres apoyos para mostrar las potencialidades de carga.

3. Marco teórico

Los conceptos estructurales se encuentran entre los principales fundamentos para el estudio, análisis y diseño en la ingeniería civil y estructural y esto es esencial para que los estudiantes los comprendan, los profesores los enseñen y los ingenieros los utilicen en la práctica de la ingeniería civil y estructural. En la universidad, los procesos de enseñanza de conceptos estructurales hay que mejorarlos para enfrentar los cambios y desafíos en nuestro entorno de aprendizaje actual y en el mundo laboral (Ji & Bell, 2018).

La ingeniería civil, como muchas otras áreas de la ingeniería, es versátil y cubre varios campos. De ahí la importancia de desarrollar nuevos procesos que faciliten el aprendizaje, y la enseñanza, de uno de esos campos, la mecánica estructural (Água-Doce, n.d.).

Hasta hace algunas décadas, la comprensión de los conceptos estructurales se ha desarrollado con base en cálculos manuales y a través de la experiencia con la construcción. No obstante, actualmente los cálculos manuales son reemplazados por el uso de computadoras y hacen falta actividades vivenciales para comprender los conceptos estructurales. Los conceptos y principios estructurales son abstractos y no se pueden ver ni sentir directamente, por ejemplo, las trayectorias de fuerza transmiten cargas desde sus puntos de acción a los soportes estructurales (Ji & Bell, 2018).

Ya en la parte aplicativa se puede desperdiciar una gran cantidad de tiempo, esfuerzo y gastos en las pruebas in situ a menos que los objetivos de la investigación estén claramente establecidos desde el principio. Esto afectará la elección del método de prueba, el alcance y la ubicación de las pruebas y la forma en que se manejan los resultados: los resultados de pruebas inapropiados o engañosos a menudo se obtienen como resultado de una verdadera falta de conocimiento o

comprensión de los procedimientos involucrados. Si se evitan disputas futuras sobre los resultados, el enlace de todas las partes involucradas presenta a una persona en una etapa temprana en la formulación de un programa de prueba (Jo, Jo, Cho, & Kim, 2020).

El comportamiento de tales sistemas puede investigarse mediante técnicas experimentales, es decir, sometiendo el sistema a condiciones de prueba planificadas y observando o midiendo la respuesta del sistema. Para sistemas que son grandes y de naturaleza compleja, tales investigaciones se llevan a cabo preferiblemente en una réplica del sistema, llamada modelo, hecha a menor escala por razones de economía, conveniencia y ahorro de tiempo (Sherwin, 1983).

Por lo tanto, los ensayos tanto en la parte de formación, control de calidad de los procesos y pruebas de carga son esenciales en el ingeniero civil. Los ensayos pueden ser destructivos o no destructivos (ver Figura 1).

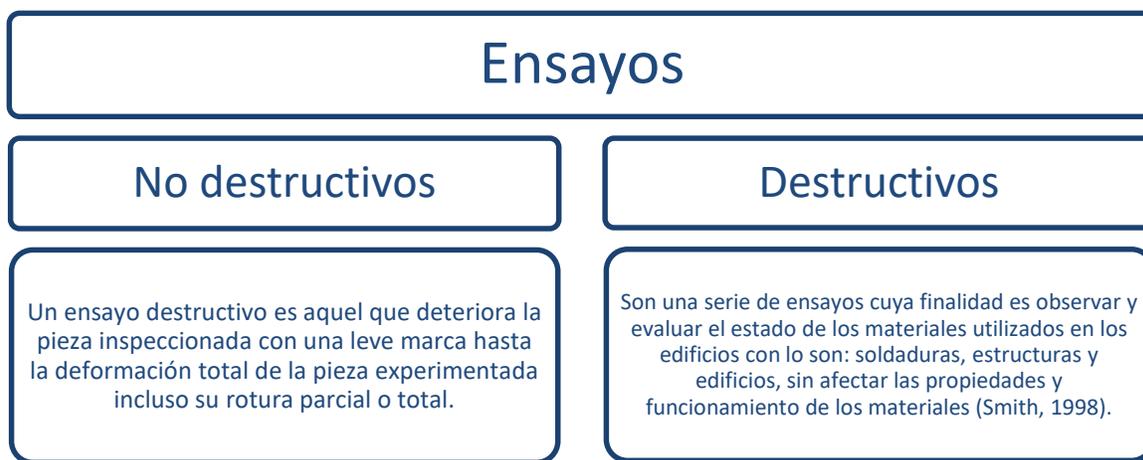


Figura 1 Ensayos destructivos y no destructivos.

Los prototipos didácticos y los modelos

Un prototipo es aquel que el estudiante aprende mediante la práctica los temas abarcados en las clases magistrales y los procesos de los ensayos que se le hacen a los diferentes elementos de

una estructura como lo son las vigas cual sea el material propuesto en la estructura (Duarte, Gútiérrez, & Fernández Morlaes, 2007). Un modelo estructural se define como “cualquier representación física de una estructura o una parte de la estructura. Lo más común es que el modelo se construya a una escala reducida”, Se aplica igualmente bien a modelos de estructuras hechas de cualquier material, supuesto (Sabnis, Harris, White, Mirza, & Klingner, 1983).

La formación de un ingeniero hoy incorpora en gran medida esta herramienta, a veces abandonando por completo el trabajo práctico. Sin embargo, el cálculo numérico solo responde, de manera más o menos precisa, a un problema matemático inevitablemente idealizado. Por lo tanto, es necesario validar los supuestos simplificadores introducidos en el modelado. Además, los valores utilizados en el cálculo deben ser bien conocidos (amortiguación estructural, resistencia de unión o condiciones límite). Todo esto requiere un trabajo experimental que a veces es difícil, incluso en el caso de un comportamiento relativamente simple que se puede modelar fácilmente (Doyle, 2005).

Elementos de tamaño reducido

Muchos elementos estructurales de tamaño reducido se usan habitualmente en estudios de investigación; algunos investigadores también clasifican las estructuras como modelos, aunque las condiciones de similitud no se aplican normalmente a los modelos de investigación a gran escala. En cambio, los métodos y ecuaciones de diseño se basan directamente en el comportamiento observado de estos modelos de investigación y, en consecuencia, la profesión de diseño les da plena aceptación. Cabe señalar que en los estudios anteriores todavía se pueden utilizar materiales prototipo. Por lo general, se hace una distinción importante cuando los materiales prototipo no se pueden usar para la estructura de tamaño reducido. En ese caso, los

materiales del modelo apropiado deben ser sustituidos y la estructura de tamaño reducido se designa adecuadamente como un modelo (Sabnis et al., 1983).

El proceso del modelado experimental

Según (Harris & Sabnis, 1999) Un estudio de modelado exitoso se caracteriza por una planificación experimental de una estructura o un proyecto de ingeniería, y una secuencia lógica y cuidadosa del enfoque analítico. La planificación de un modelo estructural o proceso de modelado suele ser imposible.

El modelo experimental puede tardar entre una o dos semanas y cuando el modelo es más detallado puede tardar entre seis o más meses para predecir el comportamiento de la falla en una estructura completa.

En el modelado se debe de evitar el análisis excesivo de la estructura, donde el ingeniero responsable del proyecto debe prescribir lo que se quiere lograr en el modelo (Harris & Sabnis, 1999). Un estudio de modelado típico se puede dividir en el proceso de la Figura 2.

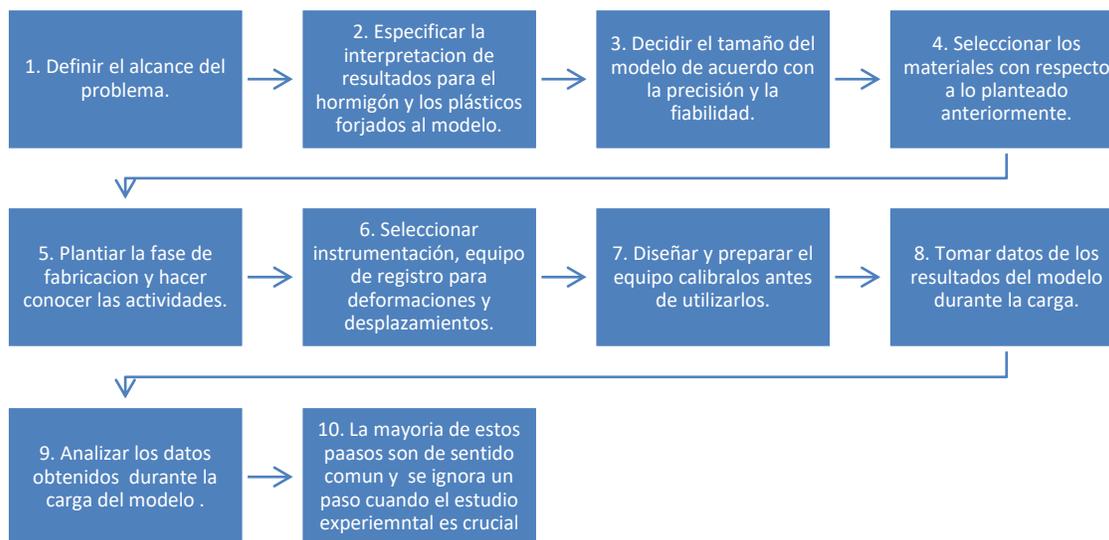


Figura 2 Pasos para estudio de un modelado.

3.4. Ejemplos de modelos estructurales

Modelos experimentales para apoyar la enseñanza de la mecánica estructural.

Este trabajo tiene como objetivo contribuir a los laboratorios de mecánica estructural del Instituto superior técnico un conjunto de nuevos experimentos. En él se muestra una serie de guías para que los estudiantes y profesores utilicen algunos de los equipos disponibles en el laboratorio. Estas guías describen la metodología, el manejo de los equipos, tablas y formularios para desarrollar con los resultados obtenidos en dichos laboratorios. Algunos de estos laboratorios son implementados en otras universidades. Las intervenciones de cada experimento incluyen los conceptos claves para el desarrollo en el campo de mecánica estructural, creando nuevas propuestas en esta área, estos son algunos de los experimentos manejados en este trabajo.

Estático y dinámico de cuerpos rígidos.

