



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

**“ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE
CONDUCTORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA AÉREOS”**

T E S I S

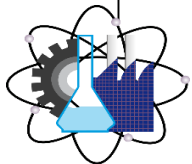
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

PRESENTA:

CARLOS IVÁN DOMINGUEZ MULATO

TUTOR: DR. MARIO ACOSTA FLORES



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

Cuernavaca, Morelos, México

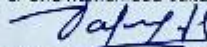
Noviembre 2019

Cuernavaca, Mor., a 13 de septiembre de 2019.

Dr. J. Guadalupe Velásquez Aguilar
Dr. Mario Limón Mendoza
Dra. Martha Roselia Contreras Valenzuela
Dr. José Gerardo Vera Dimas
Dr. Mario Acosta Flores
PROFESORES DE LA FCQeI
PRESENTE

Por este conducto, me permito informarle que ha sido asignado como integrante de la Comisión Revisora de la tesis que presenta el Ing. Domínguez Mulato Carlos Iván, titulada: "ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE CONDUCTORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA AÉREOS" realizada bajo la dirección del Dr. Mario Acosta Flores, en el Programa Educativo de Maestría en Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Agradezco su valiosa participación en esta Comisión y quedo a sus órdenes para cualquier aclaración o duda al respecto.

ATENTAMENTE
Por una humanidad culta



DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA





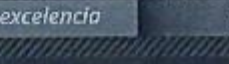
DICTAMEN

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA DE LA FCQeI

PRESENTE

En respuesta a su amable solicitud para formar parte de la Comisión Revisora de la tesis mencionada y una vez realizada la revisión correspondiente, me permito informarle que mi VOTO es:

DICTAMEN

| NOMBRE | VOTO | FIRMA |
|--|----------|---|
| Dr. J. Guadalupe Velásquez Aguilar | Aprobado |  |
| Dr. Mario Limón Mendoza | Aprobado |  |
| Dra. Martha Roselia Contreras Valenzuela | Aprobado |  |
| Dr. José Gerardo Vera Dimas | Aprobado |  |
| Dr. Mario Acosta Flores | Aprobado |  |

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos del estudio paramétrico experimental, propuesto para determinar el comportamiento mecánico de los conductores de energía eléctrica aéreos en función de su esfuerzo normal y de la flecha-vano.

Se diseñó un modelo físico (marco de carga) y un modelo analítico para determinar los esfuerzos normales y la relación flecha/vano derivado de la aplicación de incrementos en la fuerza de tensión. Se fabricaron probetas de aluminio y latón en diversas longitudes, las cuales fueron instrumentadas con galgas extensométricas de resistencia variable. Se realizaron los ensayos y se procesaron las señales utilizando software especializado en procesamiento, con lo que se obtuvieron las señales de oscilación natural en función del tiempo y los espectros de frecuencia.

Finalmente, se presentan gráficamente los resultados obtenidos derivado del proceso y se determinan los modelos analíticos representativos de probetas metálicas, las cuales describen de forma análoga el comportamiento mecánico (frecuencia de oscilación) de los conductores aéreos de energía eléctrica, en función de las siguientes variables: el esfuerzo normal, la flecha y la longitud.

| | |
|------------------------------|------|
| <i>Resumen.</i> | I |
| <i>Índice.</i> | III |
| Tablas y Figuras. | IV |
| <i>Glosario de términos.</i> | V |
| <i>Simbología.</i> | VIII |
| Introducción | IV |
| Objetivos. | X |
| Objetivo general. | X |
| Objetivos particulares. | X |
| Contenido | XII |

Índice

| | |
|---|----|
| Capítulo I. Antecedente..... | 1 |
| Capítulo II. Definición del problema..... | 4 |
| 2.1 Problema..... | 4 |
| 2.2 Restricciones..... | 4 |
| 2.3 Hipótesis..... | 5 |
| Capítulo III Marco teórico..... | 6 |
| 3.1 Líneas de transmisión y de distribución..... | 6 |
| 3.2 Análisis de la flecha en las líneas de energía eléctrica aéreas..... | 8 |
| 3.3 Movimiento libre amortiguado..... | 10 |
| Capítulo IV. Metodología experimental..... | 12 |
| 4.1 Diseño de un modelo físico y analítico..... | 13 |
| 4.2 Diseño de las pruebas..... | 16 |
| 4.3 Fabricación del marco de carga..... | 17 |
| 4.4 Fabricación e instrumentación de las probetas..... | 22 |
| 4.5. Pruebas experimentales..... | 27 |
| Capítulo V. Resultados experimentales y análisis..... | 32 |
| 5.1 Adecuación de los datos..... | 32 |
| 5.2 Obtención de los espectros de frecuencia..... | 33 |
| 5.3 Análisis de resultados..... | 34 |
| Capítulo VI. Conclusiones y recomendaciones..... | 44 |
| 6.1 Conclusiones..... | 44 |
| 6.2 Recomendaciones..... | 45 |
| Apéndice A “Planos y especificaciones del marco de carga”..... | 46 |
| Apéndice B. Obtención experimental de las propiedades elásticas de los materiales “La” y “Al”..... | 52 |
| Apéndice C “Análisis del espectro de frecuencia”..... | 59 |
| Referencias..... | 75 |

Tablas y Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 Configuración de los conductores comúnmente utilizados en los sistemas de transmisión de energía eléctrica aéreos..... | 6 |
| Figura 2 Conductores ACSR comúnmente utilizados para sistemas aéreos de transmisión de energía eléctrica..... | 7 |
| Figura 3 Representación de la curva catenaria entre dos torres..... | 8 |
| Figura 4 Diagrama de cuerpo libre de la catenaria..... | 9 |
| Figura 5 Principio de superposición para el modelo analítico..... | 14 |
| Figura 6 Distribución de esfuerzo interno en un elemento..... | 14 |
| Figura 7 Figura del modelo analítico para determinar los esfuerzo de tensión y de flexión..... | 15 |
| Figura 8 Diseño de las pruebas para la realización del estudio..... | 16 |
| Figura 9 Marco de carga para la realización de las pruebas..... | 17 |
| Figura 10 Soporte móvil con tornillo de ajuste, montado sobre la base principal..... | 18 |
| Figura 11 Vista inferior del soporte semi- fijo..... | 19 |
| Figura 12 Sujeción de la probeta de latón, con empotramiento tipo bisagra..... | 20 |
| Figura 13 Soporte móvil, con sistema de desplazamiento unidireccional..... | 20 |
| Figura 14 Tornillo con escala graduada para control del giro..... | 21 |
| Figura 15 Representación de la probeta metálica..... | 22 |
| Figura 16 Secciones transversales de las probetas..... | 23 |
| Figura 17 Probeta de Latón instalada, con marcas de referencia..... | 23 |
| Figura 18 Galga extensométrica unidireccional..... | 25 |
| Figura 19 Galgas colocadas sobre las caras de la probeta de latón..... | 26 |
| Figura 20 Equipo de medición para la obtención de las micro deformaciones..... | 26 |
| Figura 21 Data Acquisition System, modelo 9000-16-SM..... | 27 |
| Figura 22 Grafica de la señal obtenida a través del scanner system 9000..... | 28 |
| Figura 23 Ventana de observación de la señal adquirida..... | 29 |
| Figura 24 Aplicación de filtros FIR en el software de MATLAB..... | 30 |
| Figura 25 Graficas con los espectros de frecuencia, a través de la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier..... | 31 |
| Figura 26 Resultado del modelo analítico y del modelo experimental, probetas de latón..... | 35 |
| Figura 27 Modelos representativos del comportamiento de la frecuencia natural, probeta de latón | 37 |
| Figura 28 Modelos representativos del comportamiento de la frecuencia natural, probeta de aluminio..... | 39 |
| Figura 29 Modelos representativos del comportamiento de la frecuencia natural, probeta de latón..... | 41 |
| Figura 30 Modelos representativos del comportamiento de la frecuencia natural, probeta de aluminio..... | 43 |

Glosario de términos.

Análisis experimental de esfuerzos: Es un análisis en donde, de forma sistemática y con ayuda de técnicas experimentales (fotoelasticidad y extensometría eléctrica) se puede conocer el comportamiento mecánico de un elemento o estructura mecánica.

Caracterización del material: Es la obtención de las propiedades mecánicas del material (E, G y ν) por medio de pruebas experimentales.

Deformación: Es el desplazamiento relativo entre los puntos de un cuerpo al someterse a una sollicitación.

Elástico: Se dice que un material tiene un comportamiento elástico si las deformaciones causadas por la aplicación de cierta carga, desaparecen al quitarla.

Esfuerzo cortante experimental: Es el esfuerzo cortante obtenido con ayuda de un método experimental.

Esfuerzo cortante: Es el valor límite de las razones (Fuerza cortante / Área).

Esfuerzo: Se define como la razón de la magnitud F de la fuerza al área A de la sección transversal. Con signo positivo indicará un esfuerzo de tensión y un signo negativo señalará un esfuerzo de compresión.

Esfuerzos principales: Los esfuerzos principales representan el esfuerzo normal máximo y mínimo en el punto de estudio. Cuando se representa el estado de esfuerzo mediante los esfuerzos principales, el esfuerzo cortante es igual a cero.

Extensómetro: Un extensómetro o galga extensiométrica es un deformímetro eléctrico que consta de una longitud de alambre delgado, dispuesto en un arreglo específico, adherido a dos piezas de papel; él cual al ser pegado en una superficie, sufre de alargamiento y disminución en diámetro del alambre ó viceversa, provocando que la resistencia eléctrica de la galga extensiométrica aumente; para de ésta forma determinar la deformación en dos puntos.

Geometría rectangular estrecha: Es la geometría rectangular que cumple con la relación de que el ancho h es mayor al largo b del rectángulo en un número menor o igual a diez.

Homogéneo: Es cuando las propiedades que constituyen un material son independientes del punto de estudio.

Lineal: Concepto que se utiliza para decir que las ecuaciones que modelan a lo que hace referencia, son lineales.

Material anisotrópico: Son aquellos materiales con diferentes propiedades en diferentes direcciones.

Material isotrópico: Las propiedades mecánicas del material son las mismas en cualquier dirección.

Modelo: Es una herramienta analítica con una estructura y proceso que sirve para analizar de forma aproximada el comportamiento de un fenómeno de estudio.

Módulo de elasticidad (E): El módulo de elasticidad o de Young representa la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación en un material específico siempre y cuando no se exceda el límite de proporcionalidad.

Módulo de rigidez (G): El módulo de rigidez o de cortante representa la relación que existe entre el esfuerzo cortante en un plano y la deformación angular en ese mismo plano.

Momento de inercia (I_x, I_y, I_{xy}): Es una propiedad importante en la ingeniería, ya que debe especificarse o determinarse antes de analizar o diseñar un miembro estructural o pieza mecánica y se define como las integrales del segundo momento de un área.

Momento de torsión ó torque: Es cuando una flecha o barra se sujetan a un momento alrededor de su eje longitudinal.

Momento polar de inercia (Jo): Es un segundo momento de un área pero definido en términos de r , que es una coordenada polar.

Relación de Poisson: Es la relación que existe entre la deformación lateral y la deformación axial de un material.

Rigidez torsional: Es la propiedad de un material para soportar esfuerzos debidos a la torsión sin adquirir grandes deformaciones o desplazamientos.

Roseta de deformación: Es un arreglo especial de extensómetros para medir tres deformaciones normales $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ y ε_3 ; existen rosetas a 45° o 60° .

Solicitación: Es la condición de frontera que se aplica a un cuerpo de forma externa; desplazamientos, momentos, cargas y otras cosas más.

Torque: Es un par que se encuentra en un plano de sección transversal de una barra o de una flecha sobre la cual actúa.

Torsión: Es la solicitación que se presenta cuando se aplica un momento sobre el eje longitudinal de un elemento, como pueden ser ejes, aunque es posible encontrarla en situaciones diversas.

Simbología

| | |
|-----------------|-----------------------|
| Al | Aluminio |
| cm | Centímetros |
| E | Módulo de elasticidad |
| gr | Gramos |
| Kg | kilogramo |
| La | Latón |
| m | Metros |
| N | Newton |
| Pa | Pascales |
| S.I. | Sistema Internacional |
| ϵ | Deformación |
| ϵ_x | Deformación en x |
| ϵ_y | Deformación en y |
| σ | Esfuerzo |
| σ_{prom} | Esfuerzo promedio |

Introducción

La energía eléctrica, así como sus áreas de generación, de transmisión y de distribución representan algunas de las actividades de mayor influencia en el país. Históricamente el uso de la energía eléctrica ha sido fundamental para el desarrollo económico y social de la población, desde los inicios de la industrialización energética el sistema no ha dejado de crecer, cada vez tenemos más redes de transmisión y distribución instalados en todo el territorio nacional.

En el campo de transmisión y distribución de energía eléctrica, existen dos principales arreglos para el sistema de energía eléctrica, un arreglo con la red subterránea y un arreglo con la red aérea, siendo esta última la de mayor cobertura en el país, la cual está integrada por torres de suspensión, torres de retención, torres de remate, conductores aéreos, aisladores, soporteria, entre otros. Las redes se han vuelto robustas cubriendo grandes distancias y enlazando varios estados para llevar la energía a todo el país.

Sin embargo, no podemos dejar de señalar que la utilización de un sistema complejo que cubre grandes distancias, también enfrenta grandes desafíos técnicos, como por ejemplo, mantener estable el suministro de energía, cumpliendo con los indicadores de la calidad del sistema, la selección adecuada de los conductores, la flecha pertinente para el tipo de red, así como los aspectos físicos como los esfuerzos generados en los cables conductores y estructuras de soporte, los cuales también son afectados por condiciones ambientales inherentes al sistema como la topografía del terreno, el estado climatológico, vientos fuertes, lluvia, nieve etc.

Cubrir estos aspectos técnicos, ambientales y condiciones de frontera, implican la utilización de procedimientos específicos, de forma que permitan realizar un buen diseño y desarrollo de medios de transmisión que logren ser eficientes y confiables. Considerando aspectos tanto eléctricos como mecánicos, para garantizar su buena operación y fiabilidad.

Objetivos:

Objetivo general

Realizar un estudio experimental paramétrico para conocer el comportamiento mecánico de conductores aéreos de energía eléctrica, en función de las siguientes variables: la flecha, la tensión del conductor, las frecuencias naturales de oscilación y la longitud.

Objetivos particulares:

1. Obtención de modelos analíticos que describan el comportamiento de conductores aéreos de energía eléctrica, en función de las siguientes variables: la flecha, la tensión del conductor, las frecuencias naturales de oscilación y la longitud.
2. Diseñar el método de pruebas experimentales.
3. Fabricación de un marco de carga para la realización de pruebas experimentales, donde se someterán las probetas a diversas solicitudes de tensión, flexión y oscilación.
4. Preparación de probetas con la geometría y longitud necesaria para la realización de los ensayos.
5. Realizar la instrumentación de probetas, utilizando la técnica de extensometría eléctrica de resistencia variable, para determinar deformaciones y esfuerzos.

6. Evaluar en forma experimental el comportamiento mecánico en términos de frecuencia natural en función de los esfuerzos normales y de las deformaciones que presentan las probetas.
7. Determinar las frecuencias de oscilación natural de las probetas, a través del uso de equipo de análisis dinámico, en función de la flecha.

Contenido:

El presente estudio de investigación se divide en seis capítulos.

En los capítulos uno y dos se presentan el estado del arte, se justifica y se define el problema a resolver en este trabajo de investigación.

En el capítulo tres, se describe el marco teórico relacionado con el proyecto en estudio.

En el capítulo cuatro, se describe el método con el cual, planteado el modelo experimental, es posible conocer el comportamiento mecánico de los conductores aéreos de energía eléctrica.

En el capítulo cinco, se presentan los resultados obtenidos y se realiza un análisis de las curvas paramétricas que describen el comportamiento mecánico de las probetas a partir de las pruebas experimentales y de los esfuerzos calculados de forma analítica.

En el capítulo seis, se presentan las conclusiones y recomendaciones de éste trabajo de investigación.

En los apéndices, se incluyen temas que son relevantes para el mejor entendimiento de la investigación aquí presentada.

Capítulo I. Antecedente

Al hablar de sistemas de distribución o de transmisión de energía eléctrica, podría suponerse que se tienen un comportamiento estable y controlado, sin embargo; a pesar de que existen normativa nacional como las establecidas por la Comisión Federal de Electricidad, especificación CFE DCDLTA01, especificación CFE DCCLAAT1, especificación CFE DCCLTA01 (Comisión Federal de Electricidad, 2014), las cuales describen los criterios de diseño y las especificaciones para la construcción de las nuevas líneas aéreas de transmisión, también se presentan fallas en las líneas aéreas relacionadas con fatiga del conductor, desgaste desde moderado a severo en los conductores, flameos entre fase y fase, así como daños en los herrajes o separadores.

Autores como Barrera Domínguez, describen las vibraciones eólicas como riesgos que se deben considerar para los sistemas de transmisión eléctrica, mencionando que estas vibraciones causan esfuerzos flexionantes alternantes en los conductores; estos puede resultar en un daño al conductor en los puntos de las abrazaderas, lo cual provoca desde rotura de cables simples hasta la rotura completa del conductor (Barrera Domínguez H. A., 2008).

La mayoría de estos daños están relacionados con los efectos térmicos y efectos eólicos que rigen en la zona, por ejemplo un trabajo presentado por Manrique Machado, el cual describe que las vibraciones eólicas, pueden traer graves consecuencias para los conductores de fase y los cables de guarda. En su artículo describe que el principal efecto eólico se conoce como fatiga por vibración, el cual es un fenómeno que puede desembocar en la caída del conductor de fase. (Machado, 2012).

En el mismo artículo, también hace referencia a la importancia de realizar un estudio que determine las frecuencias naturales típicas de oscilación de los cables con base en los vanos promedios, los vientos, las condiciones climatológicas de la zona y otras variables de interés.

Durante las últimas décadas se han generado nuevos estudios que describan el comportamiento mecánico de los conductores cuando se encuentran sometidos a fenómenos ambientales de temperatura y viento, pero son en el rubro del análisis numérico y muy pocos estudiados desde la parte experimental.

Basado en lo anterior, se ha buscado el estado del arte referente al análisis experimental en materia de esfuerzos, deformaciones y propiedades mecánica de los materiales.

Investigadores como Hamian y Berenstein han realizado estudios y propuestas de modelos analíticos para el refinamiento en el cálculo de la flecha por modelos computarizados, adentrándose en temas como el envejecimiento de los conductores (Jacques Hamian, 2018).

Otros investigadores como Wydra y Kisala, han realizado investigación de campo sobre el comportamiento de las líneas aéreas, pero proponen la utilización de un sistema electrónico (opto-mecánico) instalado directamente en las líneas aéreas (Michal Wydra P. K., 2018).