En este experimento se toman conceptos de estática y dinámica. En la primera parte del trabajo se aborda el equilibrio de fuerzas (Figura 3)

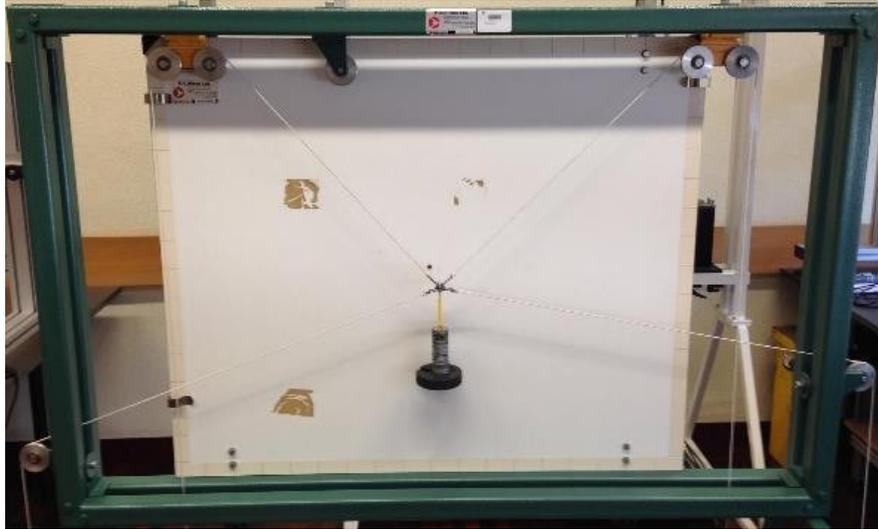


Figura 3 Equilibrio de fuerzas.

Mecánica de cuerpos deformables

En este experimento toma conceptos más avanzados que el experimento anterior ya que muestra conceptos como la tensión y deformación, existen equipos como el de la fotoelasticidad (Figura 4)



Figura 4 Fotoelasticidad.

Nuevos experimentos y equipos

Este trabajo empezó con la investigación de nuevos experimentos con el fin de obtener mejores resultados en la universidad para la enseñanza de mecánica estructural (Água-Doce, n.d.).



Figura 5 Reacciones.

Laboratorio modelos estructurales

Este proyecto tiene la temática de un grupo de investigación de Tecnología y Diseño de Edificaciones, se orientan en estudios para estudiantes y profesores en los apoyos didácticos para la construcción y las estructuras con materiales de prototipos didácticos. Este es un proyecto académico que busca reforzar el aprendizaje en el manejo de equipos de laboratorio didáctico y el uso de modelos de enseñanza.

La investigación de este proyecto se basa en el diseño y desarrollo de una aplicación como apoyo a la docencia, su objetivo es fomentar un mejor entendimiento estructural de los edificios complementando los espacios magistrales con teorías de apoyo didáctico donde los resultados

sean satisfactorios y alcanzando el objetivo para que sea funcional dicho prototipo (Lee et al., 2012).

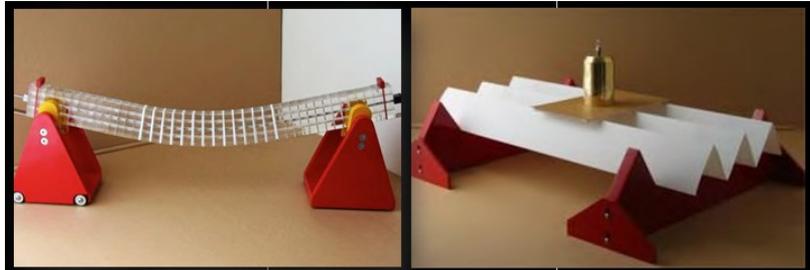


Figura 6 Prototipo educacional.

Aparato para la demostración y medición de momentos.

El objetivo de este aparato es demostrar la relación que existe entre fuerza aplicada en un elemento lineal y el momento para provocar el giro las características en elementos que trabajan sometidos a flexión como son las vigas (Lee et al., 2012).



Figura 7 Aparato para la demostración y medición de momentos

Armadura triangular con voladizo.

El objetivo de este modelo es comprender y comprobar el comportamiento mecánico estructural de las armaduras de forma sencilla y rápida con el fin de deducir cuales son las barras que están sometidas a esfuerzos (Lee et al., 2012).

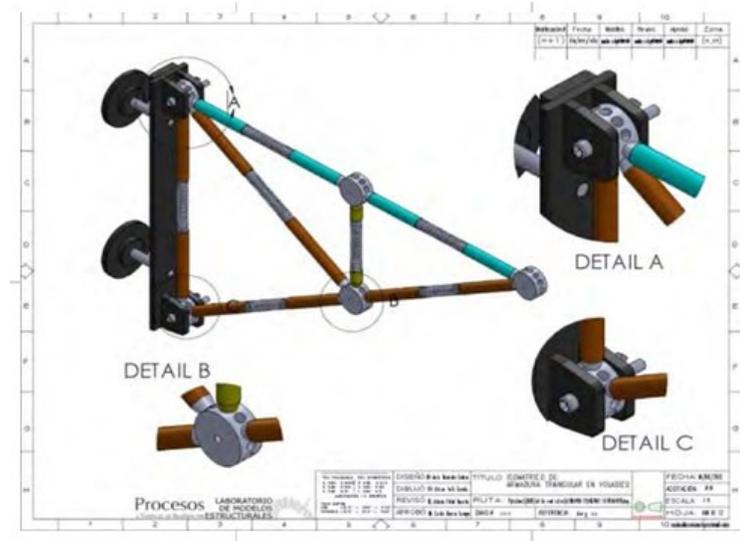


Figura 8 Armadura triangular con voladizo.

Modelos experimentales aplicados a vigas

Una viga es un elemento estructural primordialmente con cargas perpendiculares, sus esfuerzos correspondientes son de flexión, su posición generalmente es horizontal (Ji & Bell, 2018).

Momentos flectores y deflexión en vigas

La ecuación de deformación de la figura 10 se explicará para ayudar a entender la relación que existe entre momento de inercia y el momento de flexión y de esta manera tener el conocimiento para poder utilizar la estructura donde se soporta un mayor momento de flexión. (Yao, 2016)

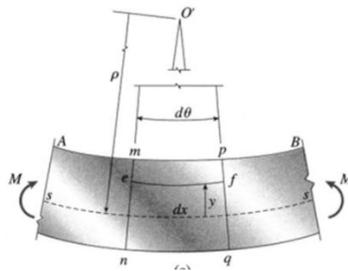


Figura 9 Relación fuerzas externas.

$$\sigma_x = \frac{M_z * Y}{I_z}$$

$$\sigma_x = E * \varepsilon_x = (-1) * E * k * y$$

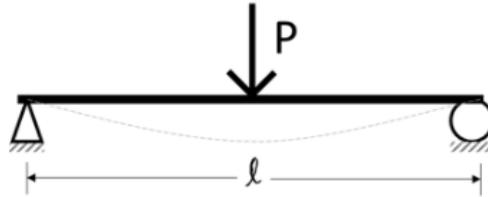


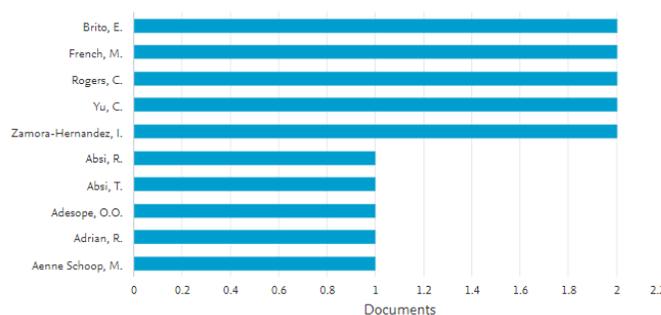
Figura 10 Ecuación para la deformación simple en la viga

$$\delta_c = \frac{Pl^3}{48 EI}$$

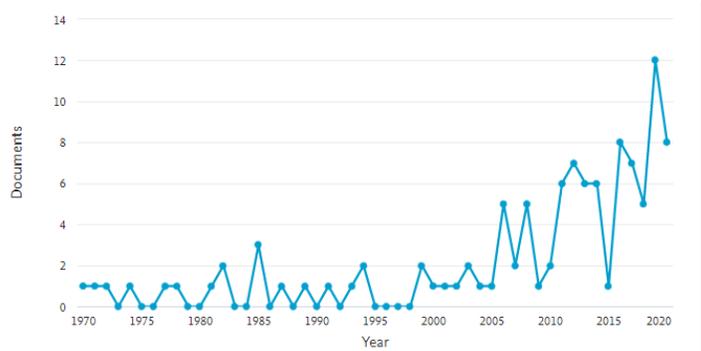
Estado del arte

Se realiza la búsqueda mediante herramientas virtuales como Scopus, Scimedirect, Elsevier y Doaj, estos sitios web contienen una gran colección de artículos de todo el mundo que permiten visualizar las soluciones que han adoptado otros países para ensayos realizados en las estructuras como son las vigas. Para ello, se utilizó la siguiente ecuación de búsqueda: TITLE ((teaching OR living OR classroom*) AND (structure* OR static OR mechanic*) AND (experiment* OR model OR prototype* OR test*)) obteniendo los documentos que se presentan a continuación:

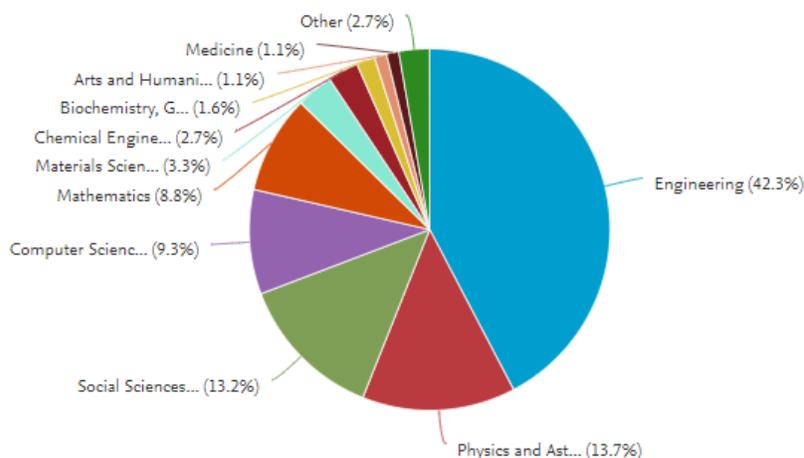
Documentos por autor



Documentos por año



Documentos por área de temática



Desarrollo de una impresora 3D para hormigón estructural.

Este desarrollo se trata de un prototipo de impresora para hormigón de un tamaño 1x1x1m utilizado para pruebas de laboratorio y los diferentes materiales cementosos con mezclas de diferentes diseños para encontrar su idoneidad y eficiencia. En esta impresora se adoptó un programa fresado numérico por computadora. Esta se llevó a cabo en varios experimentos donde se probaron las propiedades adecuadas y el control mecánico del material, así conociéndolos valores ópticos de la relación agua cemento de los materiales cementosos. Además la viscosidad

adecuada del material por pruebas de asentamiento y se encontró el tamaño adecuado de las arenas para el sistema de dispensación (Jo et al., 2020).