Sin embargo, hasta el momento no se encuentra información documentada de estudios experimentales que describan y caractericen el comportamiento mecánico de los conductores aéreos, por lo que se observa la necesidad de realizar un estudio cualitativo para evaluar el comportamiento de estos, considerando factores como la geométrica, el material constitutivo, las frecuencias naturales, así como las condiciones de frontera.

Es por ello que en este trabajo se plantea un estudio experimental para poder tener información cualitativa sobre el comportamiento mecánico de los conductores en líneas aéreas, manipulando variables como la fuerza de tensión en el conductor, las propiedades del material y la flecha generada por su peso.

Si bien, es conocido que el esfuerzo en los conductores y la flecha son criterios importantes en el diseño de líneas aéreas, no hay estudios experimentales que relacionen estos criterios con el comportamiento respecto a las frecuencias de oscilación. Por lo que a través del estudio experimental se espera generar un modelo que describa

el comportamiento de la frecuencia natural y el esfuerzo de tensión en función de la flecha/vano.

Todos estos estudios están enfocados a conocer el comportamiento de las variables mecánicas en las líneas aéreas de energía eléctrica, tomando como referencia modelos analíticos, numéricos o algunas pruebas de campo, pero no realizan un estudio experimental como el propuesto en esta investigación.

Capítulo II. Definición del problema.

En este capítulo, se define el problema correspondiente al proyecto presentado en este trabajo, se dan sus restricciones y se plantean las hipótesis.

2.1 Problema.

Se requiere hacer un estudio experimental cualitativo por medio del cual se defina el comportamiento mecánico de los conductores de energía eléctricos aéreos, en función de las variables: los esfuerzos normales y la flecha.

2.2 Restricciones.

- El material en estudio se considera sólido, metálico, isotrópico y homogéneo.
- La sección transversal del material es constante y se mantiene a lo largo de la probeta.
- El esfuerzo en el material, es únicamente función de la tensión aplicada en sus extremos y del propio peso de la probeta.
- El problema a desarrollar es lineal y cumple con las restricciones de la teoría de la elasticidad (lineal, elástico-lineal).
- El problema analizado es de carga axial.
- El estudio se realizará en el laboratorio de pruebas experimentales, por lo que el modelo físico y las probetas no excederán de 1 metro.

2.3 Hipótesis

Es posible definir el comportamiento mecánico de un conductor de energía eléctrica aéreo, realizando un estudio experimental paramétrico de las frecuencias naturales, en función de variables como la tensión, la longitud y la flecha.

Capítulo III Marco teórico

El presente capítulo describe información técnica sobre rubros como las líneas de transmisión y distribución de energía eléctrica, condiciones ambientales y el cálculo de la catenaria para líneas de energía aéreas.

3.1 Líneas de transmisión y de distribución

En las líneas de transmisión y de distribución de energía eléctrica existen principalmente dos tipos de arreglos, sistemas subterráneos y sistemas aéreos, en este capítulo se hablará principalmente sobre los sistemas aéreos, que son el elemento en estudio. Para la mayoría de los sistemas aéreos se utiliza conductores heterogéneos, es decir, están formados por grupos de conductores de diferentes materiales, conductores de aluminio y acero, o conductores de cobre y acero, entre otros. En la Figura se muestra cuatro configuraciones de los conductores comúnmente utilizados en los sistemas aéreos de energía eléctrica.

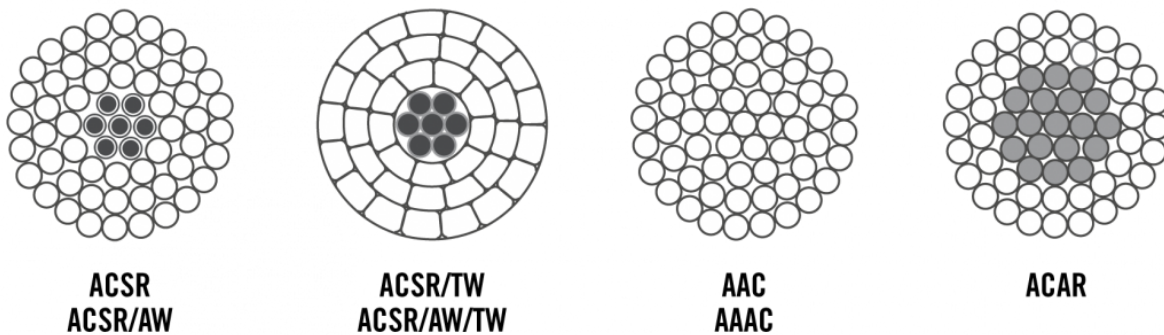


Figura 1 Configuración de los conductores comúnmente utilizados en los sistemas de transmisión de energía eléctrica aéreos.

Dentro de la categoría de los conductores ACSR existen también subcategorías donde dependiendo del calibre seleccionado, cambia el número de hilos y diámetro de los conductores de acero y aluminio. Como se muestra en la siguiente Figura.

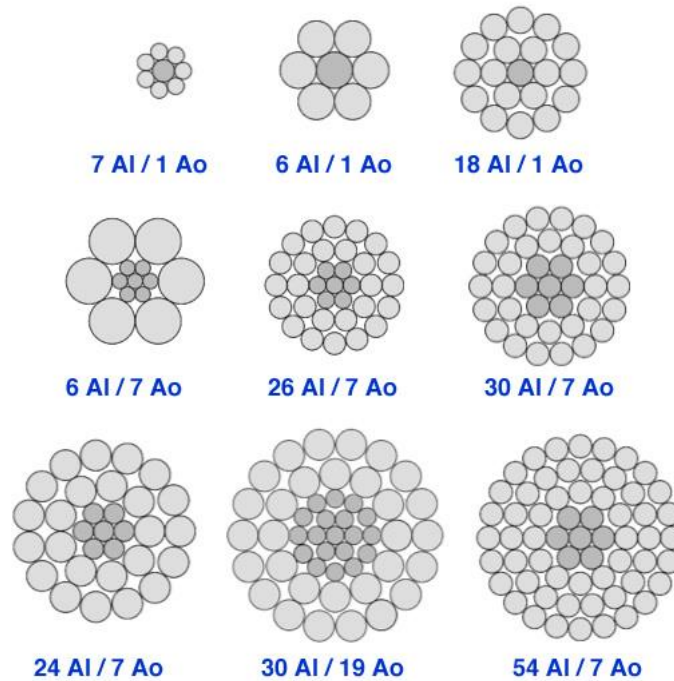


Figura 2 Conductores ACSR comúnmente utilizados para sistemas aéreos de transmisión de energía eléctrica.

3.2 Análisis de la flecha en las líneas de energía eléctrica aéreas

Para realizar el análisis de la flecha en los conductores de energía eléctrica, se asumen dos criterios generales, el primero es, que la masa del conductor está uniformemente distribuida a lo largo de la longitud del arco descrito por dicho conductor, el segundo es respecto la tensión mínima y máxima del conductor, considerando que la tensión mínima se encuentra en el punto más bajo y la tensión máxima se encuentra en los puntos de apoyo, en la Figura 3 se observa el esquema general de la disposición de conductor y de la flecha – vano.

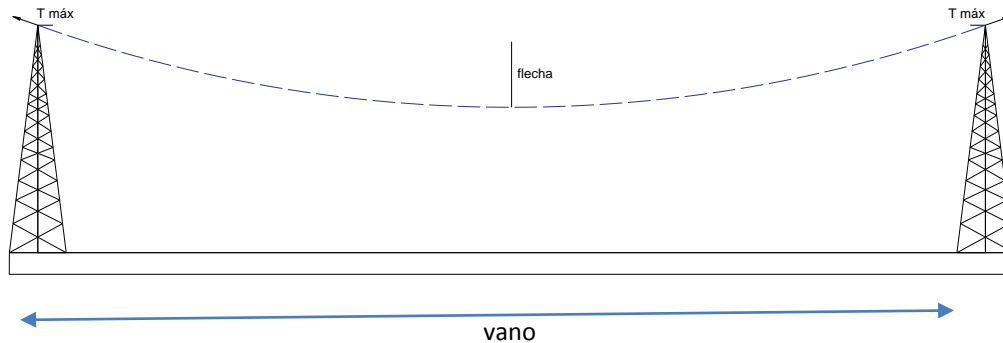


Figura 3 Representación de la curva catenaria entre dos torres.

La tensión en cualquier punto del cable consta de dos componentes: una fuerza horizontal (que es uniforme a lo largo del cable) y una fuerza vertical (que varía desde cero en el punto más bajo del cable hasta un valor máximo en los soportes). Lo anterior significa que la tensión total en el cable es variable.

Existen dos métodos para el cálculo de la flecha, ambos métodos son similares cuando la relación flecha-vano es pequeña, sin embargo, la diferencia en los resultados llega a ser considerable a medida que la flecha aumenta. Por tanto, para vanos largos en donde la flecha es más grande, se tendrá una diferencia entre ambos métodos. En la Figura 4 se puede observar el planteamiento de las fuerzas de tensión.

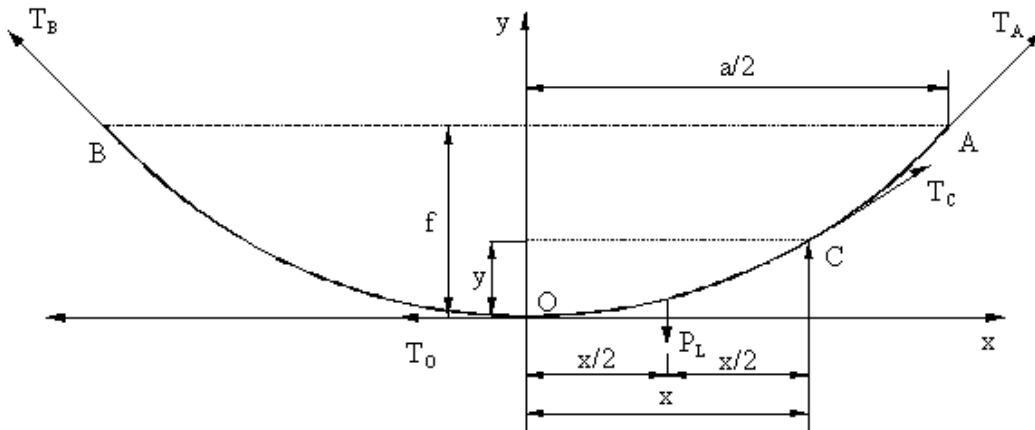


Figura 4 Diagrama de cuerpo libre de la catenaria

La tensión $T = T_A = T_B$ dependerá de la longitud del vano, del peso del conductor, de la temperatura y de las condiciones atmosféricas. Como se había mencionado antes, para vanos pequeños, se puede equiparar la forma de la catenaria a la ecuación de una parábola, lo cual ahorra algunos cálculos matemáticos.

$$f = \frac{(p \cdot a^2)}{8 \cdot T_0} \quad (3.1)$$

Sin embargo, para vanos grandes, considerando longitudes mayores a 500 metros, deberá emplearse la ecuación de la catenaria.

$$f = \left(\frac{T_0}{p}\right) * \left[\cosh\left(\frac{a \cdot p}{2T_0}\right) - 1\right] \quad (3.2)$$

Donde:

f : Flecha (m)

p: Peso unitario (N/m)

a: Vano (m)

To: Fuerza de tensión (N)

3.3 Movimiento libre amortiguado

En mecánica, se considera que las fuerzas de amortiguamiento que actúan sobre un cuerpo son proporcionales a alguna potencia de la velocidad instantánea. En particular, supondremos que esta fuerza está expresada por un múltiplo constante de dx/dt . (Zill, 2002) Cuando no hay otras fuerzas externas aplicadas al sistema, éste sigue la segunda ley de Newton:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx - \beta \frac{dx}{dt} \quad (3.3)$$

Donde β es una constante de amortiguamiento positiva.

Dividiendo la ecuación entre la masa “m”, la ecuación diferencial del movimiento libre amortiguado es

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{\beta}{m} \frac{dx}{dt} + \frac{kx}{m} = 0 \quad (3.4)$$

Y esta se puede reescribir como:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\gamma \frac{dx}{dt} + \omega^2 x = 0 \quad (3.5)$$

Quedando las raíces como:

$$m_1 = -\gamma + \sqrt{\gamma^2 - \omega^2} \quad (3.6)$$

$$m_2 = -\gamma - \sqrt{\gamma^2 - \omega^2}$$

Si β es grande comparado con la constante del resorte k , entonces se tienen un sistema **sobreamortiguado** y la solución de la ecuación diferencial es:

$$x(t) = e^{-\gamma t} (c_1 e^{\sqrt{\gamma^2 + \omega^2} t} + c_2 e^{-\sqrt{\gamma^2 + \omega^2} t}) \quad (3.7)$$

Para el caso de sistema **críticamente amortiguado** la solución es:

$$x(t) = e^{-\gamma t} (c_1 + c_2 t) \quad (3.8)$$

Si β es pequeño comparado con la constante del resorte k , entonces se tienen un sistema **subamortiguado** y la solución de la ecuación diferencial es:

$$x(t) = e^{-\gamma t} (c_1 \cos\sqrt{\omega^2 - \gamma^2} t + c_2 \operatorname{sen}\sqrt{\omega^2 - \gamma^2} t) \quad (3.9)$$

Capítulo IV. Metodología experimental.

En este capítulo se describe la metodología desarrollada para la ejecución del estudio. Las pruebas experimentales se dividieron en dos etapas, las cuales son:

- a) Evaluar el comportamiento de las frecuencias de oscilación en función del esfuerzo de tensión.
- b) Evaluar el comportamiento de las frecuencias de oscilación en función de la flecha/vano.

Metodología

La metodología utilizada en este trabajo para el análisis es:

- a) Diseño de un modelo físico y analítico representativo del comportamiento de un conductor de energía eléctrica aéreo.
- b) Diseño de las pruebas para la realización del estudio.
- c) Fabricación del marco de carga para sujetar y aplicar fuerza de tensión a las probetas.
- d) Fabricación e instrumentación de las probetas para la realización de los ensayos.
- e) Realización de los ensayos.
- f) Obtención de las curvas paramétricas.
- g) Obtención de los modelos analíticos que describen el comportamiento paramétrico de las probetas.

4.1 Diseño de un modelo físico y analítico

El diseño del modelo físico y modelo analítico, se basa en establecer que las variables mecánicas que describen el comportamiento de un conductor de energía eléctrica aéreo (de sección transversal constante), se pueden representar y modelar como una viga soportada en dos apoyos simples, la cual manifiesta una deflexión derivada de su masa y de la fuerza gravitacional. Además, de que la flecha generada respecto a sus puntos de apoyo, es proporcional a la tensión en sus extremos. Derivado de estos principios se propone un modelo representativo a escala reducida para la realización del estudio.

Las cargas normales concentradas tienden a provocar flexión pura en las vigas (Mott, 2009). Por lo que para el caso, una viga estable de sección uniforme, colocada sobre dos apoyos simples, presenta flexión pura; sin embargo, si además se somete a una fuerza de tensión en sus extremos, el esfuerzo resultante en la viga, será la combinación de estos esfuerzos. Una forma de analizar y determinar los esfuerzos por tensión y los esfuerzos por flexión, es aplicar el principio de superposición.

El modelo se plantea bajo las siguientes restricciones:

- La sección transversal de la viga es homogénea, isotrópica y de sección constante.
- La fuerza de tensión se aplica en los extremos de la viga y esta fuerza se distribuye de forma uniaxial.
- La fuerza de tensión se aplica en el eje de simetría, por lo que se descartan momentos derivados del desalineamiento de la fuerza (esfuerzos locales), así como también se descartan esfuerzos derivados por la torsión.
- El esfuerzo solicitado en la probeta es igual al esfuerzo normal de tensión más el esfuerzo por flexión.

En la Figura 5, se representa la combinación del esfuerzo de tensión y del esfuerzo por flexión, así como la aplicación del principio de superposición.

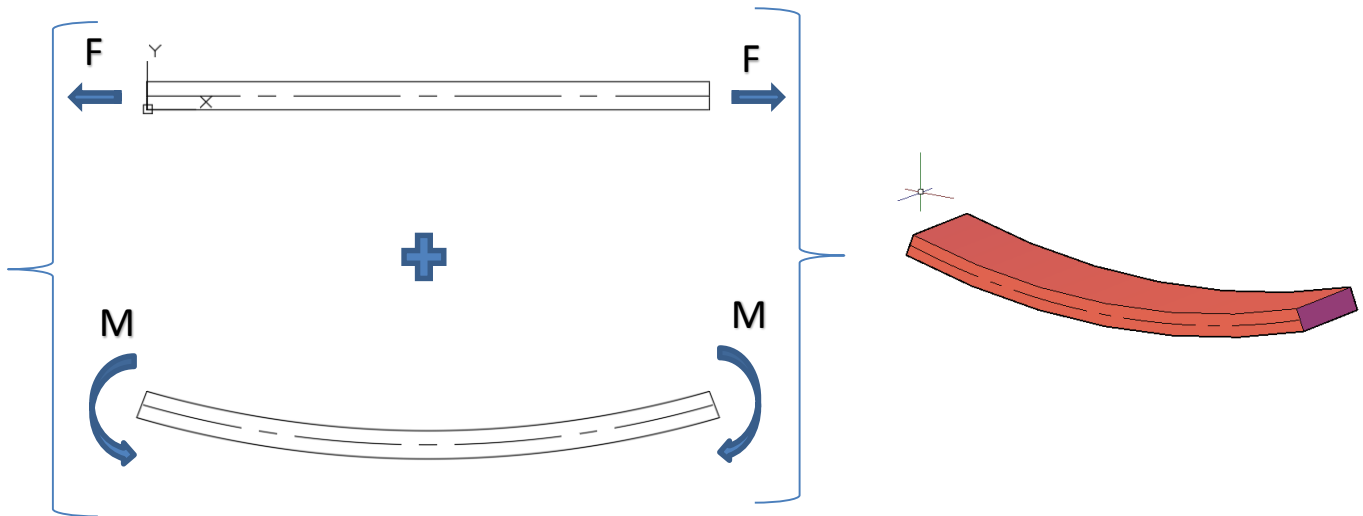


Figura 5 Principio de superposición para el modelo analítico.

Donde:

$$\sigma (total) = \sigma(normal) + \sigma(flexión)$$

En la Figura 6, se observa la distribución de los esfuerzos, tanto para esfuerzos normales, como para el esfuerzo por flexión.



Figura 6 Distribución de esfuerzo interno en un elemento.

$$\text{Esfuerzo}_{(total)} = F/A + Mc / I \quad (4.1)$$

Derivado de la distribución de esfuerzos, donde para el caso en estudio, se presentan esfuerzos de tensión debajo del eje de simetría y esfuerzos de compresión arriba del eje de simetría, ambos derivados de la deflexión de la viga, se genera el siguiente modelo.

La deformación medida en las caras superior e inferior de una viga con carga uniformemente distribuida sometida a fuerzas de tensión en sus extremos, será la combinación de la deformación por tensión y de la deformación por flexión. Este comportamiento se puede observar en la Figura 7.

Derivado de análisis anterior se generan las siguientes ecuaciones:

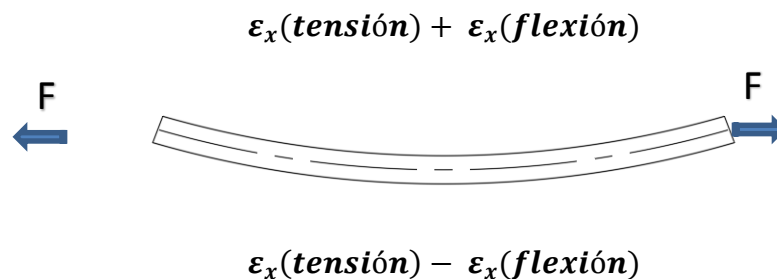


Figura 7 Figura del modelo analítico para determinar los esfuerzo de tensión y de flexión

Para determinar la deformación por tensión:

$$2 * \varepsilon_x(\text{prom}) = \varepsilon_x(\text{tensión}) + \varepsilon_x(\text{flexión}) + \varepsilon_x(\text{tensión}) - \varepsilon_x(\text{flexión}) \quad (4.2)$$

$$2 * \varepsilon_x(\text{prom}) = 2 * \varepsilon_x(\text{tensión}) \quad (4.3)$$

Para determinar la deformación por flexión:

$$2 * \varepsilon_x(\text{prom}) = \varepsilon_x(\text{tensión}) + \varepsilon_x(\text{flexión}) - \varepsilon_x(\text{tensión}) + \varepsilon_x(\text{flexión}) \quad (4.4)$$

$$2 * \varepsilon_x(\text{prom}) = 2 * \varepsilon_x(\text{flexión}) \quad (4.5)$$

4.2 Diseño de las pruebas

El diseño de pruebas permitió tener claridad en los parámetros y las variables de estudio.

El método aplicado para el desarrollo de las pruebas se representa en Figura 8. Diseño de las pruebas para la realización del estudio.

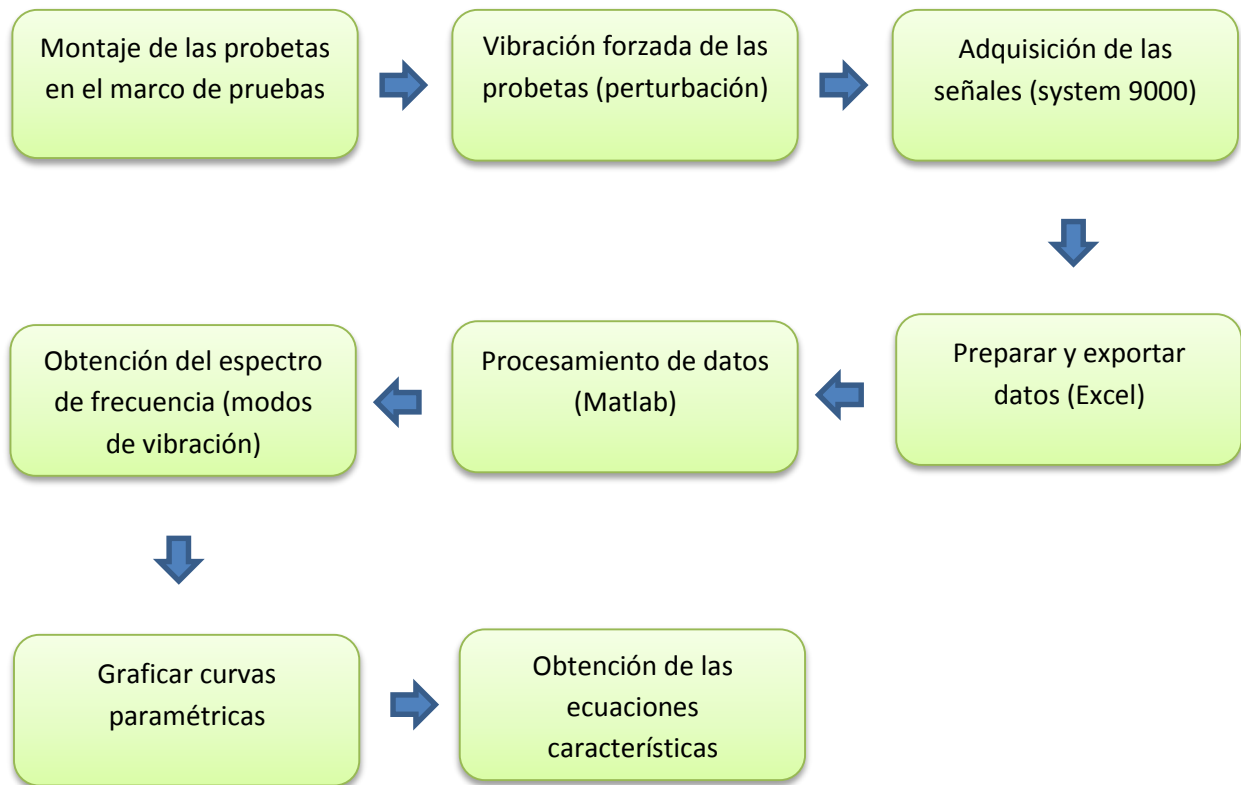


Figura 8 Diseño de las pruebas para la realización del estudio.

4.3 Fabricación del marco de carga

Para el desarrollo de los ensayos se diseñó y manufacturó un marco de carga específico, con el propósito de facilitar la operación de los ensayos, y a la vez cumplir con los requisitos establecidos y las condiciones de frontera que se habían planteado en el modelo analítico. El diseño de las piezas y el montaje virtual de las mismas, se realizó a través del software de Autodesk Inventor, el cual permite trabajar elemento por elemento para posteriormente ser acopladas (de forma virtual) dentro de otra interface del software, disminuyendo los riesgos por vicios ocultos que se pudieran aparecer durante la operación.

En la Figura 9, se muestra el ensamble general del marco de carga.

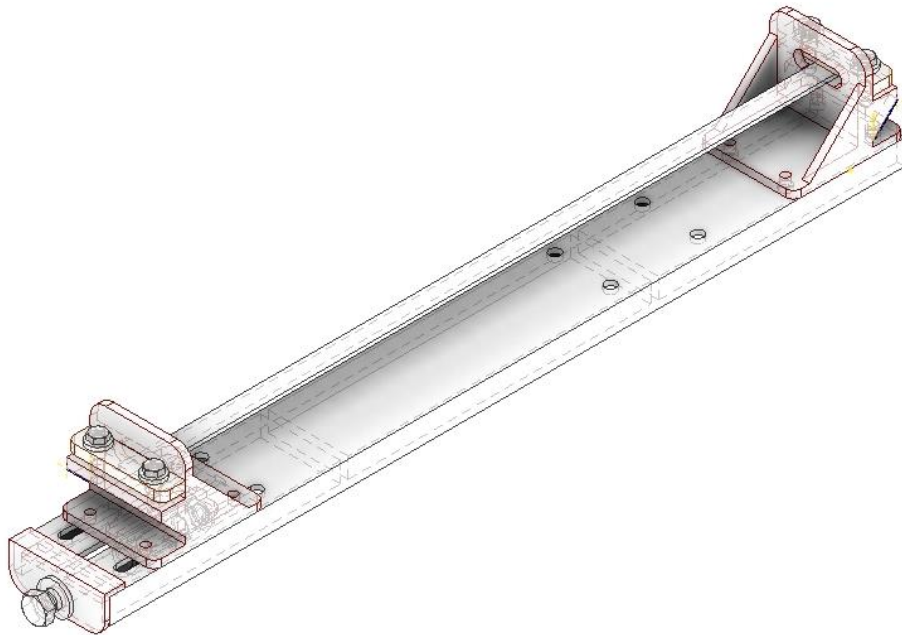
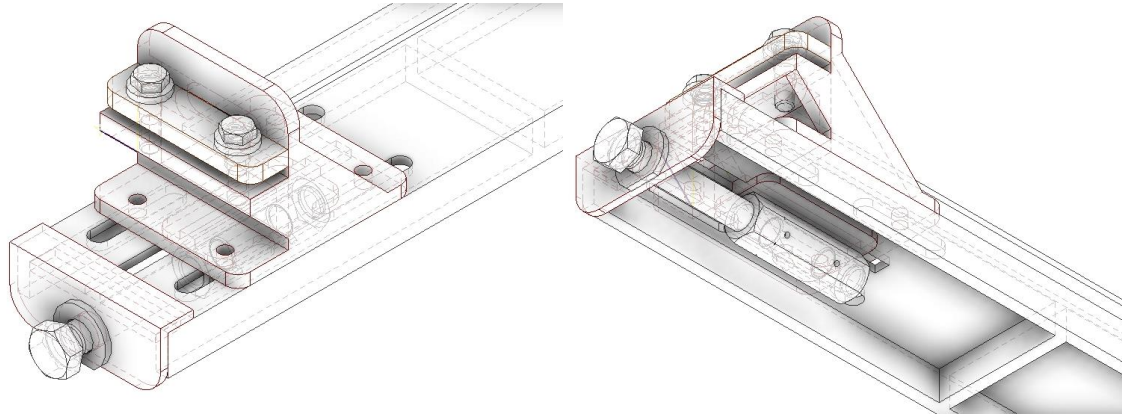


Figura 9 Marco de carga para la realización de las pruebas.

En la Figura 10, se pueden observar detalles del soporte móvil y sus elementos.



a) vista isométrica superior

b) vista isométrica inferior

Figura 10 Soporte móvil con tornillo de ajuste, montado sobre la base principal.

El marco de carga se fabricó en un taller de torno y fresadora, se consideró que era la mejor opción para cumplir con los requerimientos, las especificaciones y los acabados necesarios para su funcionamiento. El 90% del marco está fabricado en material de duraluminio, y el 10% se fabricó en acero inoxidable; el diseño está constituido por cuatro elementos principales, el primero es una base larga (base principal) con dimensiones 0.0314 x 0.12 x 1 metros; mecanizada en una sola pieza, evitando posibles efectos de flexión y torsión durante el proceso de soldadura.

El segundo elemento es un soporte semi-fijo con mordazas, sujeto la placa principal a través de 4 tornillos M12 de acero inoxidable, este soporte se considera semi-fijo porque la base principal tiene una disposición de orificios que el permiten colocar este soporte en tres posiciones, con lo que se modifica la longitud efectiva entre las mordazas del

soporte derecho y las mordazas del soporte izquierdo, logrando finalmente poder operar con probetas de diferentes longitudes.

En la Figura 11, se observa la base principal desde una vista inferior, así como los tornillos que sujetan al soporte semi- fijo.



Figura 11 Vista inferior del soporte semi- fijo.

Las mordazas están diseñadas para que se puedan ajustar a través del giro de dos tornillos, los cuales desplazan a la muela superior acercándola o alejándola de la mordaza inferior, la cual es fija y forma parte del propio soporte, aunado a este mecanismo se utilizan dos balas de acero, con la finalidad de permitir el momento que se genera en los extremos de la probeta por el propio peso de esta.

En la Figura 12, se observa el montaje de una probeta de latón utilizando las mordazas de sujeción, así como las balas utilizadas para permitir el giro la probeta.

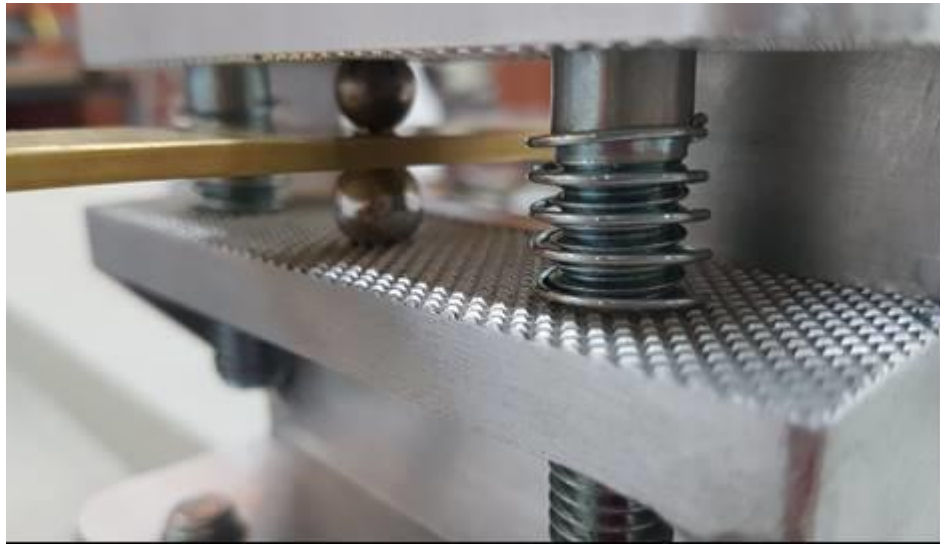


Figura 12 Sujeción de la probeta de latón, con empotramiento tipo bisagra.

El cuarto elemento es el sistema de desplazamiento unidireccional que complementa al soporte móvil, este mecanismo permite modificar de forma controlada la longitud del vano y la fuerza de tensión en la probeta en estudio.

En la Figura 13, se observa el sistema desplazamiento instalado en la parte inferior de la base principal.

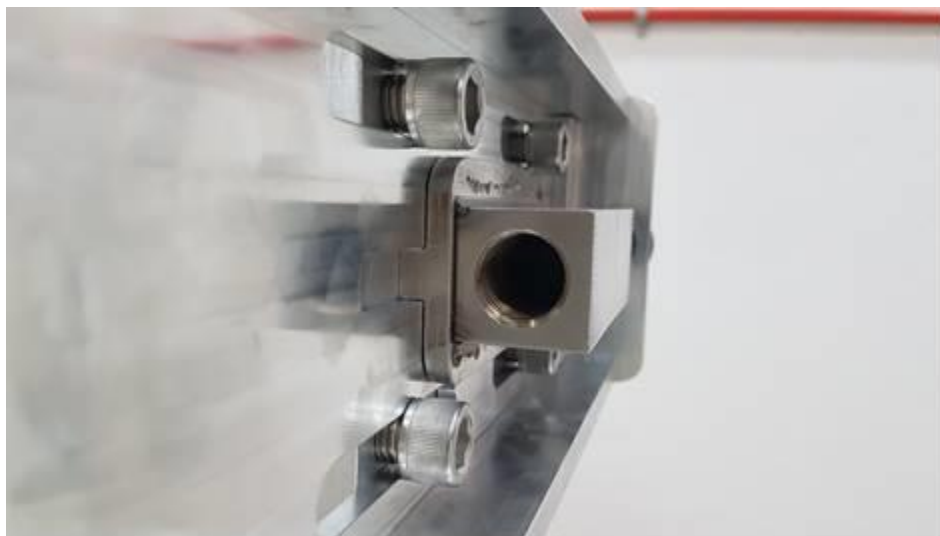


Figura 13 Soporte móvil, con sistema de desplazamiento unidireccional.

Para modificar la tensión en la probeta se gira el tornillo en sentido horario o antihorario según se requiera. El tornillo al estar roscado en la base del soporte móvil y restringido en cuando a su desplazamiento en las coordenadas cartesianas “Y” y “Z”, genera un efecto de respuesta, que desplaza al soporte móvil en dirección “X”, provocando que se modifique de forma controlada la fuerza de tensión a lo largo de la probeta en estudio.

En la Figura 14, se muestra la escala graduada para tener un mayor precisión al momento de realizar el giro del tornillo.



Figura 14 Tornillo con escala graduada para control del giro.

Para cada elemento del marco de carga, se generaron planos con especificaciones geométricas y de operación. Para ver los detalles se deberá revisar el Apéndice A “Planos y especificaciones del marco de carga”.

4.4 Fabricación e instrumentación de las probetas

Para la fabricación de las probetas se utilizaron barras con sección rectangular uniforme, se seleccionaron dos tipos de materiales, barras de aluminio y barras de latón. En la tabla 4.1 se presentan el total de las probetas que se utilizaron para el estudio.

Tabla 4.1: Tipo y numero de probetas que se utilizaron, Latón (La) y Aluminio (Al)

| Longitud "L" | Probeta de La 1/8" (25.4mm x 3.17mm) | Probeta de Al 1/8" (25.4mm x 3.17mm) | Probeta de Al 3/16" (25.4mm x 4.76mm) |
|--------------|---|---|--|
| L1 = | 900 mm | 900 mm | 900 mm |
| L2 = | 800 mm | 800 mm | 800 mm |
| L3 = | 680 mm | --- | --- |

En la Figura 15, se puede observar la geometría representativa de la probeta y su sección transversal.

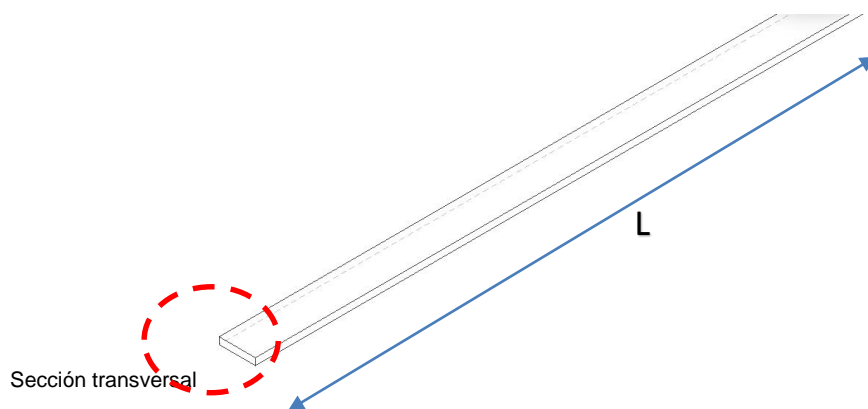


Figura 15 Representación de la probeta metálica.

En la Figura 16, se observan las secciones transversales de las probetas y su tipo de material.