Impresión 3D de hormigón reforzado.

Este documento trata del enfoque novedoso para la fabricación de materiales reforzados de miembros de hormigón. Utilizando la tecnología de la impresión en 3D y son ensamblados con sistemas de refuerzo en acero, este enfoque se hace para la reducción de hormigón y de materiales para que el miembro diseñado sea más ligero en la estructura. Las pruebas desarrolladas en este enfoque dan a conocer la flexión en tres puntos como se presenta en las vigas RC de sección transversal (Asprone, Auricchio, Menna, & Mercuri, 2018).

Exploración experimental de cable metálico como refuerzo.

Este método de construcción no es adecuado para que los métodos de refuerzo convencionales logren un comportamiento de falla dúctil. Este estudio busca alternativas que con un cable de metal en el hormigón para que sirva de refuerzo. Las pruebas de flexión muestran el potencial de este refuerzo, la tensión de unión fue comparable a los valores reportados en la barras de acero dando una falla dúctil paralela a la dirección del filamento, incluso se produzca un deslizamiento del cable, y las mejoras a este proyecto debe lograr mejor resistencia a la fisuración (Bos, Ahmed, Jutinov, & Salet, 2017).

Prototipo didáctico para la enseñanza de la ingeniería estructural.

Este proyecto consiste en la creación de un prototipo a escala de un puente de acero en Puerto Salgar. En este modelo se miden las deformaciones unitarias y las fuerzas internas en tiempo

real. Este prototipo es una herramienta didáctica utilizada para dictar varias materias en el área de estructuras y también utilizada en los laboratorios donde el estudiante se involucra con casos reales y los procesos que ocurren en las estructuras, y también profundizar en las metodologías de los análisis de los procesos de una obra o infraestructura ingenieril (Ene, 2007).

Perfiles de acero para la reparación de extremos de vigas de madera deteriorados

Este documento describe el diseño de un procedimiento para la mejora de vigas, para la verificación experimental se ensayaron 30 vigas en flexión obteniendo la rigidez y la capacidad por carga se hicieron de especímenes para los diferentes grupos de vigas. El primer grupo se dio con madera laminada, el segundo estuvo conformado por madera de pino silvestre y el tercero se dio por madera de pino maciza se puede concluir que los perfiles metálicos pueden solucionar los problemas derivados del soporte inseguro (González-Bravo, Arriaga, Íñiguez-González, & Maldonado, 2011).

Resistencia de vigas esbeltas de acero inoxidable bajo cargas concentradas mediante análisis por elementos finitos.

En este documento se encuentra como en las estructuras utilizan el acero inoxidable en vigas ya que estas tienen una gran relación entre costo- beneficio y brindando una gran protección a la corrosión, resistencia al fuego y una resistencia a la fluencia (ver figura 1). Vemos el esquema del método de empujes (Ayestarán et al., 2017).

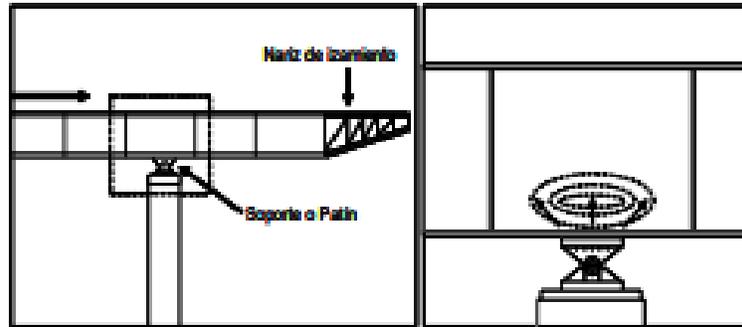


Figura 11 Esquema del método de empujes sucesivos y zona afectada por la distribución de esfuerzos en el alma de la viga. (Ayestarán et al., 2017)

Análisis numérico experimental de un prototipo de sección mixta de hormigón madera.

Este documento nos habla de estructuras mixtas de hormigón madera. El principal objetivo de este documento es lograr un óptimo rendimiento entre los dos materiales y que las propiedades de estos sean favorables, y solucionar una conexión eficiente que garantice el en conjunto de los elementos de las estructuras donde se aplique esta unión de dos materiales como lo son madera-hormigón (Astori, Barrios D'ambra, Solari, & Kostesty, 2007) .

Metodología

A continuación, se describirán las actividades desarrolladas para el proyecto de la estructura de carga, el cual se tienen identificadas tres fases principales: la concepción y el diseño, la fabricación y ejemplo de prueba (ver Figura 10).

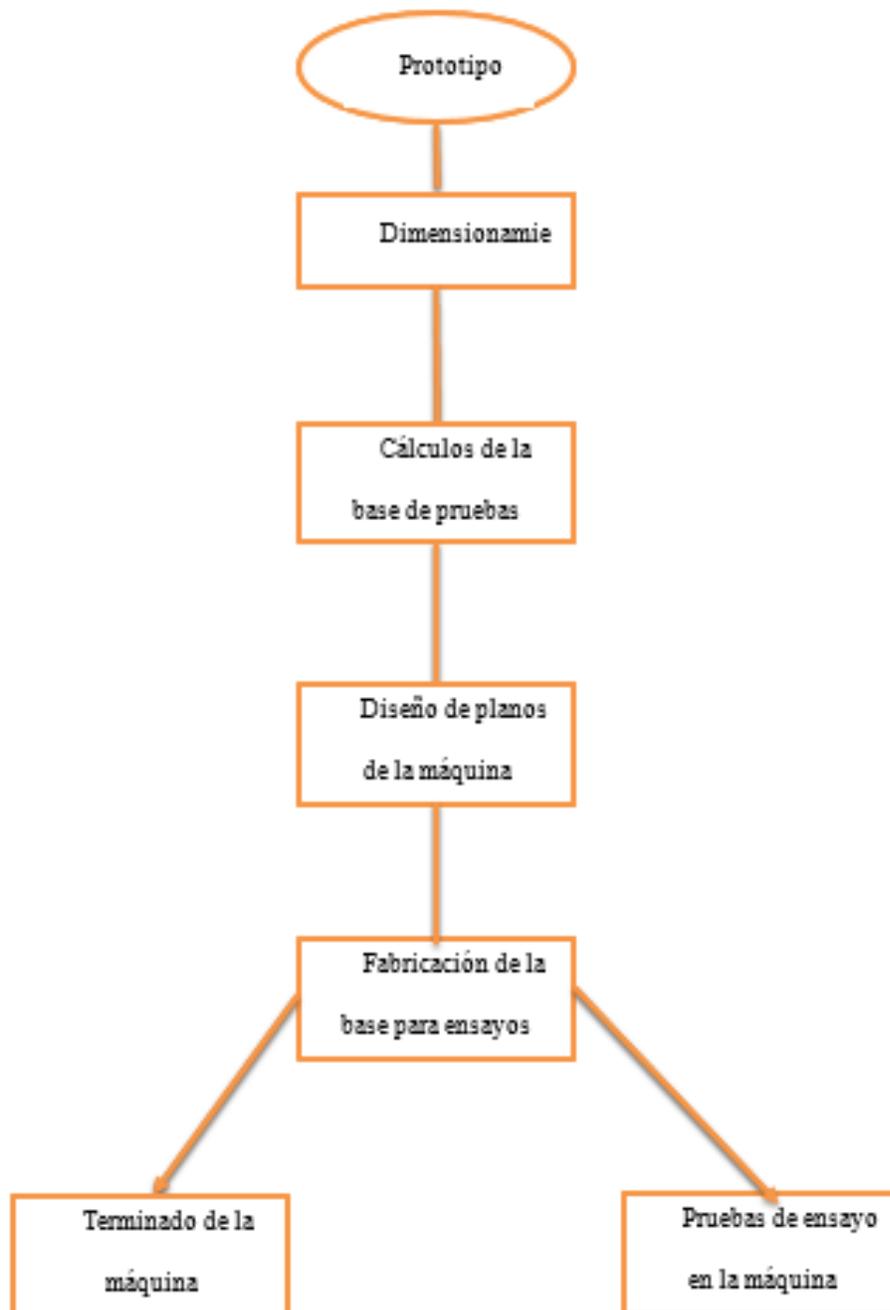


Figura 12 Diagrama de flujo.

Para la concepción, se aspiraba poder hacer un ensayo de una viga de 3.00 m de longitud para pruebas de tres apoyos y cuatro apoyos. Las cargas también deben ser auto compensadas por la propia estructura. Por otro lado, la mitad de los perfiles de acero para fabricación fueron donados por una empresa de fabricación de estructuras metálicas por la empresa Cadesan Constructor S.A.S. Los perfiles de aceros con los que contaba fueron tuberías cuadradas de 70 mm x 70x2mm y calidad de acero de $f_y=350$ MPa (ver Figura 11).



Figura 13 Perfiles

Con ello, se consideró que una estructura de cercha era una alternativa factible para su construcción. Adicionalmente, para aplicar la carga se consideró poder usar un cilindro hidráulico de vehículo y cuya especificación es de 40 kN de carga máxima (ver Figura 12).



Figura 14 Gato hidráulico.

Definida la geometría, se continuo con los análisis estructurales y el diseño. En los análisis se usó la herramienta en línea 2D-Truss Analysis (Valdivia, 2020). Los elementos de la cercha se verificaron para que se comporten elásticamente durante el ensayo. Adicionalmente, se determinan las deflexiones y conocer la rigidez de la cercha. Los análisis se realizan localizando una, dos y tres cargas de 40 kN localizadas en los nodos superiores de la cercha, analizando posibles configuraciones adicionales que se podrían usar en un futuro adecuando más cilindros de carga. En la Figura 13 a la Figura 16 se presentan las configuraciones analizadas

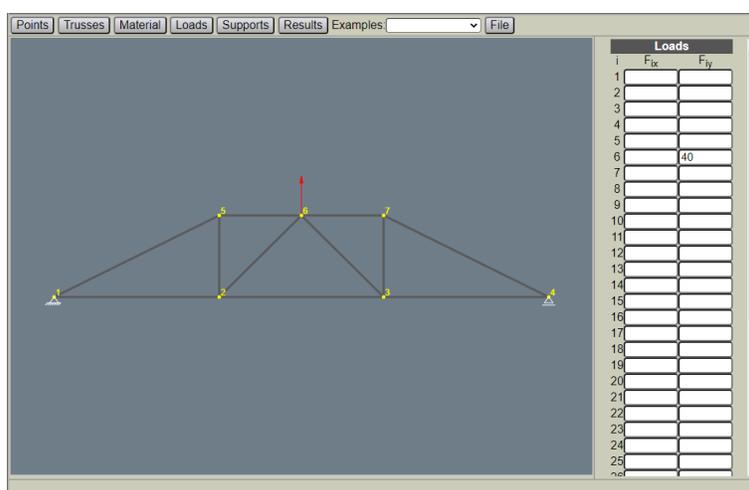


Figura 15 Configuraciones analizadas 1.