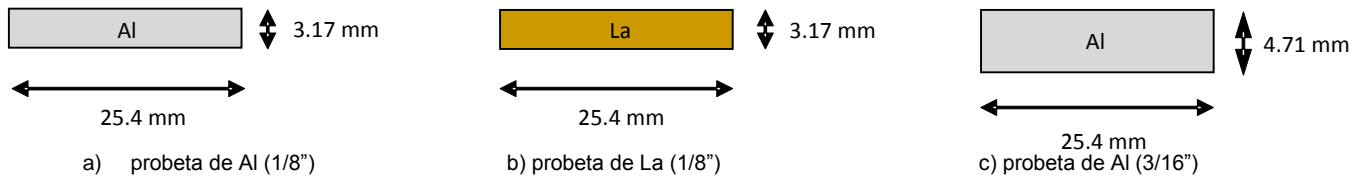


Figura 16 Secciones transversales de las probetas

Para medir la flecha, se utilizó un marcador para señalar la parte central de las probetas, y que esta “marca central” funcionara como punto de referencia para todas las lecturas que se hicieron durante el ensayo. De igual forma se realizó una segunda marca en las probetas, esta vez a 0.1 m desplazado de uno de los extremos, esto con la finalidad de poder la realizar la prueba de impacto en el mismo punto de referencia, correspondientes al análisis de vibración.

En la Figura 17, se observa la probeta de latón instalada, alineada con las marcas de referencia.

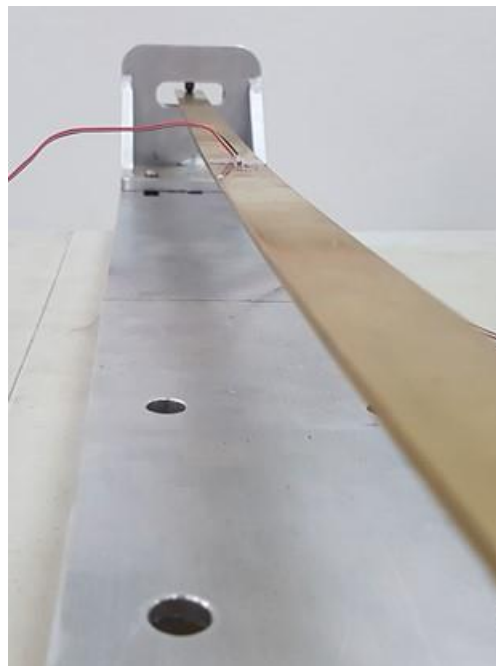


Figura 17 Probeta de Latón instalada, con marcas de referencia.

Para determinar el valor real del Módulo de Young (E), correspondiente a cada probeta, se realizaron pruebas experimentales de flexión en el laboratorio de materiales. El procedimiento y los resultados de las pruebas se incluyen en el apéndice B.

4.4.1 Instrumentación de probetas.

La etapa de instrumentación es una tarea fundamental y de gran importancia para la etapa de medición; del tipo y cantidad de galgas extensométricas, de la configuración seleccionada y del proceso con el que se adhieran las galgas a las probetas, dependerá la precisión en los resultados. Lo anterior debido a que existen variables experimentales que están presentes en las pruebas y que requieren ser eliminadas, por no corresponder al fenómeno en estudio.

La elección del número de galgas y la disposición en cada una de las probetas deriva del análisis preliminar, resultado del modelo analítico.

4.4.2 Selección de la galga extensométrica

Las galgas extensométricas basan su funcionamiento en la variación de resistencia en un conductor cuando éste es sometido a un esfuerzo mecánico. Se ha demostrado mediante la ley de Ohm, que existe una proporcionalidad entre las variaciones de resistencia del hilo conductor y la deformación que se produce. Por lo que se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta R}{R} = K * \varepsilon \quad (4.1)$$

Donde R es la resistencia entre las terminales de la galga, ε es la deformación en la rejilla y K es el factor de galga.

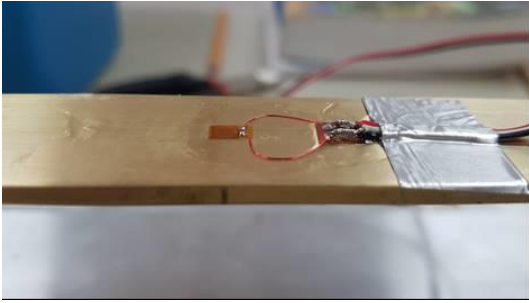
Para la etapa de instrumentación, se utilizaron galgas extensométricas del tipo unidireccional, estas galgas tienen un valor de 120 ± 0.3 Ohms y un F.G. de $2.005 \pm 2\%$. En la Figura 18, se puede observar el tipo y el tamaño de las galgas utilizadas.



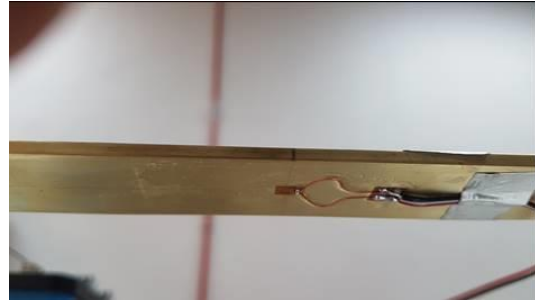
Figura 18 Galga extensométrica unidireccional.

Para el proceso de instrumentación se colocaron dos galgas extensométricas por cada probeta, una galga sobre la cara superior y otra galga en la cara inferior, ambas se colocaron en sentido longitudinal a la probeta y utilizando el mismo eje de referencia. Esta configuración se realizó con el fin de evitar ruidos experimentales y poder obtener de forma independiente los esfuerzos normales y los esfuerzos por flexión.

En el inciso a de la Figura 19, se observa la galga instaladas sobre la cara superior, y en el inciso b de la misma Figura, se observa la galga instalada en la cara inferior de la probeta, la Figura corresponden a la probeta de latón.



a) Galga extensométrica superior



b) Galga extensométrica inferior

Figura 19 Galgas colocadas sobre las caras de la probeta de latón.

Antes de realizar los ensayos para el estudio, se realizaron pruebas de medición previas, con la finalidad de evaluar características de la señal y condiciones de estabilidad en las galgas extensométricas, por lo que realizaron pruebas de linealidad, deriva y repetibilidad.

Para las pruebas se utilizó el equipo modelo P3 de la empresa Micro- Measurements de 4 canales, de los cuales se utilizaron sólo dos, un canal para tomar las lecturas de la galga superior y el segundo para tomar las lecturas de la galga inferior. En la Figura 20 se observa la imagen del equipo.

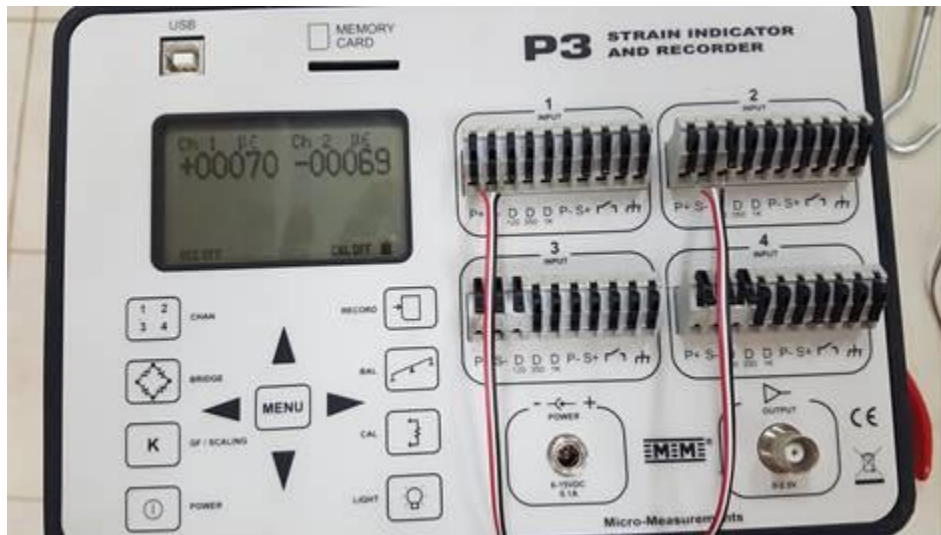


Figura 20 Equipo de medición P3, para la medición de las micro deformaciones.

4.5. Pruebas experimentales.

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en el taller de mecánica experimental de la Facultad de Ciencias Químicas e ingeniería.

Para realizar las pruebas experimentales correspondientes a la frecuencia natural, se utilizó un equipo de adquisición de datos dinámico modelo system 9000-16-SM, en coordinación con la técnica de extensométrica eléctrica. En los incisos a) y b) de la Figura 21, se muestra la cara frontal y posterior del equipo utilizado.



a) Cara frontal del equipo



b) Cara posterior del equipo

Figura 21 Data Acquisition System, modelo 9000-16-SM.

La primer parte del estudio se realizó como un análisis estático, por lo que para determinar la flecha en la probeta, se utilizó el reloj comparador, tomando los registrando en forma manual para cada incremento de tensión, a la par de los valores de la flecha se adquirieron los valores de las deformaciones por lo que se utilizaron dos canales del scanner, correspondientes a las dos galgas extensometricas, a través del modelo analítico se pudo determinar las deformaciones en la probeta en función de la fuerza de tensión y de la flecha. Los registros se almacenaron de forma manual en hojas de Excel.

Posteriormente para el estudio experimental dinámico, se configuró el scanner system 9000 para operar en una frecuencia de muestro (F_s) de 5 kHz, esto es, la adquisición de 5000 datos por segundo, sin embargo, para los fines del estudio solo se presentan resultados con las oscilaciones naturales en el rango de 1 a 250 Hz. En la Figura 22, se

puede observar el comportamiento de la señal de la oscilación de la probeta en función del tiempo. Los datos se visualizan en una interfaces del software proporcionado por MICRO MEASUREMENTS, quien es la empresa responsable de su manufactura.

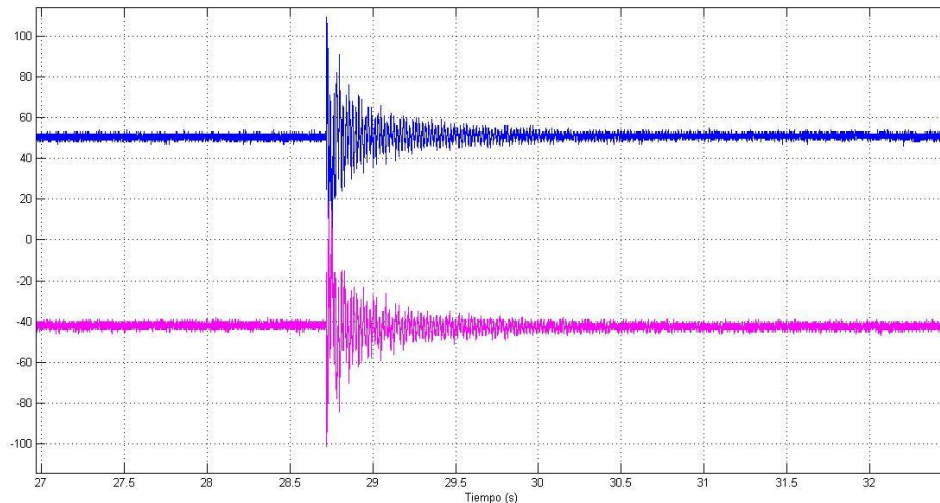


Figura 22 Grafica de la señal obtenida a través del scanner system 9000.

El software de MICRO MEASUREMENTS utilizado para la adquisición de los datos, tiene herramientas para el almacenamiento y para la exportación de datos a distintos formatos, por lo que se utilizó esta opción para exportar los resultados del análisis de la frecuencia a archivos de Excel, para su posterior procesamiento.

En la Figura 23, se puede observar el comportamiento de la señal original, y una ventana con ampliación, donde se aprecia con mayor detalle los puntos de muestreo y el comportamiento oscilatorio de esta. La ventana de observación corresponde a un tiempo de 60 milisegundos.

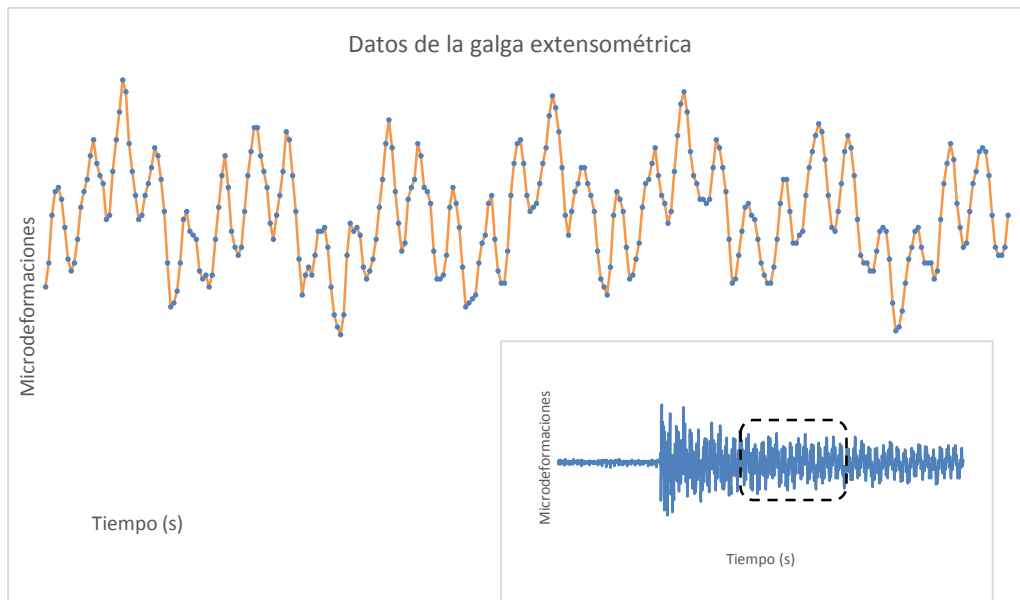
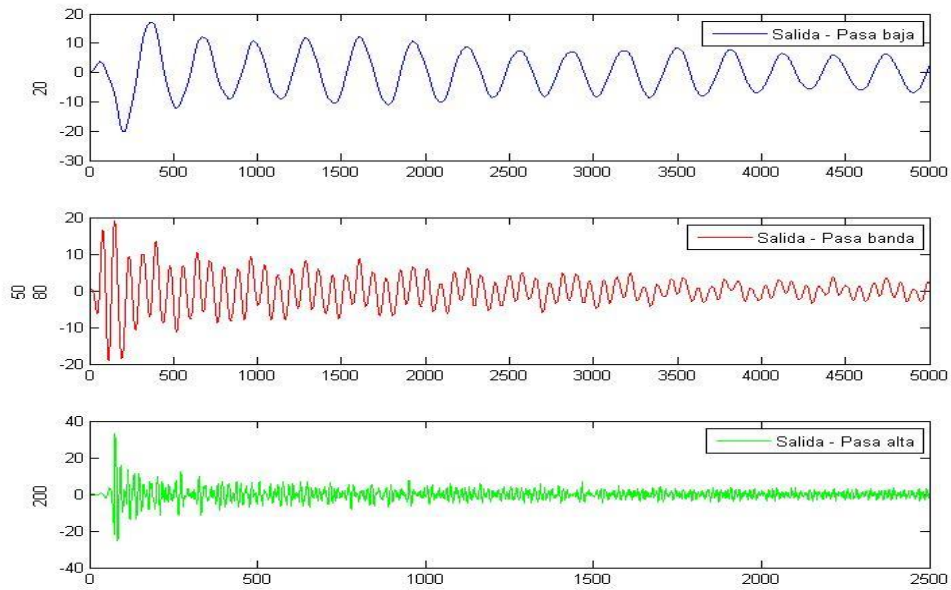


Figura 23 Ventana de observación de la señal adquirida.

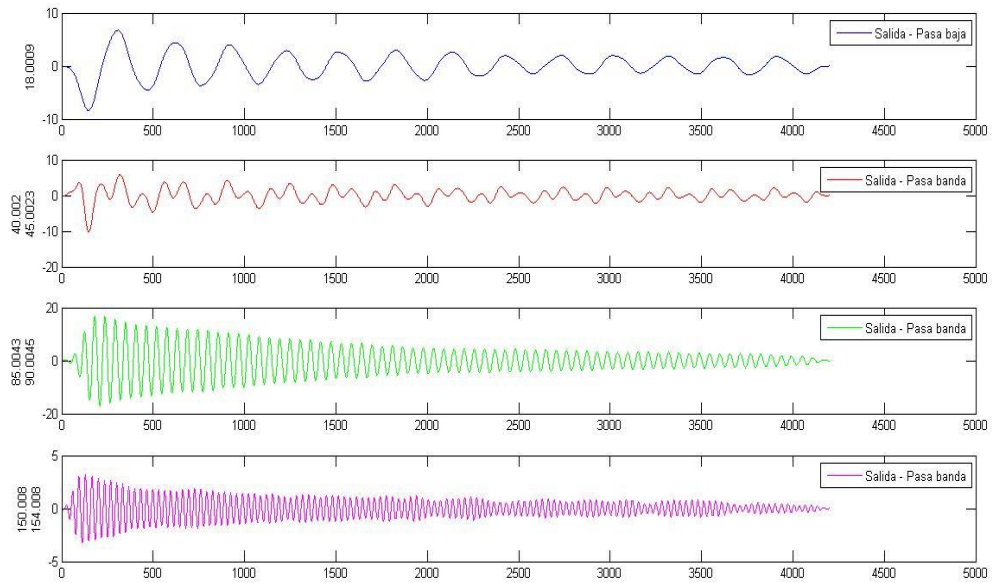
Este proceso de análisis y visualización de datos se realizó para cada una de las probetas que se utilizaron en la realización del estudio.

Durante este proceso de adquisición y análisis, se observó que la señal adquirida se comporta como una señal periódica, y en esta se pueden observar varios modos de vibración, por lo que para mejorar el análisis, se procesó la señal a través de filtros pasa baja, filtros pasa banda y filtros pasa alta, con la finalidad de identificar mejor los rangos de frecuencia y posteriormente determinar sus modos de vibración.

En la Figura 24, se observa el comportamiento de la señal, una vez que ha sido procesada a través de diversos filtros. El inciso a) corresponde a la aplicación de 3 filtros y el inciso b) corresponde a la aplicación de 4 filtros. Los incisos a) y b) no corresponden a la misma señal de origen.



a) Aplicación de tres filtros.



b) Aplicación de cuatro filtros.

Figura 24 Aplicación de filtros FIR en el software de MATLAB

En la Figura 25, se observan tres graficas de la señal, en la gráfica superior se observa el comportamiento de la señal original en función del tiempo, mientras que en las gráficas subsecuentes se observa el comportamiento de la señal en el espectro de frecuencia.

Los espectros de frecuencia se obtuvieron a través de la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier, posteriormente se normalizaron para visualizar las gráficas en unidades de Hertz.

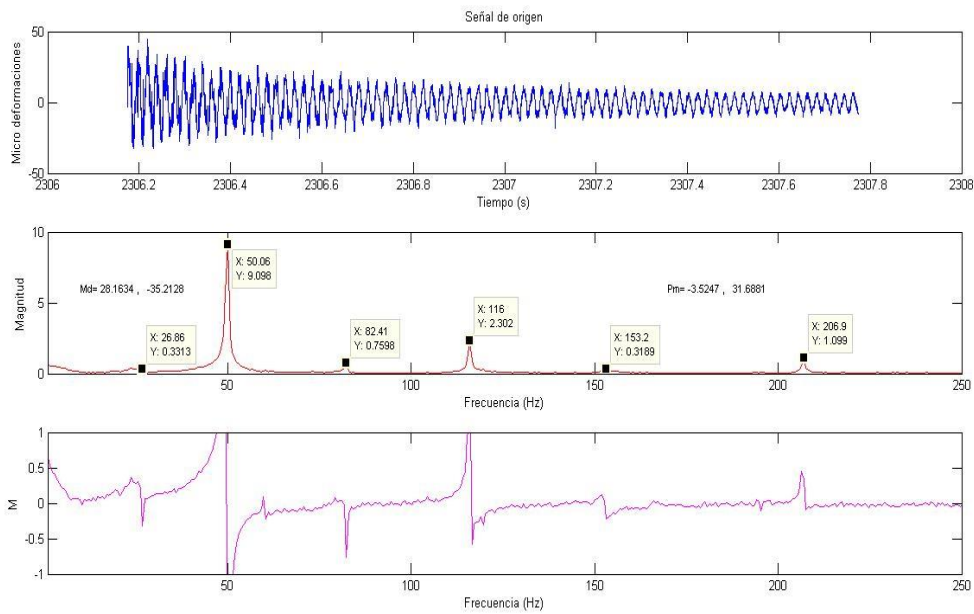


Figura 25 Graficas con los espectros de frecuencia, a través de la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier.

Capítulo V. Resultados experimentales y análisis.

En este capítulo se muestran y describen los resultados de la etapa experimental, se analizan los resultados obtenidos en las mediciones de los ensayos. Para todas las probetas se determinó de forma experimental la frecuencia de oscilación en función de los esfuerzos normales y de la flecha.

Para el análisis de los resultados, se exportaron los registros del scanner system 9000 a archivos en formato de Excel. A través del uso del software de Matlab, se graficó los resultados, posteriormente realizó la interpretación de los resultados.

5.1 Adecuación de los datos.

Una vez terminada la etapa de los ensayos, los registros de las pruebas de los esfuerzos y frecuencia de oscilación se exportaron a archivos en formato de Excel, Las hojas de Excel tienen cuatro columnas, la columna no. 1 define el número consecutivo del valor almacenado, la columna no. 2 define el tiempo en segundos en el que se adquirió el dato (200 microsegundos entre dato y dato), la columna no. 3 y no. 4, definen el valor de la galga superior e inferior respectivamente, esto en unidades de micro deformaciones.

Las cuatro columnas de la hoja tienen el mismo número de filas, el número de filas depende del tiempo que se utilizó para registrar las oscilaciones. Para cada prueba se grabó en promedio 5 segundos de oscilación, por lo que las filas tienen al menos 25 mil datos.

5.2 Obtención de los espectros de frecuencia

Para graficar y determinar los modos de vibración de las diversas ensayos, se utilizó el software de Matlab, se programó un código para que a partir de las señales adquiridas, procese los datos en función del tiempo y genere el espectro en función de la frecuencia. A continuación se describe los pasos realizados:

- 1.- Importa las columnas de la hoja de Excel, guarda 3 variables las cuales corresponden al tiempo, y a los valores de deformación registrados por las galgas extensométricas.
- 2.- Encuentra los valores máximos y mínimos de las deformaciones registradas, utiliza el valor máximo para graficar a partir de ese punto la señal en función del tiempo, acomodando los valores del tiempo en el eje de las ordenadas y el valor de las micro deformaciones en el eje de las abscisas.
- 3.- Determina el número de muestras, el tiempo de grabación y obtiene la Frecuencia de muestreo (F_s).
- 4.- Usando la Transformada de Fourier (fft) se obtiene el espectro de frecuencia, se normaliza la gráfica y se establece un rango de visualización de 0 a 200Hz, rango suficiente para visualizar los primeros 3 modos de vibración.
- 5.- Como complemento a los gráficos, se agregan títulos, leyendas y notas, lo cual ayuda en la interpretación de resultados.

El proceso se realizó para cada uno de los archivos exportados, cubriendo el total de las probetas y sus diferentes longitudes.

En el apéndice C. se observan las gráficas de la señal original y de los espectros de frecuencia.

5.3 Análisis de resultados.

Los resultados correspondientes al análisis de esfuerzos y a los espectros de frecuencia de cada ensayo se condensaron en hojas de Excel; En la Figura 26, se presentan en forma gráfica los resultados.

Derivado del modelo analítico y respetando las condiciones de frontera (viga simplemente apoyada) se determinaron las frecuencias de oscilación para las tres longitudes consideradas en las probetas. En la Tabla 5.1, se presentan los resultados. Las ecuaciones se resolvieron para los primeros cuatro modos de vibración.

Tabla 5.1: Resultados del modelo analítico

Frecuencia de Oscilación (Hz)

| Modos | L3 (0.68m) | L2 (0.80m) | L1 (0.90m) |
|-------|------------|------------|------------|
| 1 | 11.06 | 7.99 | 6.31 |
| 2 | 44.23 | 31.95 | 25.25 |
| 3 | 99.51 | 71.90 | 56.81 |
| 4 | 176.91 | 127.82 | 100.99 |

De igual forma se determinó la frecuencia de oscilación para las probetas, usando condiciones de frontera similares, (viga con apoyos tipo bisagra), además de que se realizaron los ensayos sin aplicar fuerza de tensión. Los resultados se presentan en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Resultados del análisis experimental.

Frecuencia de Oscilación (Hz)

| Modos | L3 (0.68m) | L2 (0.80m) | L1 (0.90m) |
|-------|------------|------------|------------|
| 1 | 18.50 | 18.31 | 12.82 |
| 2 | 45.18 | 37.85 | 26.25 |
| 3 | 91.57 | 73.87 | 51.28 |
| 4 | 155.1 | 122.7 | 83.63 |

Los resultados obtenidos derivados del modelo analítico y del modelo experimental, se presentan en las Figura 26.

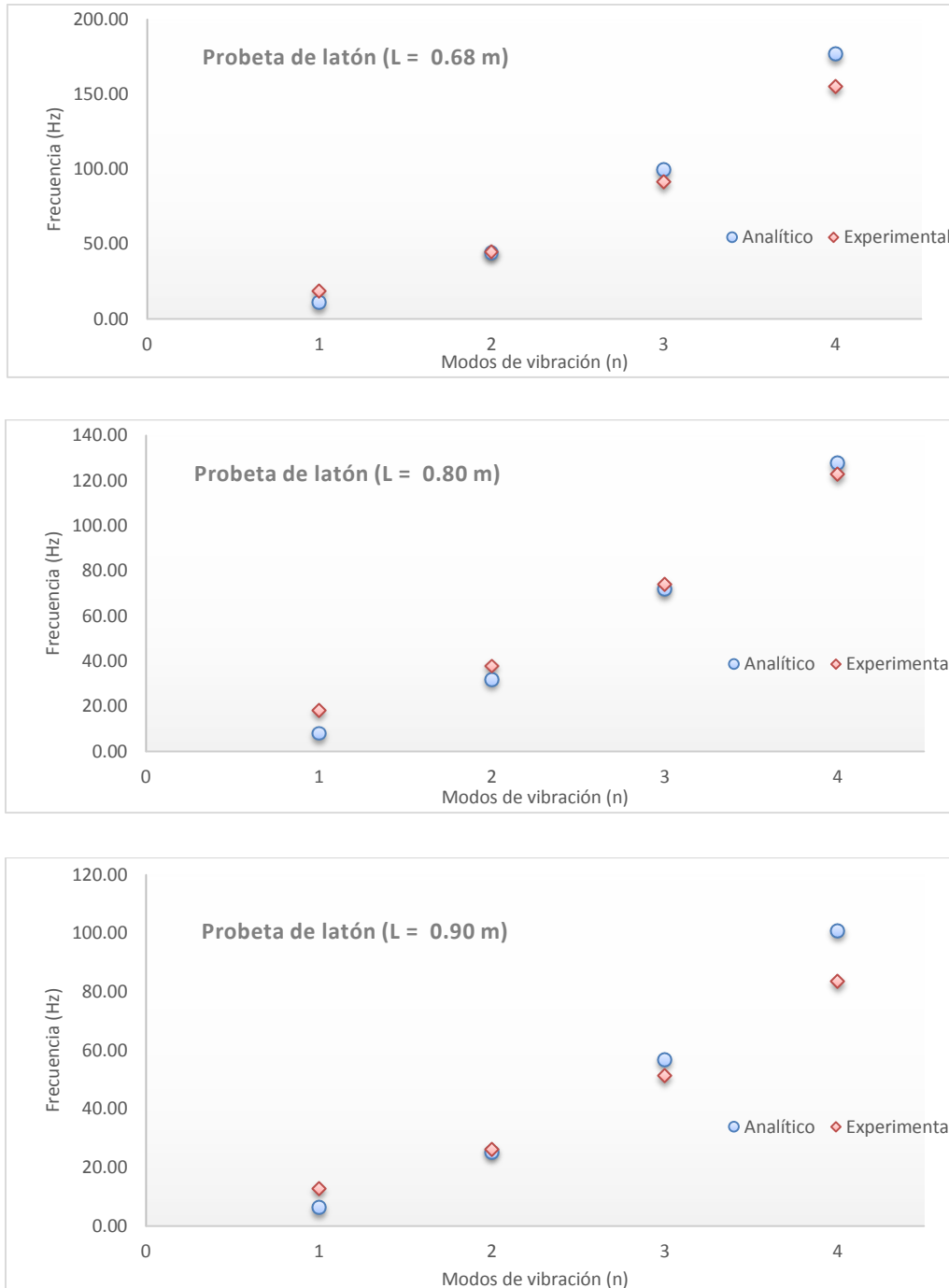


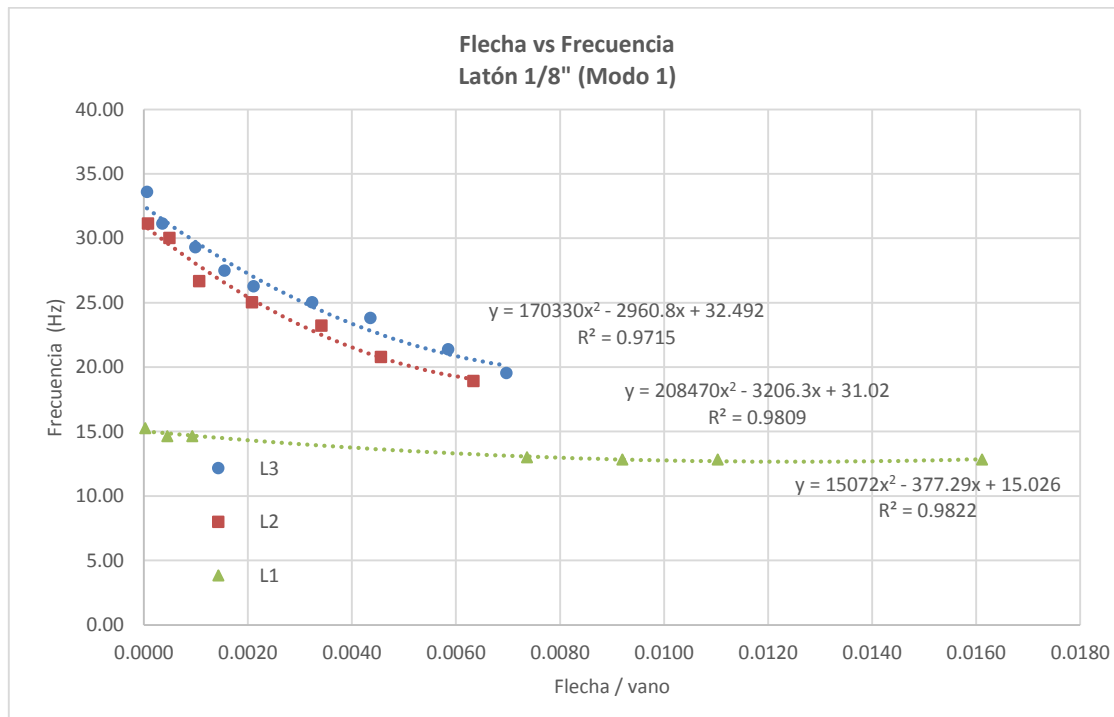
Figura 26 Resultado del modelo analítico y del modelo experimental, probetas de latón.

En la Figura 26, se observa que el comportamiento de los valores de la frecuencia obtenidos de forma experimental, mantiene similitud con el comportamiento del modelo teórico. Sin embargo, existe un desfase entre los puntos; esta desviación se debe a la discrepancia entre las condiciones de frontera de los dos modelos.

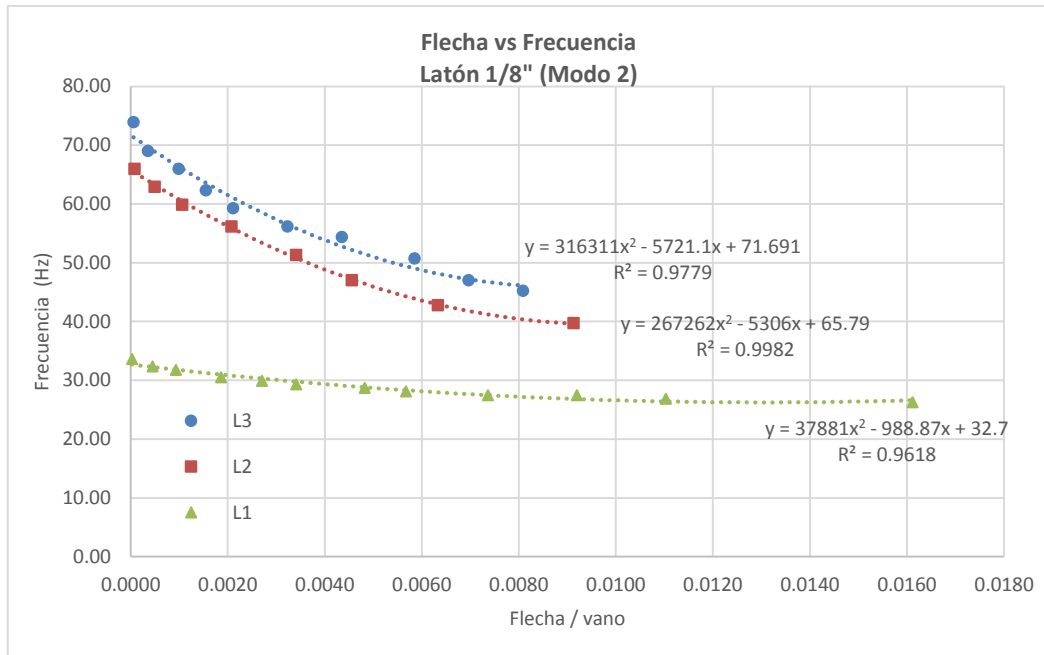
5.3.1 Resultados del comportamiento de las frecuencias de oscilación en función de la flecha, probetas de Latón 1/8".

En este apartado se realiza el análisis del comportamiento de las frecuencias de oscilación en función de la flecha, en la Figura 27 se muestran los resultados del estudio, correspondiente a las probetas de latón. Los inciso a), b) y c) corresponden al primer, segundo y tercer modo de vibración.

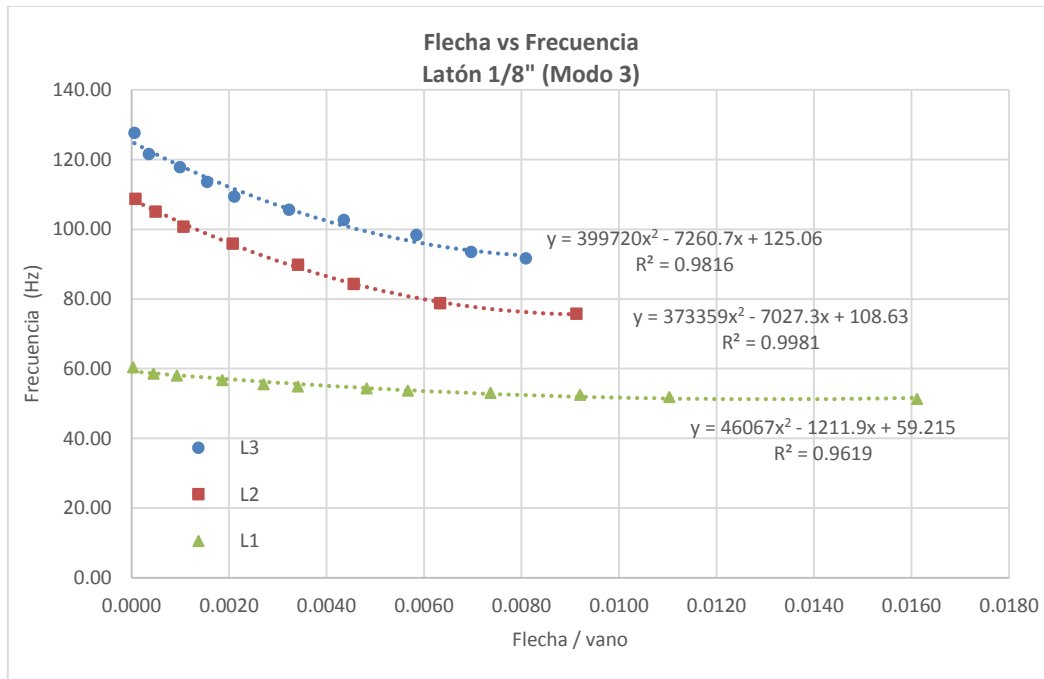
En la Figura 27, se presentan los modelos representativos (ecuaciones analíticas) que describen el comportamiento de la frecuencia de oscilación en función de la flecha/vano.



a) Grafica del primer modo de vibración en función de la longitud, probeta de latón 1/8".



b) Grafica del segundo modo de vibración en función de la longitud, probeta de latón 1/8".