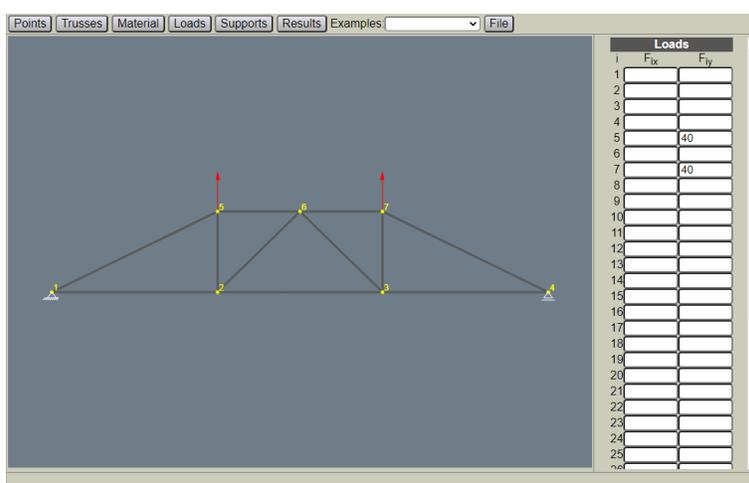


Figura 16 Configuraciones analizadas 2.

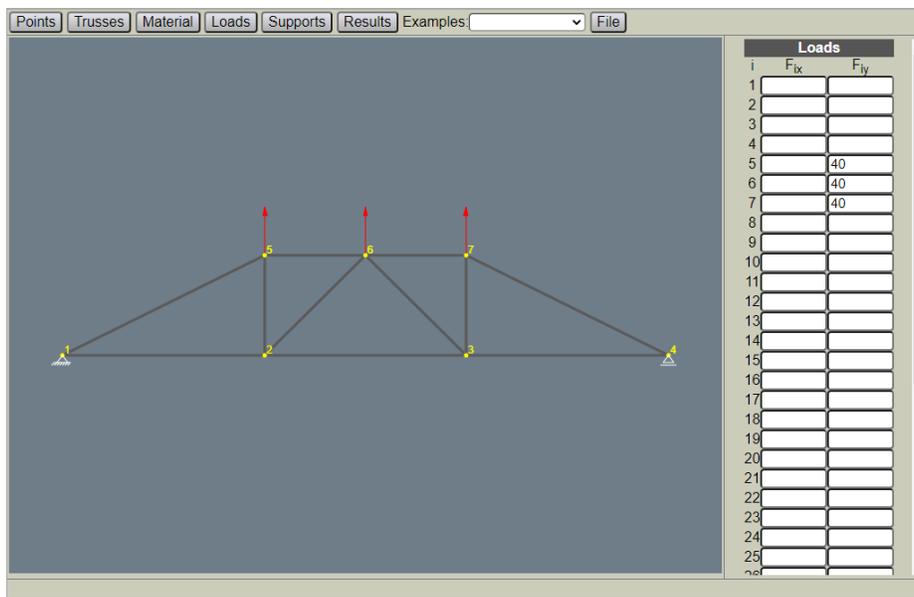


Figura 17 Configuraciones analizadas 3.

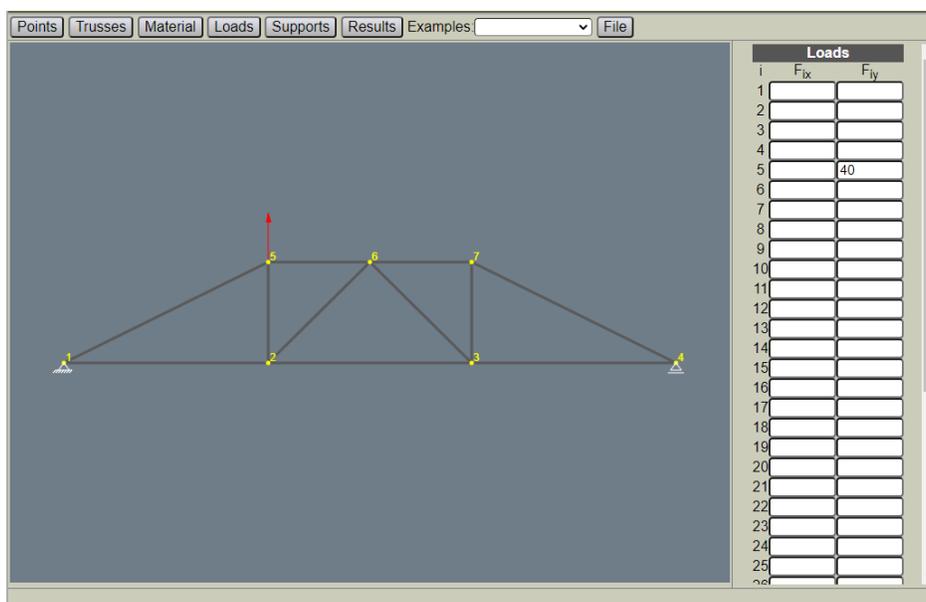


Figura 18 Configuraciones analizadas 4.

El siguiente paso fue la fabricación, se realizaron los cortes de los perfiles y se unieron por medio de soldadura revestida (ver Figura 17 – foto cortando – foto soldando). Una vez terminada, se procedió a realizar acabado con anticorrosivo y pintura (ver Figura 18).



Figura 19 Proceso de corte.



Figura 20 Proceso de soldadura.

Por otro lado, era indispensable poder medir la carga y el desplazamiento, con lo cual se compró y adapto un sensor de presión (manómetro) de 15000 psi al cilindro hidráulico y se adquirió un sensor de desplazamiento (comparador) de 10 mm de recorrido y una resolución de .01 mm (ver Figuras 17 y 18 foto del gato hidráulico con el manómetro y la foto del comparador).



Figura 18 Gato con el manómetro



Figura 19 Comparador de caratula.

Por último, se realizó un ensayo de un perfil metálico usado en la fabricación en una configuración viga de tres apoyos con una longitud entre apoyos de 1.0 m y la carga puntual aplicada a la mitad del apoyo. Se aplicó carga hasta 13 kN para medir la deflexión en comportamiento lineal y elástico de la viga. Los resultados se compararon con los valores teóricos obtenidos del análisis estructural y valores nominales del perfil y los materiales.

Resultados

En la Figura 19 se presenta vista tridimensional de la estructura de carga. En la Figura 20 se puede ver el plano en alzado con las dimensiones de la cercha y la Figura 21 la planta de la misma.

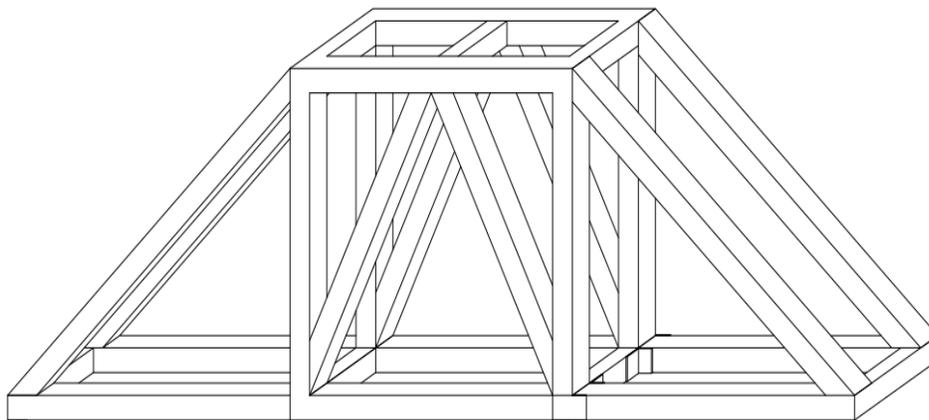


Figura 21 Plano de prototipo en 3D

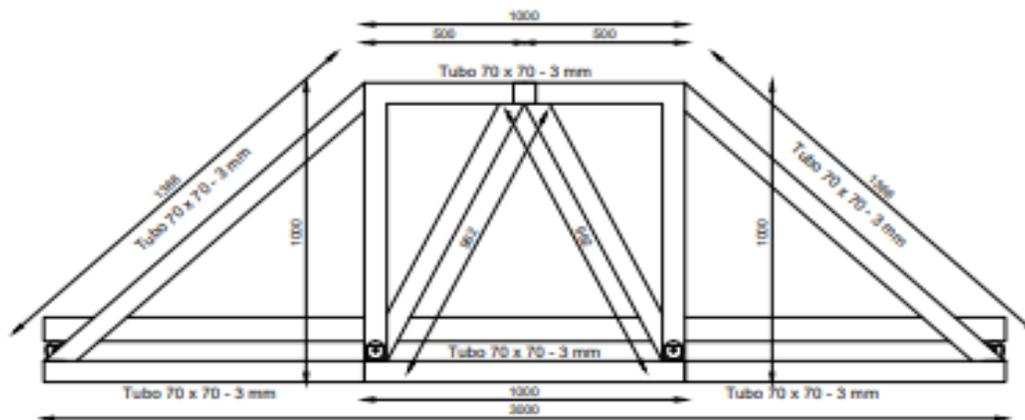


Figura 22 Plano diseño de la máquina

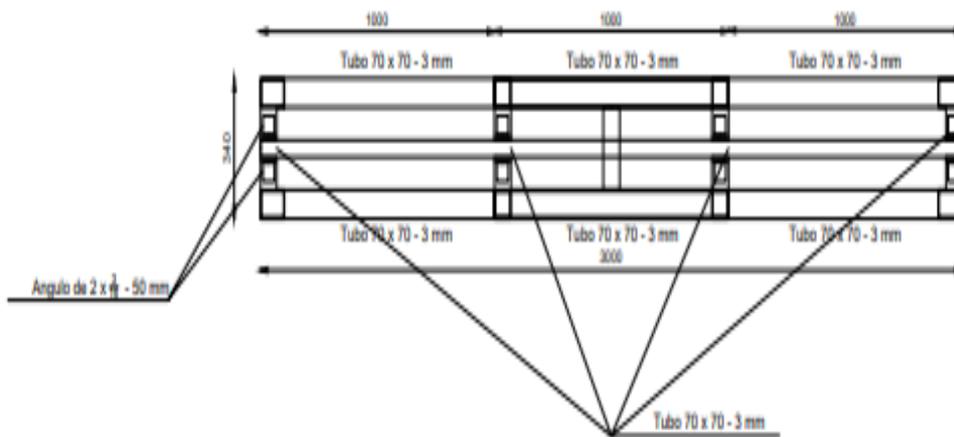


Figura 23 Plano planta diseño de la máquina

En cuanto a los análisis estructurales, en la Figura 22 a la Figura 25 se presentan los resultados obtenidos para las posibles configuraciones de carga previstas.