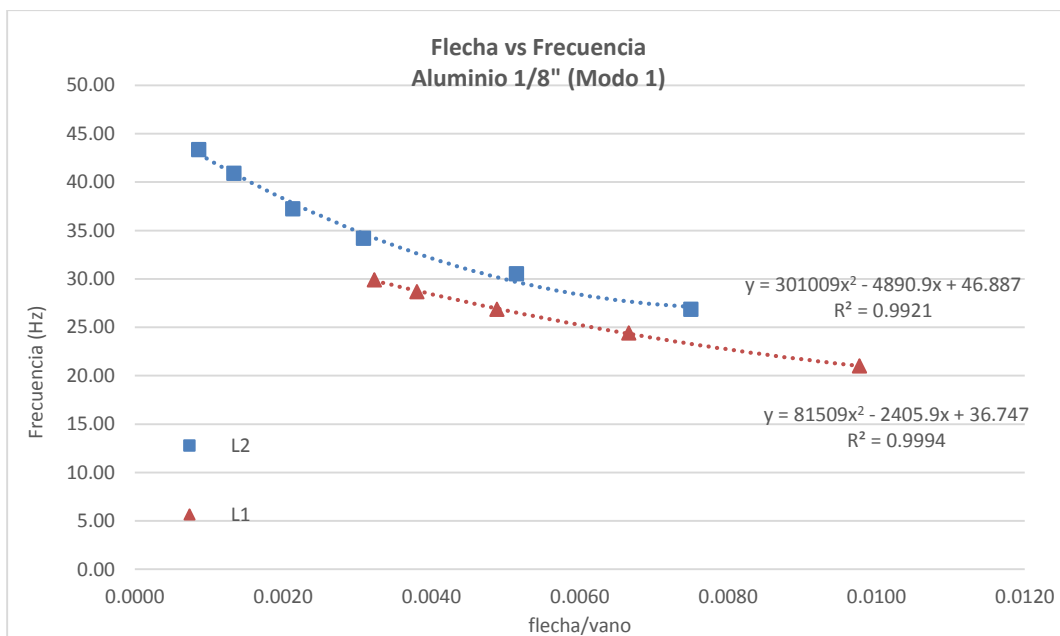
c) Grafica del tercer modo de vibración en función de la longitud, probeta de latón 1/8".

Figura 27 Modelos representativos del comportamiento de la frecuencia natural, probeta de latón.

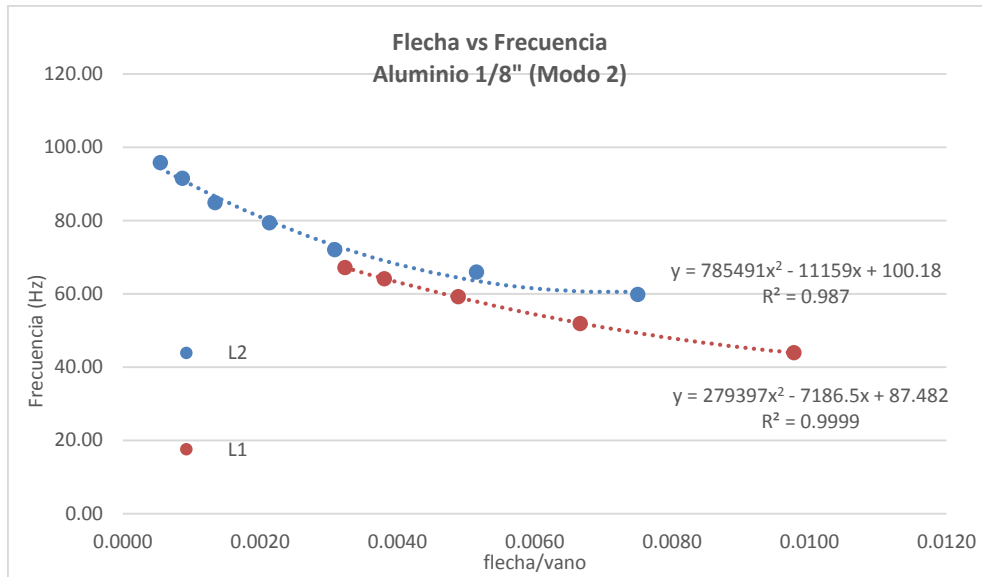
En la figura 27, incisos a), b) y c) también se observa el comportamiento de las curvas características de las probetas de latón en sus tres longitudes consideradas para el estudio. Como parte de los resultados del análisis, se puede determinar que entre menor sea la longitud de la probeta (vano), mayor es la frecuencia de oscilación, así también podemos observar que las curvas representadas por la longitud L2 y L3, conservan un desfase similar, aun cuando cambia la relación de flecha/vano.

5.3.2 Resultados del comportamiento de las frecuencias de oscilación en función de la flecha, probetas de Aluminio 1/8".

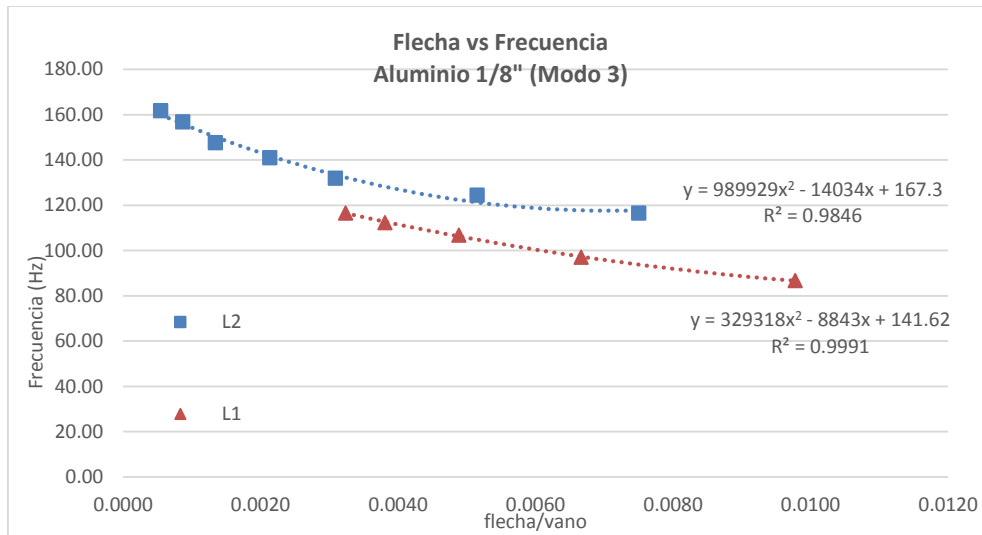
En la Figura 28 se muestran los resultados del estudio, correspondiente a las probetas de aluminio. Los inciso a), b) y c) corresponden al primer, segundo y tercer modo de vibración. En la Figura 28, también se determinan los modelos representativos (ecuaciones analíticas) que describen el comportamiento de la frecuencia de oscilación en función de la flecha/vano.



a) Grafica del primer modo de vibración en función de la longitud, probeta de aluminio 1/8".



b) Grafica del segundo modo de vibración en función de la longitud, probeta de aluminio 1/8".



a) Grafica del tercer modo de vibración en función de la longitud, probeta de aluminio 1/8".

Figura 28 Modelos representativos del comportamiento de la frecuencia natural, probeta de aluminio.

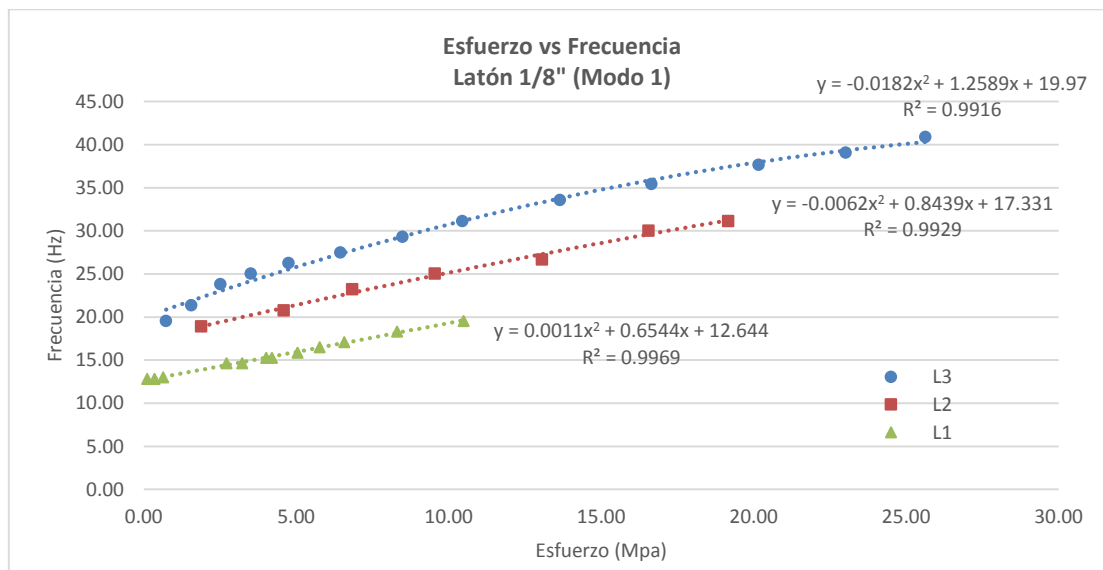
En la figura 28, incisos a), b) y c) se observa el comportamiento de las curvas características de las probetas de aluminio. De igual forma que en el caso de las probetas

de latón, también se determinó que entre menor sea la longitud de la probeta (vano), mayor es la frecuencia de oscilación.

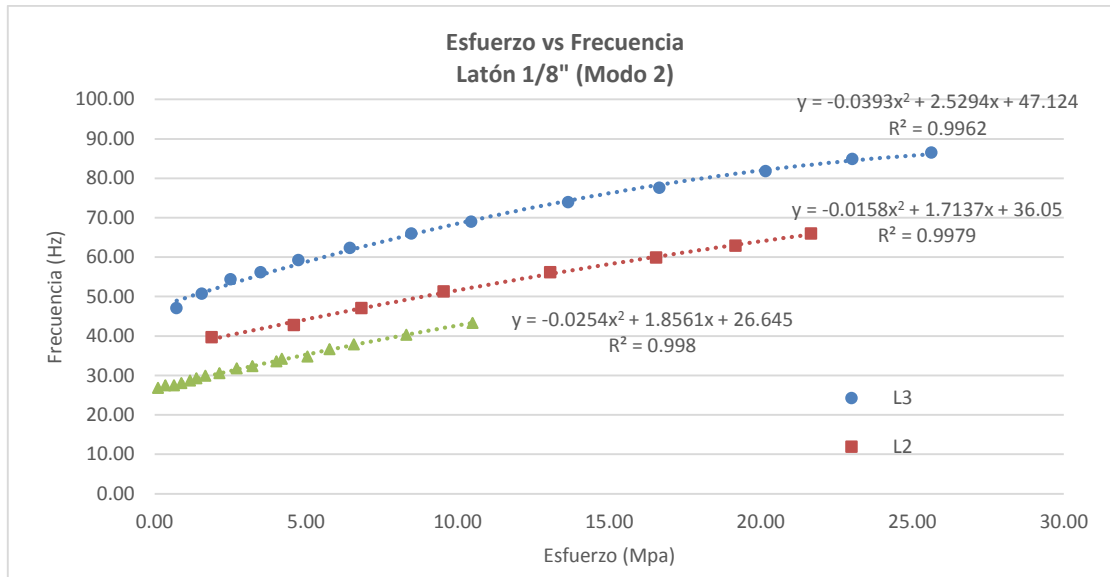
5.3.3 Resultados del comportamiento de las frecuencias de oscilación en función del esfuerzo, probetas de Latón 1/8".

En este apartado se realiza el análisis del comportamiento de las frecuencias de oscilación en función del esfuerzo, en la Figura 29 se muestran los resultados del estudio, correspondiente a las probetas de latón. Los inciso a), b) y c) corresponden al primer, segundo y tercer modo de vibración.

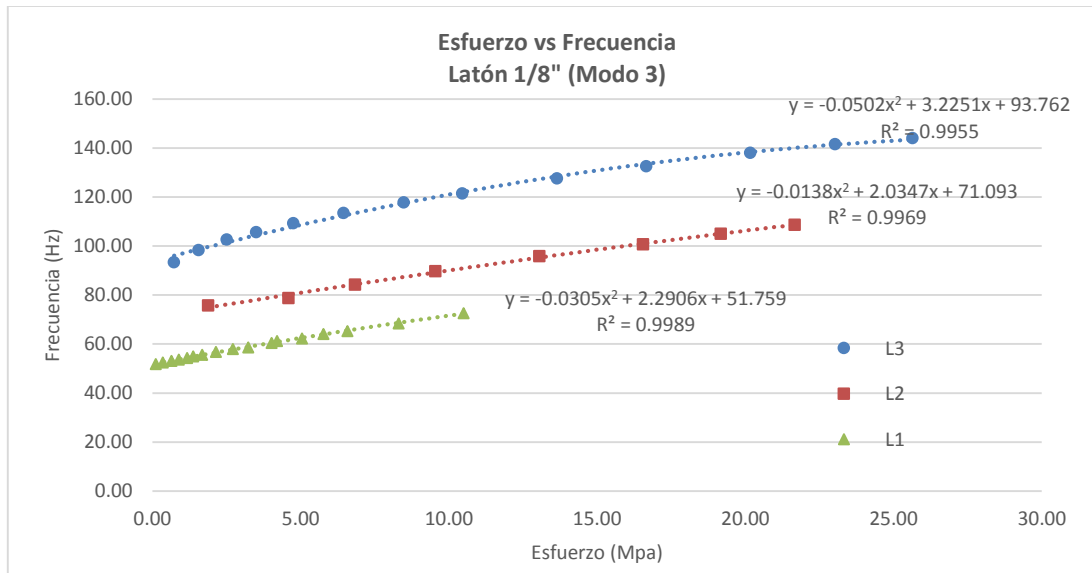
En los incisos de la Figura 29, también se presentan los modelos representativos (ecuaciones analíticas) que describen el comportamiento de la frecuencia de oscilación en función del esfuerzo.



a) Grafica del primer modo de vibración en función de la longitud, probeta de latón 1/8".



b) Gráfica del segundo modo de vibración en función de la longitud, probeta de latón 1/8".



c) Gráfica del tercer modo de vibración en función de la longitud, probeta de latón 1/8".

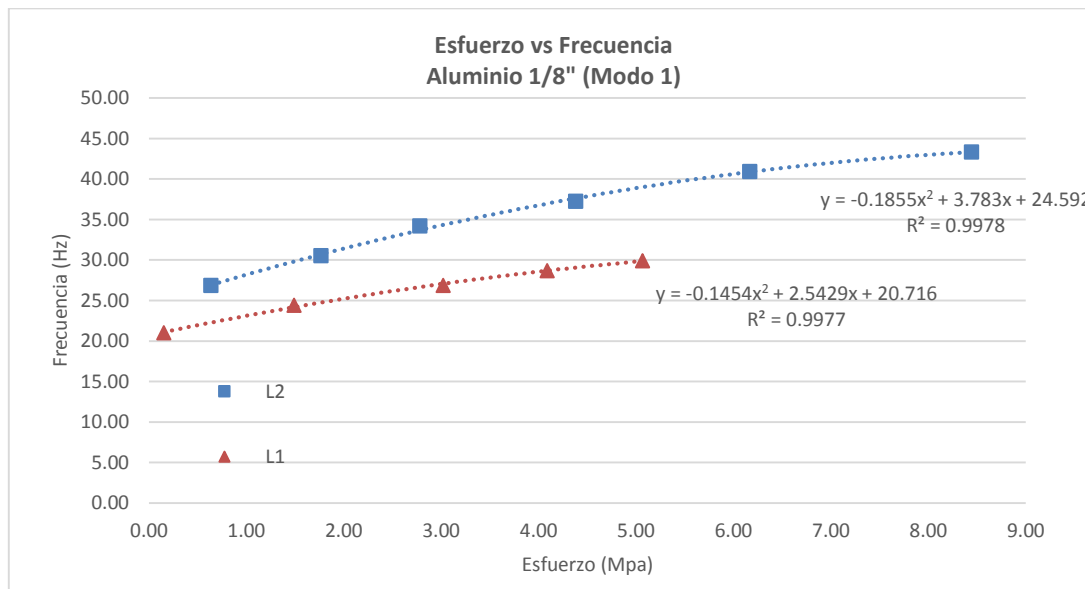
Figura 29 Modelos representativos del comportamiento de la frecuencia natural, probeta de latón.

Derivado del análisis de las curvas características de la Figura 29, se determina que entre mayor sea el esfuerzo en las probeta, mayor será la frecuencia de oscilación. Este comportamiento es similar al que se presenta en una cuerda de geometría constante sometida a fuerzas de tensión en sus extremos.

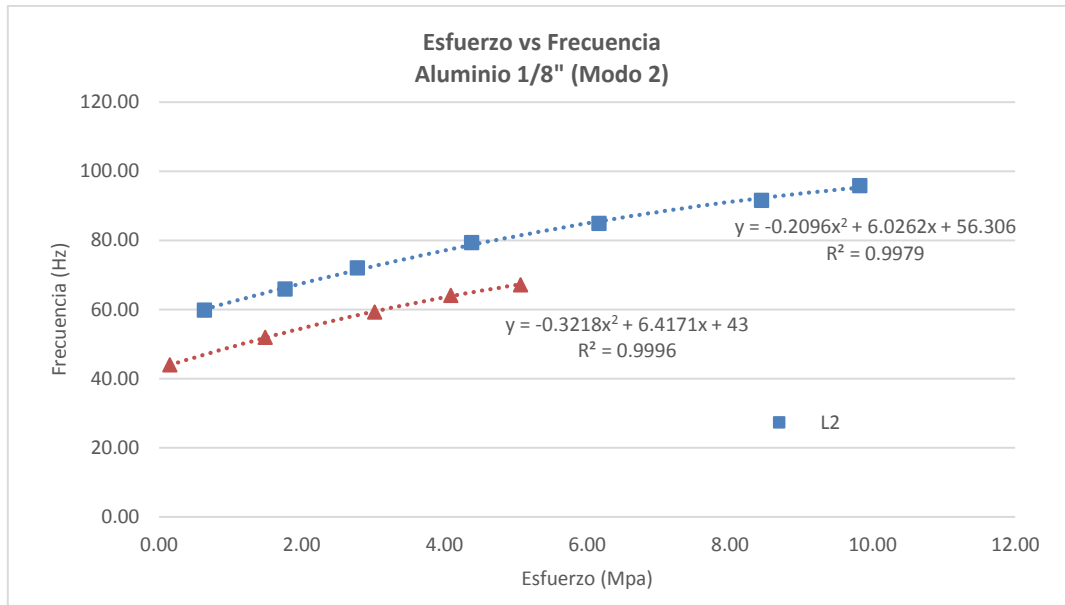
5.3.4 Resultados del comportamiento de las frecuencias de oscilación en función del esfuerzo, probetas de Aluminio 1/8".

En este apartado se realiza el análisis del comportamiento de las frecuencias de oscilación en función del esfuerzo, en la Figura 30 se muestran los resultados del estudio, correspondiente a las probetas de aluminio. Los incisos a), b) y c) corresponden al primer, segundo y tercer modo de vibración.