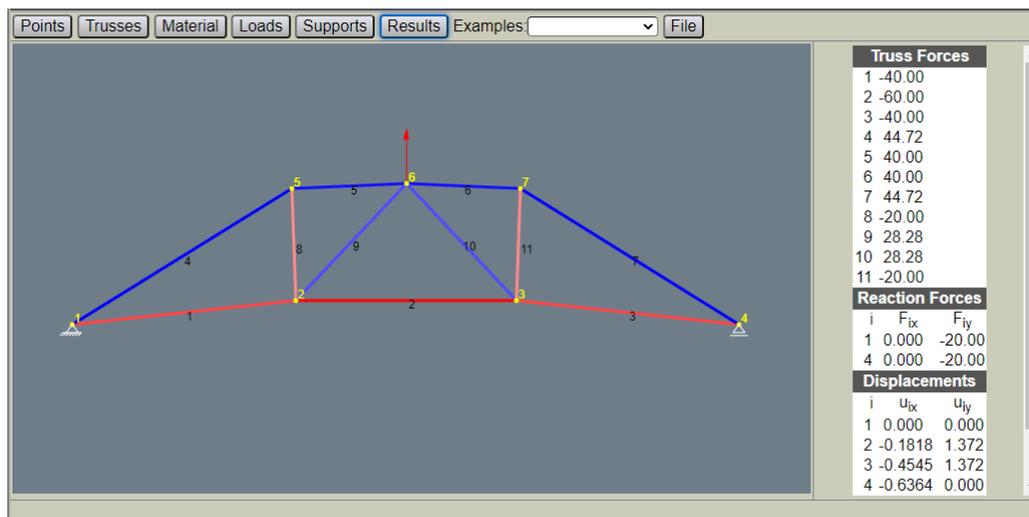


Figura 24 Análisis estructurales 1.

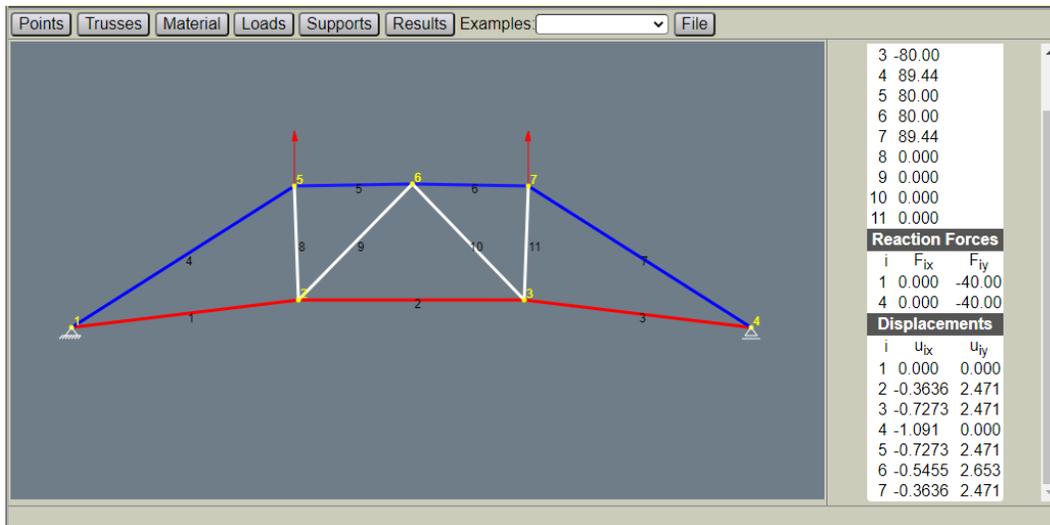


Figura 25 Análisis estructurales 2

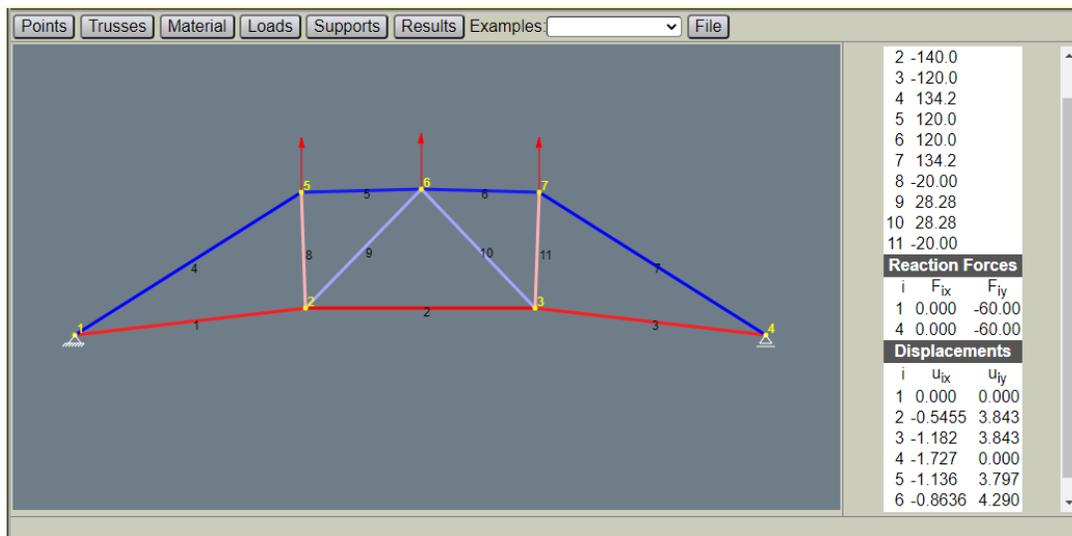


Figura 26 Análisis estructural 3

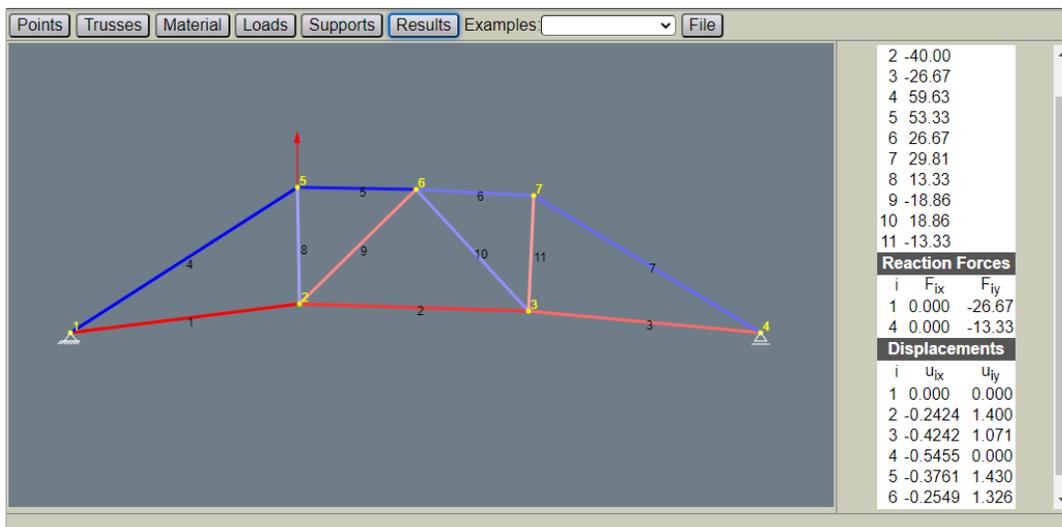


Figura 27 Análisis estructural 4

La carga máxima de los elementos estructurales es de 140 kN a compresión en y de 134.2 kN para el caso de aplicación de 3 cargas puntuales. La carga para no superar esfuerzo elástico de $f_y/2$ para dos perfiles es de $F_{adm} = 0.5 \times f_y \times 2 \times A = 0.5 \times 350 \text{ MPa} \times 2 \times 5500 \text{ mm}^2 = 192.5 \text{ kN}$. En consecuencia, los elementos trabajan elásticamente. En cuanto a la resistencia a corte, la carga para comportamiento elástico con esfuerzo admisible de corte de $0.33f_y$ se obtiene para cuatro planos de corte, $V_{adm} = 0.33 \times f_y \times 4 \times h \times e = 0.33 \times 350 \text{ MPa} \times 4 \times 50 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} = 46.2 \text{ kN}$, superior a las 40 kN de la carga especificada. En cuanto a las deformaciones la cercha presenta una deflexión para la configuración de tres apoyos 1.3 mm, y de 3.8 mm para la configuración con 3 cargas.

Para el ensayo se prueba en una viga en tres apoyos, primero se realizó el protocolo de carga, para ello se determina la relación entre la medida del sensor de presión con la carga aplicada con el cilindro, como se presenta a continuación:

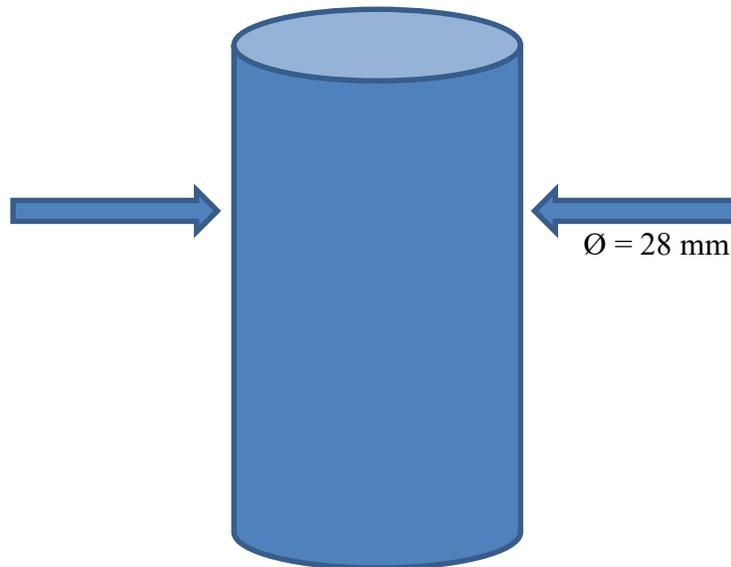
Fuerza máxima del gato hidráulico.

Figura 28
Diámetro pistón del
gato hidráulico.



Figura 29 Pistón

Área del cilindro interno del gato hidráulico.

$$A = \frac{\pi \varnothing^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi 2.8^2}{4}$$

$$A = 615.75 \text{ mm}^2$$

Fuerza máxima del gato hidráulico, trabajando a 1000 bar por especificación.

$$F_{\max} = 1000 \text{ bar} * \frac{0.1 \text{ Mpa}}{1 \text{ bar}} * 615.75 \text{ mm}^2$$

$$F_{\max} = 100 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 615.75 \text{ mm}^2$$

$$F_{\max} = 61575 \text{ N} \rightarrow 61.575 \text{ KN} \approx 6.2 \text{ ton}$$

$$\frac{1000}{6.2} = \frac{x}{4} \rightarrow x = 1000 * \frac{4}{6.2}$$

$$x = 645 \text{ bar} * 14.5 \frac{\text{psi}}{\text{bar}}$$

$$X = 9353 \text{ psi} \text{ Presión máxima}$$

Y se encuentra que por cada 25 bar se aplican 1.54 kN de carga.

La configuración estructural de la viga se presenta en la Figura 28, así mismo los diagramas de cortante y momento.

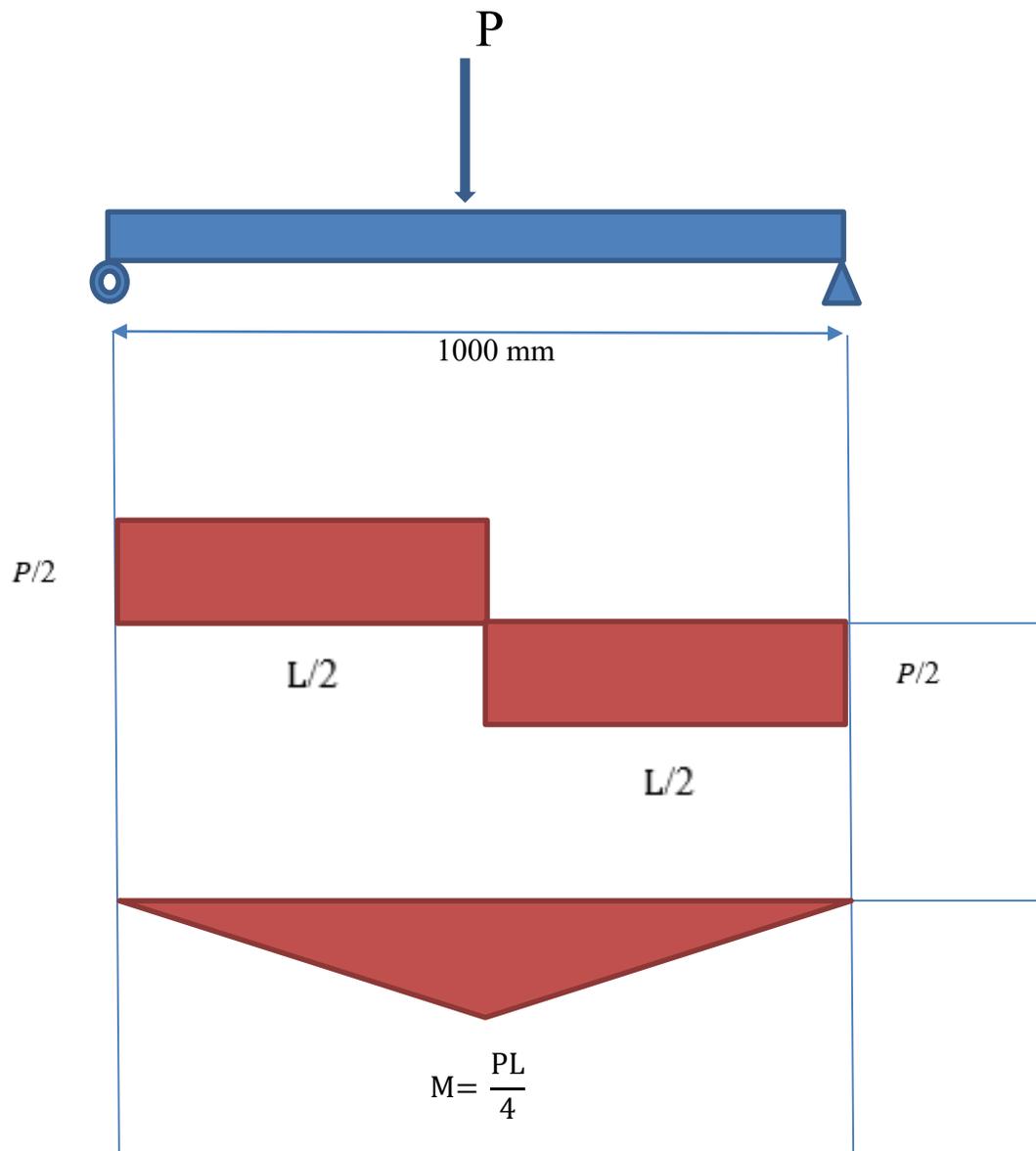


Figura 30 Diagramas.

A continuación, se calcula la deflexión teórica de viga para comportamiento elástico:

$$\Delta = \frac{M/EI * l/2}{2} * \frac{2}{3} * \frac{l}{2}$$

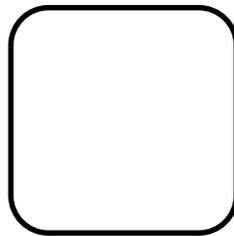
$$\Delta = \frac{M}{12 EI} l^2$$

$$\Delta = \frac{M l^2}{12 EI} * \frac{PL/4 * 12}{12 EI}$$

$$\Delta = \frac{PL^3}{48 EI}$$

Para el perfil a ensayar se determina los esfuerzos y la deformación teórica, en este caso se controló que la carga no superara un esfuerzo de $0.6f$ y para hacer mediciones en el rango lineal elástico. Las propiedades geométricas nominales de sección transversal del perfil y de los materiales se presentan a continuación:

Tubo estructural de 70 x 70 – 2mm



*Figura 31 Tubo 70
x 70 - 2 mm*

$$L = 1000 \text{ mm}$$

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$I = 40.73 \text{ cm}^4$$

$$f_y = 50 \text{ psi}$$

$$f_y = 345 \text{ Mpa}$$

En la Figura 30 se presenta el montaje del ensayo realizado en su posición final. Los resultados de la deflexión experimental en el centro de luz medida con el comparador se presentan en la tabla 1 para los incrementos de presión de 25 bar y un máximo de 225 bar. Además, se compara

la deflexión teórica con la experimental calculando el error y graficando los resultados (ver Figura).



Figura 32 Montaje del ensayo.

Presión (bar)	Presion (psi)	Fuerza (N)	Momento (N* mm)	Esfuerzo (N/mm ²)	Deflexión Teórica (mm)	Teórica desde 25 bar	Medidad Comparador(mm)	Experimental desde 25 bar	Error %
0	0								
25	362.5	1539.4	384843.8	33.07	0.39	0.00	1.82	0.0	
50	725.0	3078.8	769687.5	66.14	0.79	0.39	2.11	0.3	26.34
75	1087.5	4618.1	1154531.3	99.21	1.18	0.79	2.33	0.5	35.23
100	1450.0	6157.5	1539375.0	132.28	1.57	1.18	3.00	1.2	0.09
125	1812.5	7696.9	1924218.8	165.35	1.97	1.57	3.41	1.6	0.97
150	2175.0	9236.3	2309062.5	198.42	2.36	1.97	3.82	2.0	1.60
175	2537.5	10775.6	2693906.3	231.49	2.76	2.36	4.37	2.6	7.95
200	2900.0	12315.0	3078750.0	264.56	3.15	2.76	4.92	3.1	12.49
225	3262.5	13854.4	3463593.8	297.63	3.54	3.15	5.02	3.2	1.60

Tabla 1 Tabla de resultados de ensayo de vigas.

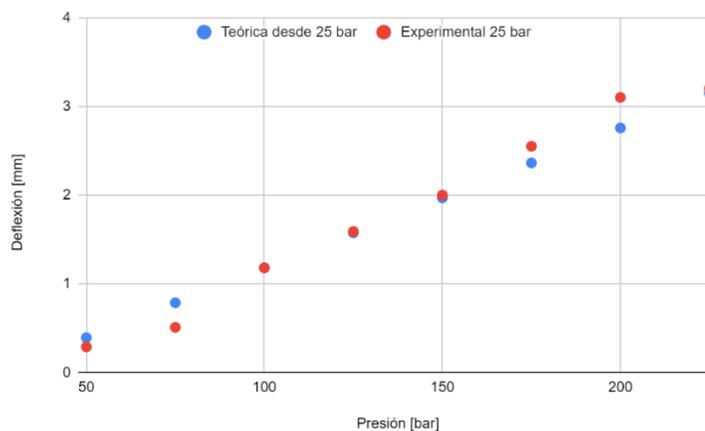


Figura 33 Grafica deflexión vs presión.

La inversión en materiales y sensores para la realización del prototipo se presenta la tabla 2.

PRESUPUESTO ELABORACION DE PROTOTIPO					
ANALISIS DE PRECIOS PARA MONOGRAFIA (PROTOTIPO)					
ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO	ESTUDIANTE	EMPRESA
Mano de obra					
Soldador	DIA	7	\$ 60.000	\$ 420.000	
Ayudante	DIA	7	\$ 35.000	\$ 245.000	
Equipos					
Computador	DIA	0	\$ -	\$ -	\$ -
Equipo de soldadura	DIA	7	\$ 10.000	\$ 70.000	
Pulidora	DIA	7	\$ 5.000	\$ 35.000	
Materiales para el prototipo					
Tubos 70 x 70 - 2 mm	UN	4	\$ 113.000	\$ 226.000	\$ 226.000
Gato para carro	UN	1	\$ 70.000	\$ 70.000	\$ -
Manometro 15000 PSI	UN	1	\$ 120.000	\$ 120.000	\$ -
Comparador de caratula 10 mm	UN	1	\$ 94.500	\$ 94.500	\$ -
Resortes	UN	2	\$ 7.500	\$ 15.000	\$ -
Pintura esmalte	Galón	1	\$ 17.000	\$ 17.000	\$ -
Pintura anticorrosiva	Galón	1	\$ 20.000	\$ 20.000	\$ -
Tubo redondo	UN	1	\$ 2.000	\$ 2.000	\$ -
Platina 5/8	UN	1	\$ 10.000	\$ -	\$ 10.000
Platina 1/8	UN	1	\$ 7.500	\$ -	\$ 7.500
Soldadura	KG	5	\$ 9.000	\$ -	\$ 45.000
total				\$ 1.334.500	\$ 271.000
costo directo				\$ 1.605.500	
imprevistos 3%				\$ 48.165	
total				\$ 1.653.665	

Tabla 2 Presupuesto de fabricación del prototipo.