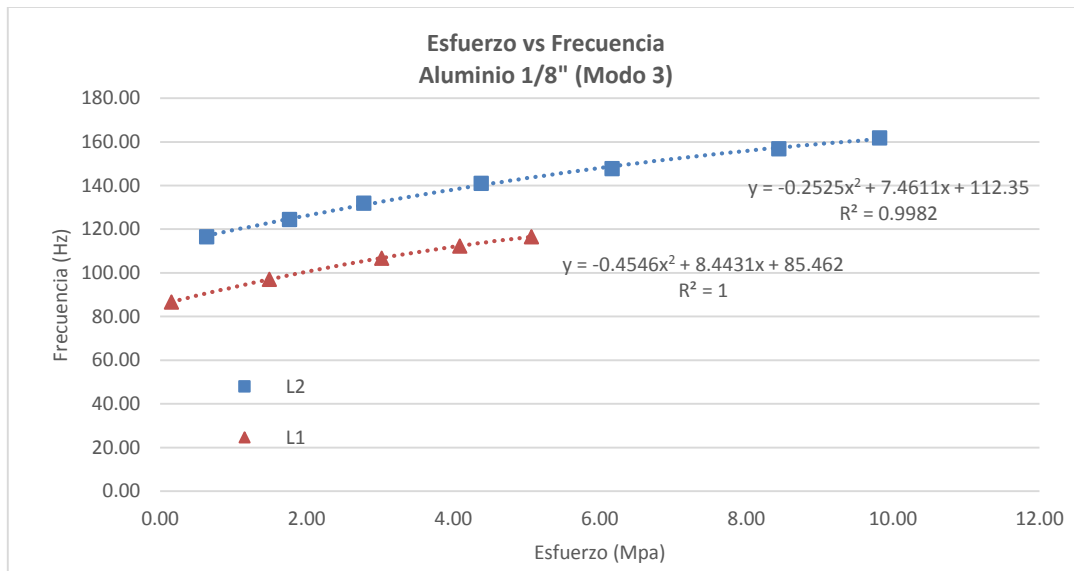
En los incisos de la Figura 30, también se presentan los modelos representativos (ecuaciones analíticas) que describen el comportamiento de la frecuencia de oscilación en función del esfuerzo.



a) Grafica del primer modo de vibración en función de la longitud, probeta de aluminio 1/8".



b) Grafica del primer modo de vibración en función de la longitud, probeta de aluminio 1/8".



c) Grafica del primer modo de vibración en función de la longitud, probeta de aluminio 1/8".

Figura 30 Modelos representativos del comportamiento de la frecuencia natural, probeta de aluminio.

Derivado del análisis de las curvas características de la Figura 30, se determina que entre mayor sea el esfuerzo en las probeta, mayor será la frecuencia de oscilación.

Capítulo VI. Conclusiones y recomendaciones.

En este capítulo se describen las conclusiones obtenidas a partir de las actividades desarrolladas en este proyecto (pruebas experimentales y análisis de los resultados) cumpliendo con las hipótesis y los objetivos establecidos.

6.1 Conclusiones.

Como resultado del estudio paramétrico realizado en este trabajo, donde se analizó el comportamiento mecánico de conductores aéreos de energía eléctrica, se presentan las siguientes conclusiones.

Conclusión general:

Se obtuvieron los modelos analíticos representativos que, a través de una analogía y trabajando con soleras metálicas, describen en forma paramétrica el comportamiento de conductores aéreos de energía eléctrica, en función de las siguientes variables: la flecha, la tensión del conductor, las frecuencias naturales de oscilación y la longitud.

Conclusiones particulares:

- a) El marco de carga fabricado, permitió la realización eficiente de las pruebas experimentales establecidas, (tensión, flexión y análisis de vibración).
- b) El método de pruebas experimentales, así como la preparación y ubicación de los extensómetros en la etapa de instrumentación de las probetas, permitió obtener las señales libres de ruido mecánico (torsión, flexión, cambio de temperatura, entre otros).

- c) A través del desarrollo de los ensayos, se logró adquirir en forma experimental, las señales de la frecuencia de oscilación de las probetas en función del tiempo.

- d) A través del procesamiento de las señales y del análisis de los espectros de frecuencia, se logró representar en forma paramétrica el comportamiento cualitativo de las probetas, representando la frecuencia natural en función de la flecha y la frecuencia natural en función del esfuerzo de tensión.

6.2 Recomendaciones

Se recomienda retomar la metodología establecida en el presente estudio, agregando probetas de otros materiales y diversas geometrías para obtener curvas paramétricas en función del tipo de material y con cambio en la geometría.

Se recomienda preparar e instrumentar más probetas para incrementar la fiabilidad en los resultados del estudio.

Se recomienda realizar el estudio utilizando la metodología y adaptando el modelo físico y analítico a una escala real, por medio del cual se pueda determinar la frecuencia natural de oscilación en conductores de escala real.

Apéndice A “Planos y especificaciones del marco de carga”

En el documento se presentan los planos con los detalles geométricos para la fabricación del marco de carga, los planos están ordenados de la siguiente manera:

Figura A1. Ensamble general del marco de carga.

Figura A2. Base principal, sobre la cual se montan los soportes.

Figura A3. Soporte izquierdo, soporte semi - fijo.

Figura A4. Soporte derecho, soporte móvil.

Figura A5. Pieza de respaldo y muelas superiores.

El diseño de cada elemento y su ensamble virtual se realizó a través del software Inventor de la empresa Autodesk

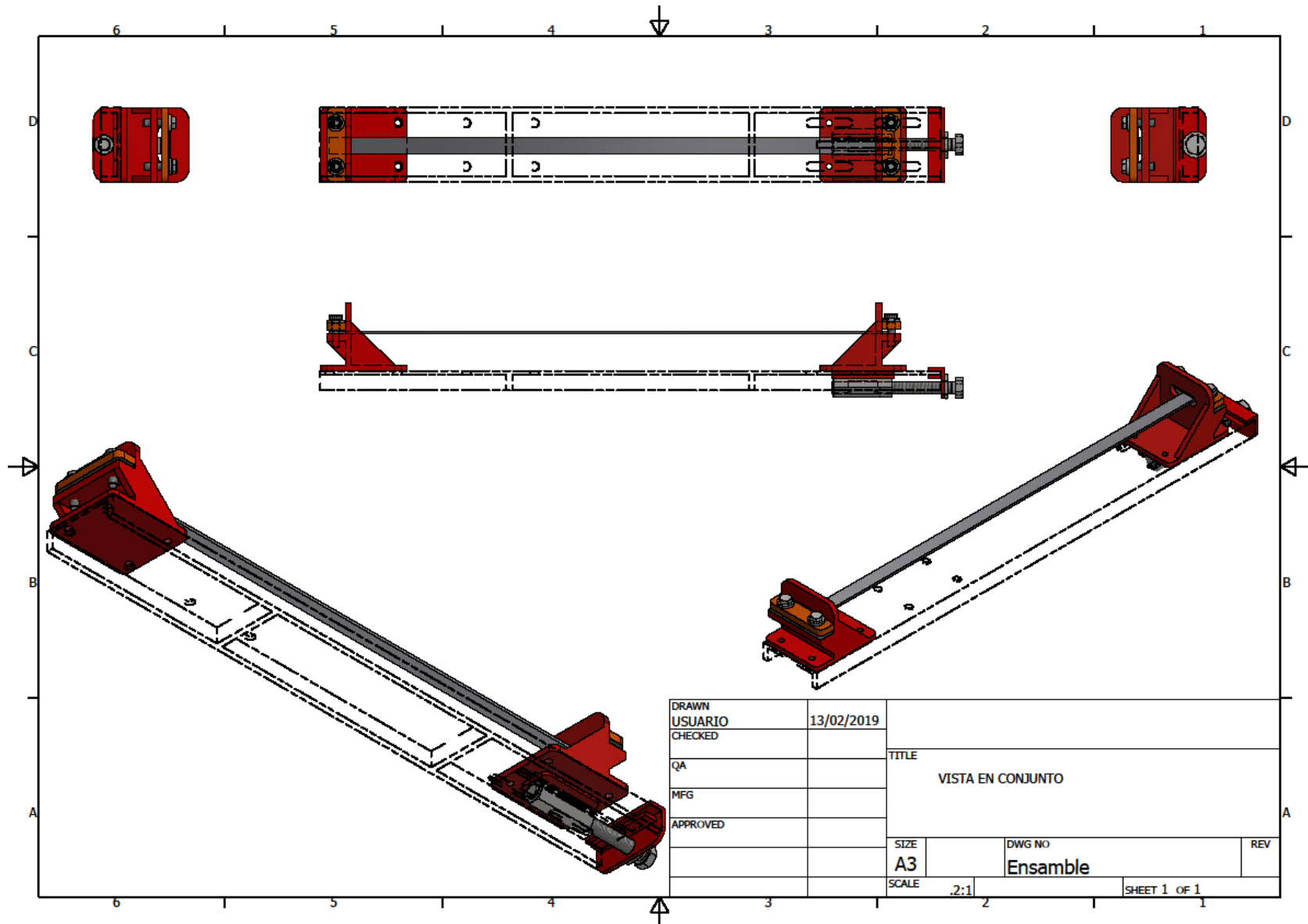


Figura A1.Ensamble general del marco de carga.

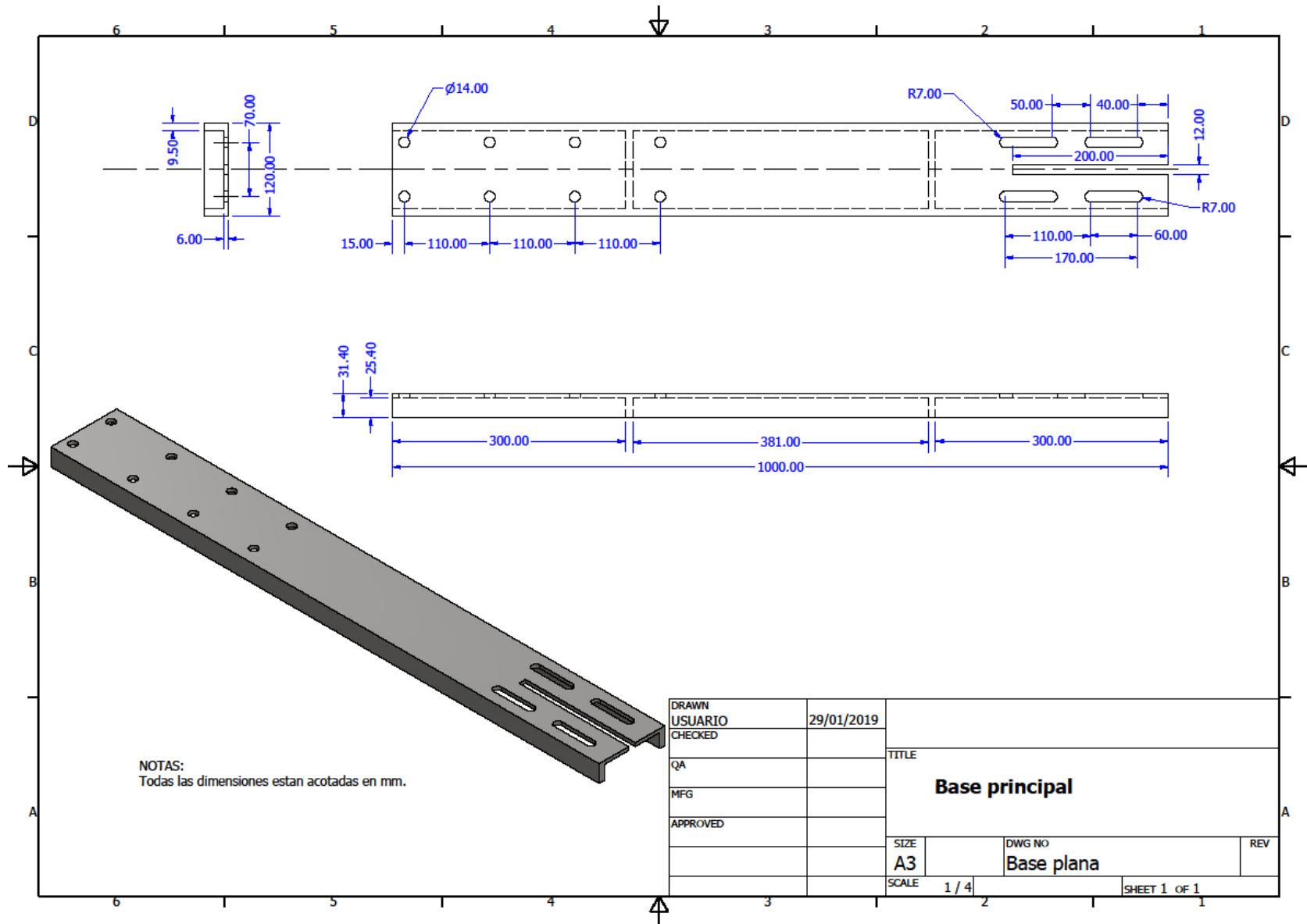


Figura A2. Base principal, sobre la cual se monta los soportes.

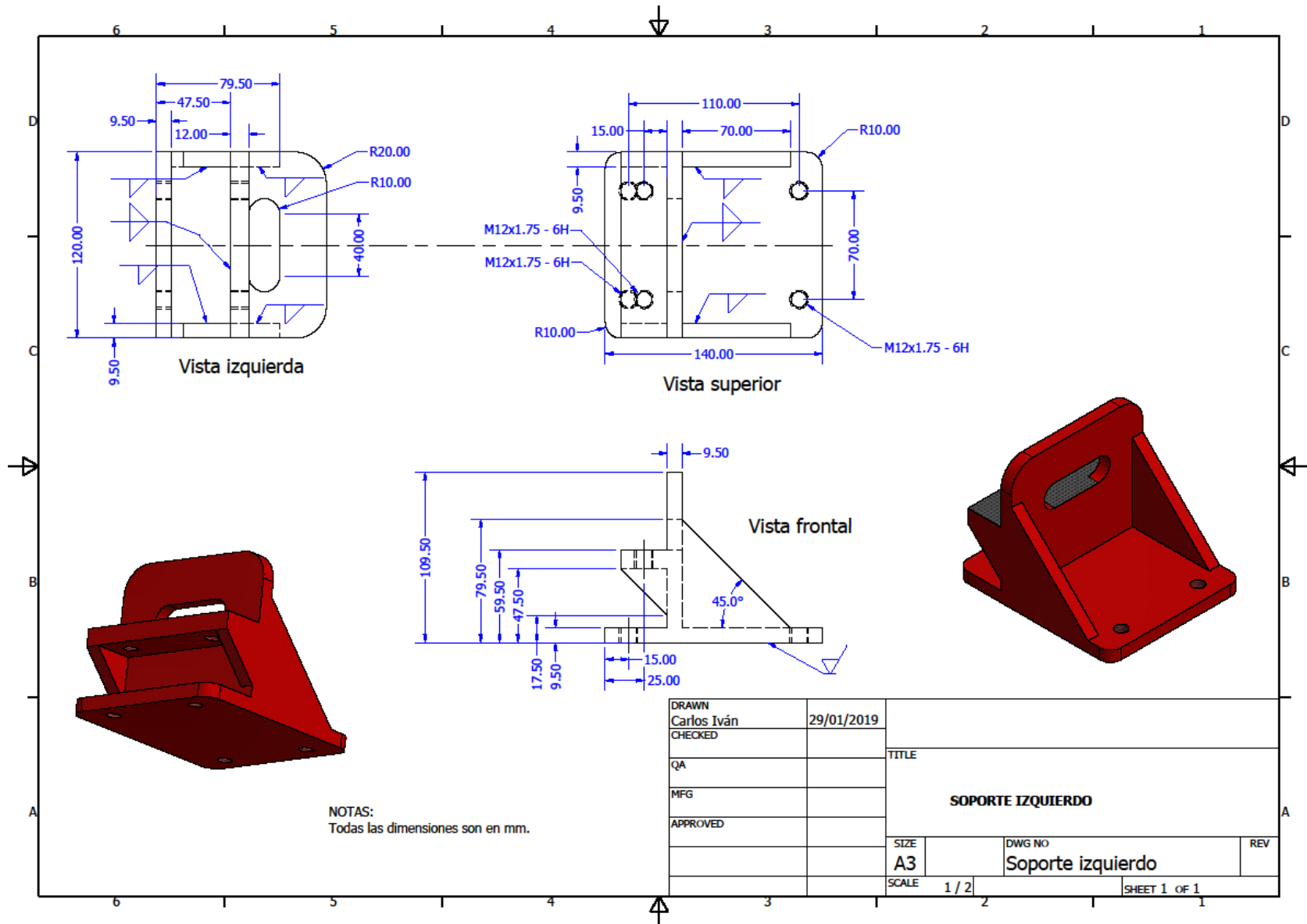


Figura A3. Soporte izquierdo, soporte semi - fijo.

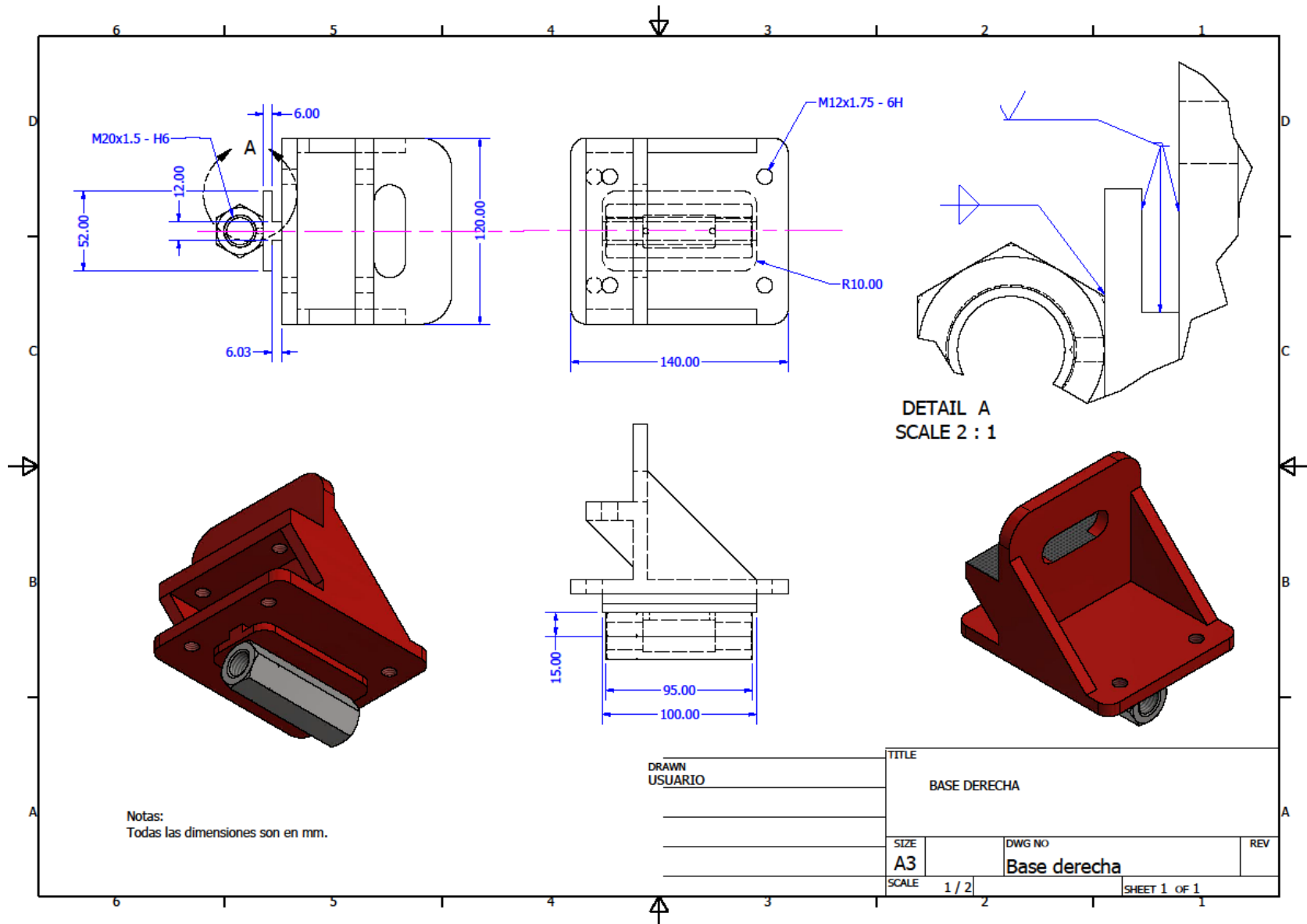


Figura A4. Soporte derecho, soporte móvil.