Conclusiones

El prototipo didáctico cumple con el funcionamiento específico para el cual se elaboró; medir el comportamiento que tiene la viga cuando está sometida a cargas. Los resultados obtenidos podrán ser analizados por los estudiantes de ingeniería civil de una forma experimental en sus clases teórico prácticas.

Los resultados obtenidos de las pruebas que se realizaron con el prototipo didáctico son acordes a los planteamientos de los diferentes teóricos que se mencionan en este trabajo y cumple con lo estipulado en el currículo del programa de ingeniería civil.

Mediante la elaboración y pruebas realizadas al prototipo didáctico se concluyó que será funcional en el laboratorio del área de estructuras de la Universidad Antonio Nariño y servirá como una herramienta para los futuros ingenieros en sus prácticas.

Limitaciones y aportes

Limitaciones

En este proyecto se encontraron varias limitaciones por la complejidad del proyecto y se han visto en los avances del proyecto a medida que se iba avanzando se encontraba la solución a cada dificultad.

1. En los cálculos y el diseño de la máquina
2. En el funcionamiento del gato hidráulico
3. En el clima
4. La pandemia para conseguir los materiales
5. En lo económico
6. En el funcionamiento de la herramienta

Aporte

Este prototipo se realizó con la finalidad de crear un laboratorio de estructuras donde se puedan realizar los comportamientos de la viga, cuando están presentando cargas y practicar estas deflexiones que le ocurren a ellas.

Por otro lado, este prototipo es creado para que los estudiantes interactúen en las clases magistrales y con los comportamientos de las vigas en las estructuras en la vida real.

De igual forma el proyecto se deja abierto para unos futuros trabajos de grado donde se pueden utilizar diferentes procesos para hacer ensayos como lo son el de cuatro apoyos, ensayos a cortante y los diferentes ensayos que se puedan evidenciar en este prototipo.

Referencias bibliograficas

- Ambrose, J. (1998). *Análisis y Diseño de Estructuras*. México: Limusa.
- Água-Doce, R. M. (n.d.). Experimental models to support the teaching of structural mechanics.
- Asprone, D., Auricchio, F., Menna, C., & Mercuri, V. (2018). 3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach. *Construction and Building Materials*, 165, 218–231. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.018>
- Astori, R. E., Barrios D'ambra, R., Solari, F., & Kostesty, L. E. (2007). Analisis Numerico-Experimental De Un Prototipo De Seccion Mixta De Hormigón-Madera. *Mecánica Computacional*, XXVI, 111–128.
- Ayestarán, A., Graciano, C., González-estrada, O., Palmas, Q. Las, Sanz, C., & Chaguaramos, U. L. (2017). Resistencia de vigas esbeltas de acero inoxidable bajo cargas concentradas mediante análisis por elementos finitos Strength of stainless steel girders under concentrated loads using finite element analysis. 16(2), 61–69.
- Behnejad, S. A. (2016). Benefits of full-scale physical models in civil engineering education. *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*, 2016-June. <https://doi.org/10.18260/p.26373>
- Bos, F. P., Ahmed, Z. Y., Jutinov, E. R., & Salet, T. A. M. (2017). Experimental exploration of metal cable as reinforcement in 3D printed concrete. *Materials*, 10(11), 2020. <https://doi.org/10.3390/ma10111314>
- Doyle, J. F. (2005). Modern Experimental Stress Analysis: Completing the Solution of Partially Specified Problems. In *Modern Experimental Stress Analysis: Completing the Solution of Partially Specified Problems*. <https://doi.org/10.1002/0470861584>
- Duarte, J. E., Gutiérrez, G. J., & Fernández Morlaes, F. H. (2007). Desarrollo de un prototipo

didáctico como alternativa pedagógica para la enseñanza del concepto de inducción electromagnética. *TED: Tecné, Episteme y Didaxis*, (21), 77–83.

<https://doi.org/10.17227/ted.num21-364>

Ene, C. (2007). *Notas técnicas*. 17(1).

González-Bravo, C., Arriaga, F., Íñiguez-González, G., & Maldonado, L. (2011). Prótesis metálicas para la reparación de cabezas de vigas de madera degradadas. *Informes de La Construcción*, 63(521), 37–45. <https://doi.org/10.3989/ic.10.004>

Hanaor, A. (1998). *Principles of Structures*. Wiley.

Harris, H. G., & Sabnis, G. (1999). *Structural Modeling and Experimental Techniques*, Second Edition. CRC Press.

Ji, T., & Bell, A. (2018). Seeing and touching structural concepts. In *Seeing and Touching Structural Concepts*. <https://doi.org/10.1201/9781315273532>

Jo, J. H., Jo, B. W., Cho, W., & Kim, J. H. (2020). Development of a 3D Printer for Concrete Structures: Laboratory Testing of Cementitious Materials. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 14(1), 2020. <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0388-2>

Lee, S., Hahn, C., Rhee, M., Oh, J. E., Song, J., Chen, Y., ... Fallis, A. . (2012). 濟無No Title No Title. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.

<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Sabnis, G. M., Harris, H. G., White, R. N., Mirza, M. S., & Klingner, R. E. (1983). Structural Modeling and Experimental Techniques. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 105, pp. 307–307. <https://doi.org/10.1115/1.3140679>

Sherwin, K. (1983). Experimental modelling in engineering. In *Journal of Mechanical Working Technology* (Vol. 8). [https://doi.org/10.1016/0378-3804\(83\)90019-0](https://doi.org/10.1016/0378-3804(83)90019-0)

Yao George C., Kuo Keng-Chang, Hsueh Cheng-Luen , Tang Yao. Un nuevo enfoque para enseñar la mecánica del material a través de la experiencia táctil . Revista estadounidense de ingeniería civil . Vol. 4 , No. 4 , 2016, pp. 143 - 148 . doi: 10.11648 / j.ajce.20160404.13

Recibido : 8 de abril de 2016; Aprobado : 19 de mayo de 2016; Publicado : 2 de junio de 2016

Anexos

Resolución de la cercha manualmente para una carga de 20kN

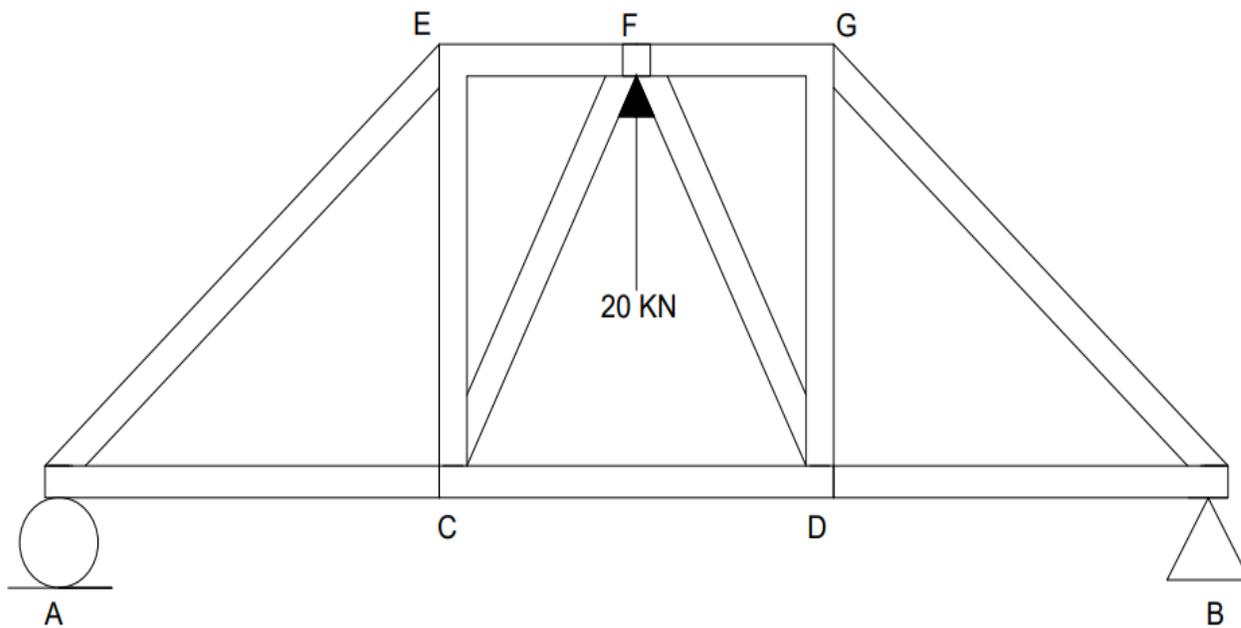


Figura 34 Diagrama para el diseño del prototipo.

Reacciones

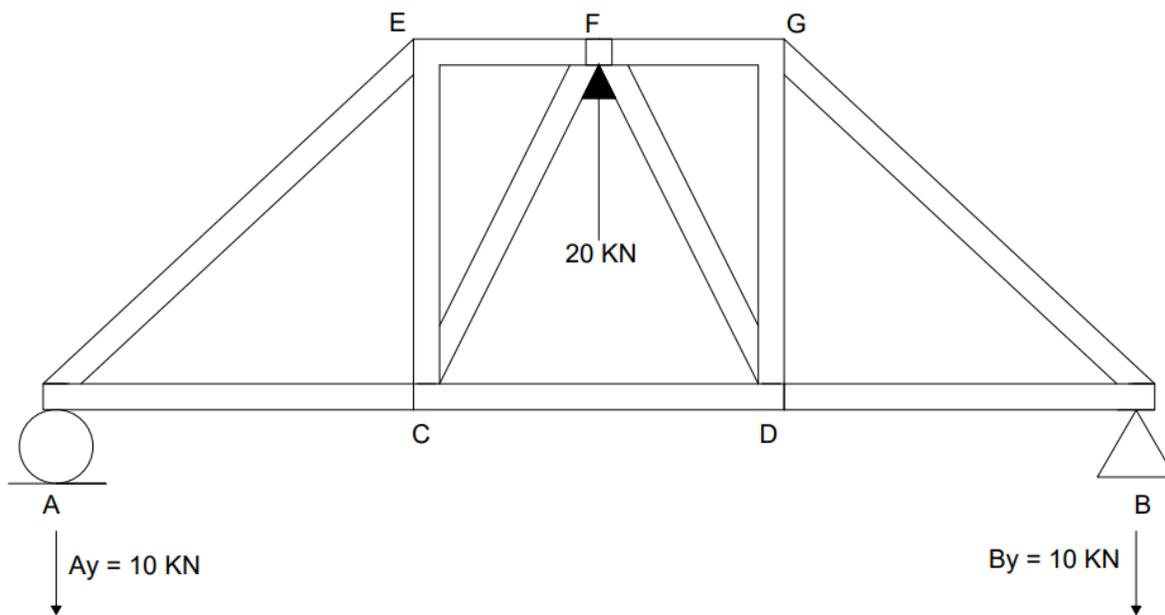


Figura 35 Diagrama de reacciones.

$$\sum M_A = 0$$

$$(20\text{KN} * 1.50\text{m}) + (B_y * 3\text{m}) = 0$$

$$30\text{KNm} + 3\text{m} B_y = 0$$

$$3\text{m} B_y = -30 \text{ KNm}$$

$$B_y = \frac{-30 \text{ KN m}}{3\text{m}}$$

$$B_y = -10 \text{ KN}$$

$$\sum F_x = 0$$

$$A_x = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

$$-10 \text{ KN} + A_y + 20 \text{ KN} = 0$$

$$10 \text{ KN} + A_y = 0$$

$$A_y = -10 \text{ KN}$$

Cálculo de nodos

$$\theta = \tan^{-1} \frac{1}{1}$$

$$\theta = 45^\circ$$

$$\sum F_y = 0$$

$$-10 \text{ KN} + F_{ae} \sin(45^\circ) = 0$$

$$F_{ae} \sin(45^\circ) = 10 \text{ KN}$$

$$F_{ae} = \frac{10 \text{ KN}}{\sin(45^\circ)}$$

$$F_{ae} = 14.14 \text{ KN (Tensión)}$$

$$\sum F_x = 0$$

$$14.14 \text{ KN} \cos(45^\circ) + F_{ac} = 0$$

$$10 \text{ KN} + F_{ac} = 0$$

$$F_{ac} = -10 \text{ KN (Compresión)}$$

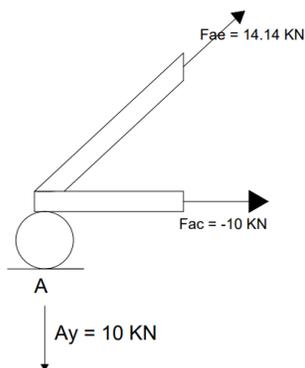


Figura 36 Cálculo de las fuerzas en nodo A.

$$\sum F_y = 0$$

$$14.14 \text{ KN sen } (45) - F_{ec} = 0$$

$$F_{ec} = 10 \text{ KN (Tensión)}$$

$$\sum F_x = 0$$

$$14.14 \text{ KN cos } (45) + F_{ef} = 0$$

$$F_{ef} = -10 \text{ KN (Compresión)}$$

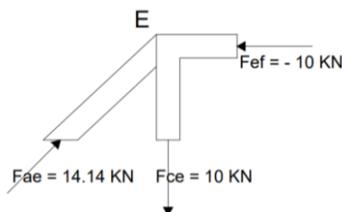


Figura 37 Cálculo de las fuerzas en nodo E.

$$\theta = \text{Tan}^{-1} \frac{1}{0.50}$$

$$\theta = 63.434^\circ$$

$$\sum F_y = 0$$

$$-10 \text{ KN} + F_{cf} \text{ sen } (63.434^\circ) = 0$$

$$F_{cf} = 11.2 \text{ KN (Tensión)}$$

$$\sum F_x = 0$$

$$10 \text{ KN} + 11.2 \text{ KN} \cos (63.434^\circ) + F_{cd} = 0$$

$$15 \text{ KN} + F_{cd} = 0$$

$$F_{cd} = -15 \text{ KN (Compresión)}$$

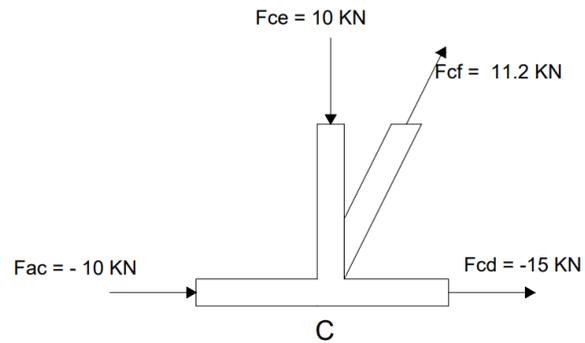


Figura 38 Cálculo de las fuerzas en el nodo C.

Diseño de planos de máquina.

Anexo – Fotográfico de la fabricación.

En la fabricación se utilizaron los siguientes materiales:

- Tubos estructurales de 70 x 70 – 2mm ASTM A 500
- Soldadura revestida 6013 1/8
- Lámina 1/8
- Platina 5/8
- Tubo redondo
- Pintura anticorrosiva
- Pintura esmalte

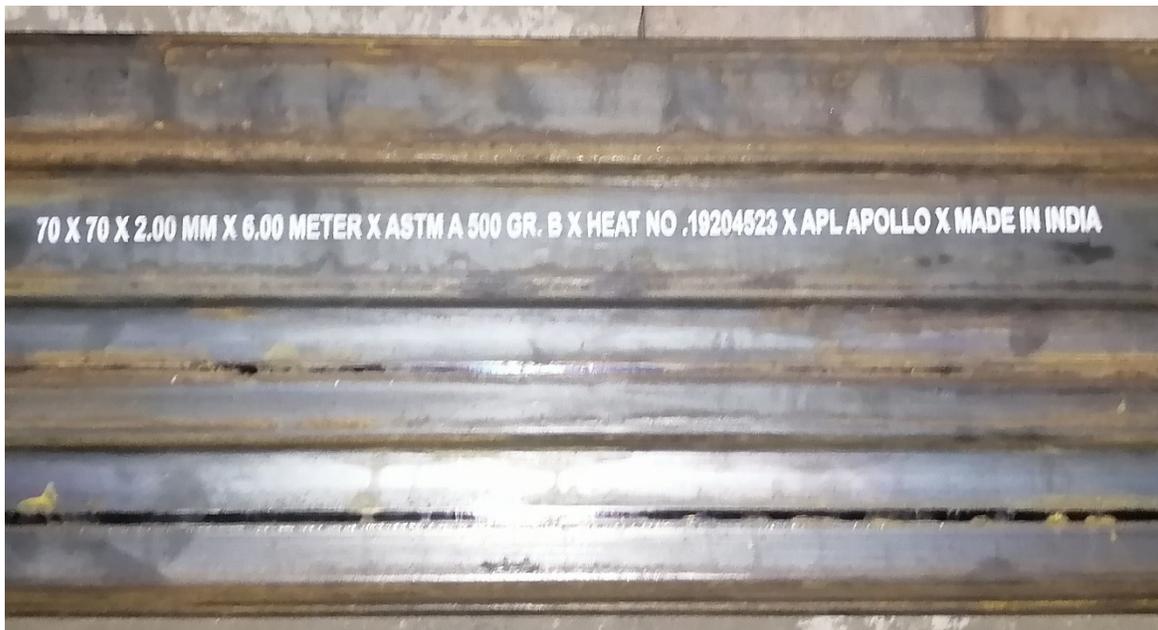


Figura 39 Tubos utilizados en la fabricación del prototipo.

Proceso de corte con pulidora y disco de corte.



Figura 40 Corte de material.



Figura 41 Corte de material.



Figura 42 Corte de material.

Armado del marco con las piezas cortadas.



Figura 43 Armado de la estructura.



Figura 44 Armado de diagonales en la estructura.



Figura 45 Unión del marco con la diagonales.



Figura 46 Alargamiento y cambio de uniones rotativas a fijas.



Figura 47 Instalación del manómetro a el gato hidráulico.



Figura 48 Estructura armada.

Fabricación de los apoyos para la viga.



Figura 49 Apoyos de la viga.



Figura 50 Apoyos de la viga.

Montaje del gato hidráulico armado con el manómetro a la estructura.



Figura 51 Gato hidráulico montado en la estructura.



Figura 52 Manómetro en funcionamiento.



Figura 53 Base superior del tornillo del gato hidráulico.

Terminado de la máquina.

En la estructura se ejecutó el proceso de soldadura y el terminado con pintura anticorrosiva, pintura esmalte, con los procesos de limpieza y pulido para quitarle las partículas de grasa, polvo y el carbón de la soldadura revestida.

Proceso de soldadura.



Figura 54 Utilizando soldadura en las uniones.

Proceso de pintura anticorrosiva y pintura esmalte.



Figura 55 Proceso de pintura anticorrosiva y esmalte.

Anexo – Registro fotográfico del ensayo

El manómetro y el comparador son colocados en ceros en la viga simplemente apoyada y el gato hidráulico listo para empezar hacer el ensayo de tres apoyos.

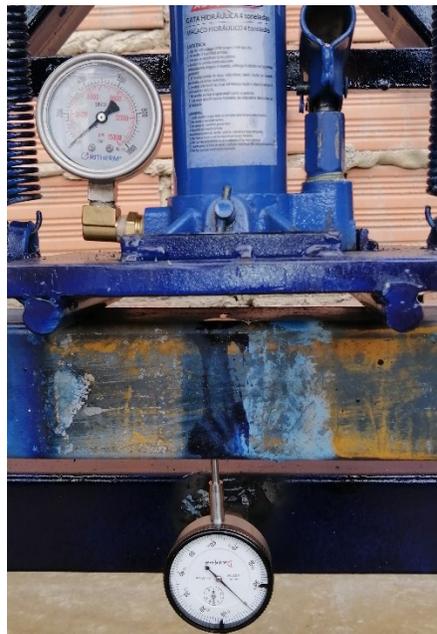


Figura 57 El gato hidráulico en posición inicial para el ensayo.

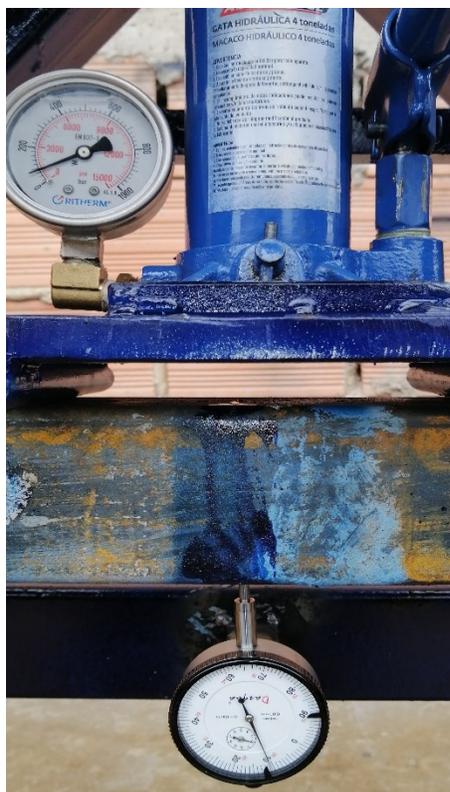


Figura 58 Punto 25 bar en la prensa.



Figura 59 La prensa en la posición final en el ensayo.



Figura 60 La deflexión que obtuvo la viga al final del ensayo.