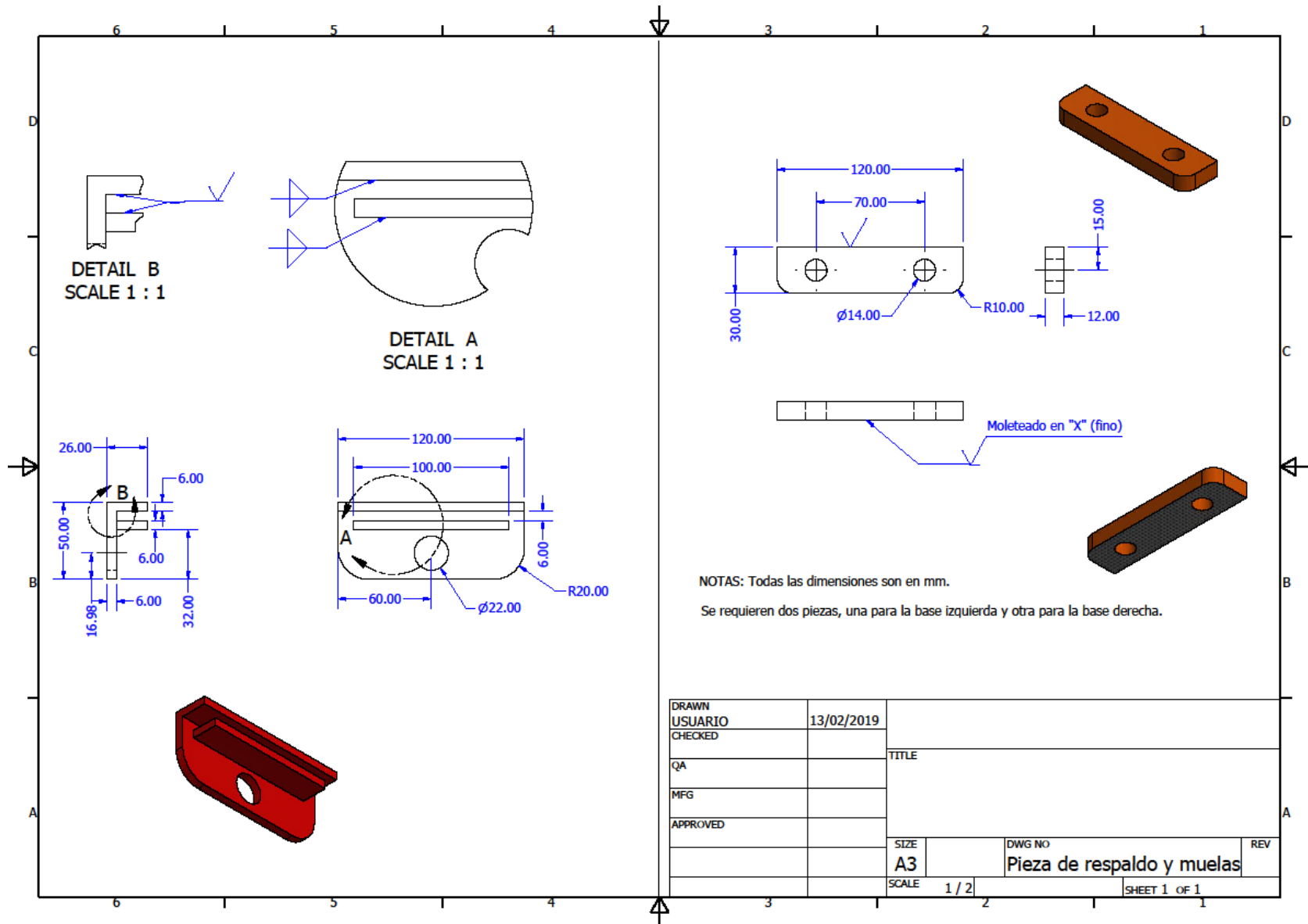


Figura A5. Pieza de respaldo y muelas superiores para los soportes.

Apéndice B. Obtención experimental de las propiedades elásticas de los materiales “La” y “Al”

La caracterización de un material que es sujeto de estudio, es de suma importancia para obtener sus propiedades particulares, ya que éstas pueden variar, aun cuando se trate de un mismo tipo de material; esto depende de las necesidades y condiciones en los procesos de manufactura.

Objetivo:

1. Determinar la deformación y el módulo de Young ($\varepsilon_x, E.$).

Introducción.

La prueba de flexión es una técnica que nos ayuda a determinar las deformaciones que sufren una barra en sus ejes longitudinal y transversal, dependiendo de la ubicación y orientación de las galgas. Para este caso, sólo se requiere conocer la deformación longitudinal, por lo que las galgas extensométricas se orientaron de forma longitudinal.

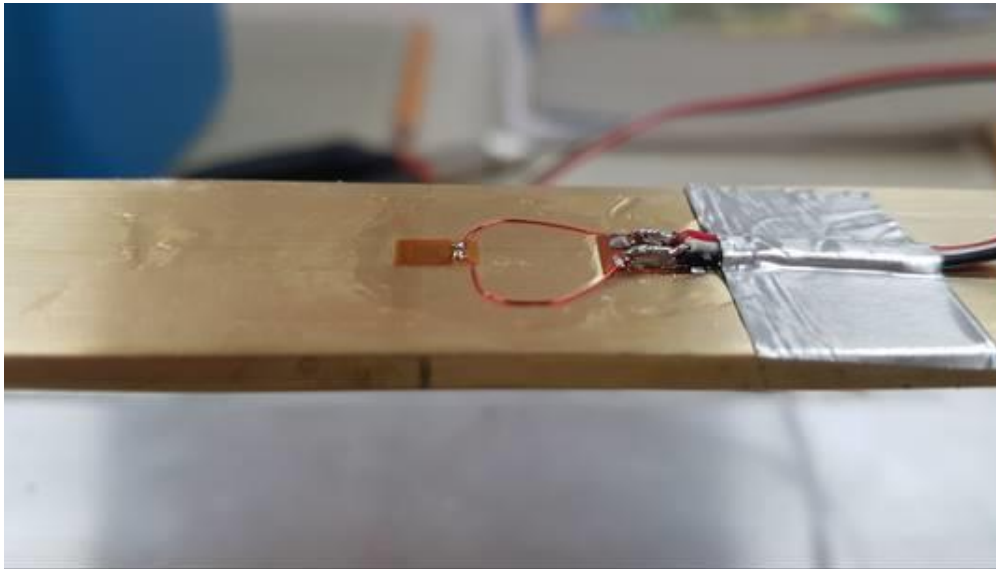


Figura B1. Orientación de la galga extensométrica.

Para medir las deformaciones en el material, se utilizó un equipo modelo P3 de la marca Micro – Measurements de 4 canales. Se utilizó utilizando la configuración de un cuarto de puente, en la siguiente figura se muestra la imagen.

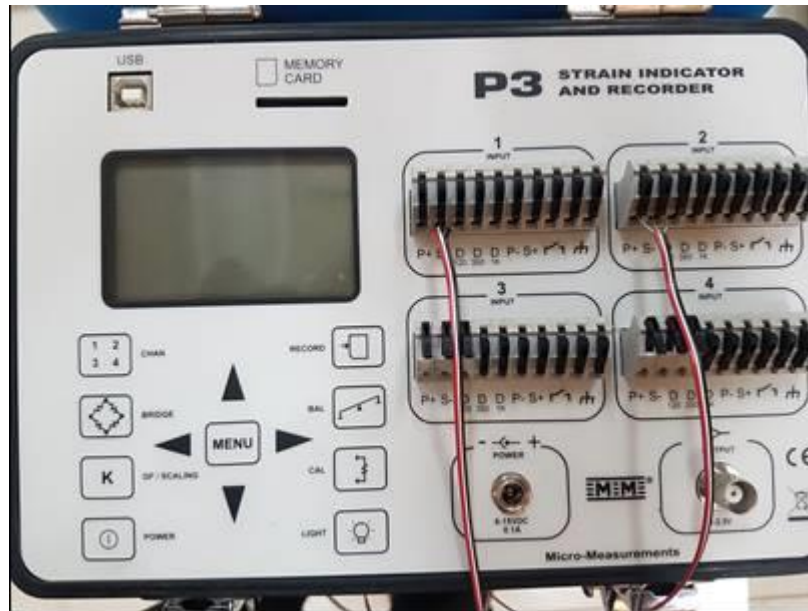


Figura B2. Equipo de medición modelo P3.

Desarrollo de la prueba:

La prueba se desarrolló bajo la siguiente secuencia:

1. Colocación de extensómetros en la probeta.

- Previo a la prueba de flexión, se utilizó la técnica para pegar los extensómetros en materiales metálicos. Una vez ubicados y pegados los extensómetros, se soldaron las terminales con los cables y se verificó continuidad y la resistencia del circuito.

2. Calibración del indicador de deformaciones.

- Primero se conectan los cables de la probeta con el equipo de medición para posteriormente calibrar el instrumento utilizando las perillas antes de cargarlo; así llevamos a cero cualquier deformación que registre, además se introduce el factor del extensómetro mismo que será utilizado por el equipo para proporcionar las deformaciones correspondientes.

3. Ubicación y carga de la probeta.

- Como la prueba que se realiza es de flexión se necesita ubicar la probeta de tal forma que pueda ser cargada en uno de sus extremos y así provocar flexión en la probeta como se indica en las siguientes figuras.

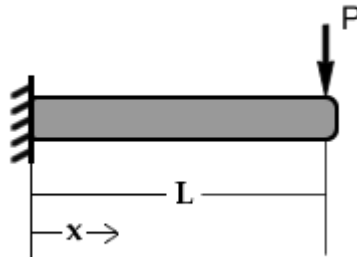


Figura B3. Ubicación de la carga, para realizar la prueba de flexión.

4. Recolección de lecturas Al.

- Los datos de deformación que se obtuvieron debido a diferentes cargas se muestra a continuación:

Tabla B1. Lectura de las micro deformaciones obtenidas para la barra de aluminio de 25.4 x 3.1 mm.

| Kg | Def G1 (micro) | Def G2 (micro) | Deformación (prom) |
|-----------|---------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| 0.1 | 112 | 118 | 0.000115 |
| 0.2 | 230 | 230 | 0.00023 |
| 0.3 | 343 | 344 | 0.0003435 |
| 0.4 | 460 | 460 | 0.00046 |
| 0.5 | 575 | 575 | 0.000575 |

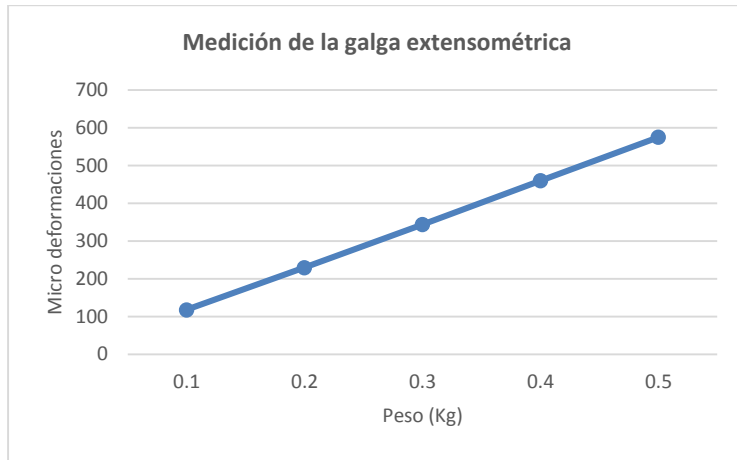


Figura B4. Micro deformaciones de la barra de aluminio de 25.4 x 3.1 mm.

Tabla B2. Lectura de las micro deformaciones obtenidas para la barra de aluminio de 25.4 x 4.7 mm.

| Kg | Def G1 (micro) | Def G2 (micro) | G prom |
|-----|----------------|----------------|-----------|
| 0.1 | 50 | 51 | 0.0000505 |
| 0.2 | 100 | 101 | 0.0001005 |
| 0.3 | 150 | 152 | 0.000151 |
| 0.4 | 205 | 201 | 0.000203 |
| 0.5 | 254 | 254 | 0.000254 |

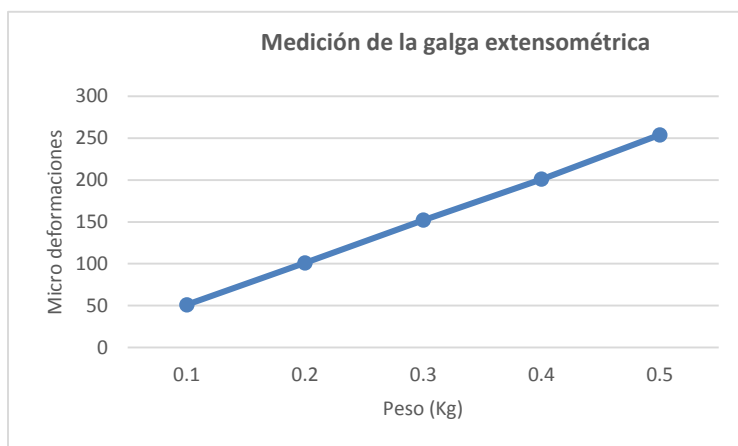


Figura B5. Micro deformaciones de la barra de aluminio de 25.4 x 4.7 mm.

Tabla B3. Lectura de las micro deformaciones obtenidas para la barra de latón (amarillo) 25.4 x 3.1 mm.

| Kg | G1 (micro) | G2 (micro) | G prom |
|-----------|-----------------------|-----------------------|---------------|
| 0.1 | 58 | 58 | 0.000058 |
| 0.2 | 125.5 | 126.5 | 0.000126 |
| 0.3 | 193 | 195 | 0.000194 |
| 0.4 | 261.5 | 264 | 0.00026275 |
| 0.5 | 330 | 333 | 0.0003315 |

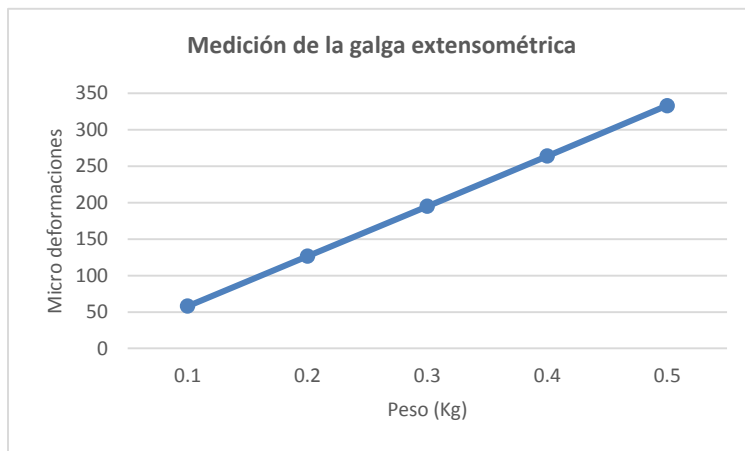


Figura B6. Micro deformaciones de la barra de latón de 25.4 x 3.1 mm.

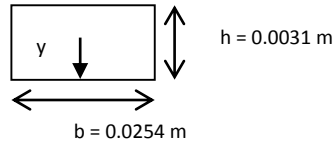
5. Realización de los cálculos

a) Determinación del módulo de elasticidad para la barra de aluminio (25.4 x 3.1 mm).

$$\sigma_z = \frac{M_x y}{I}$$

$$y = 1.55 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Sección transversal



$$I = \frac{1}{12} b h^3 = 6.3058 \times 10^{-11} \text{ m}^4$$

$$M_x = P * L = 0.5 * 9.81 * 0.32 = 1.5696 \text{ Nm}$$

$$\sigma_z = \frac{(1.5696 * 1.55 \times 10^{-3})}{6.3058 \times 10^{-11}} = 38.5818 \text{ MPa}$$

$$\sigma_z = \varepsilon_z E$$

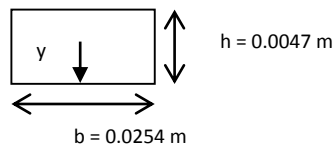
$$E = \frac{\sigma_z}{\varepsilon_z} = \frac{38.5818 \times 10^6}{575 \times 10^{-6}} = 67.12 \text{ GPa}$$

b) Determinación del módulo de elasticidad para la barra de aluminio (25.4 x 4.7 mm).

$$\sigma_z = \frac{M_x y}{I}$$

$$y = 2.35 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Sección transversal



$$I = \frac{1}{12} b h^3 = 2.1976 \times 10^{-11} \text{ m}^4$$

$$M_x = P * L = 0.5 * 9.81 * 0.32 = 1.5696 \text{ Nm}$$

$$\sigma_z = \frac{(1.5696 * 2.35 \times 10^{-3})}{2.1976 \times 10^{-11}} = 16.7845 \text{ MPa}$$

$$\sigma_z = \varepsilon_z E$$

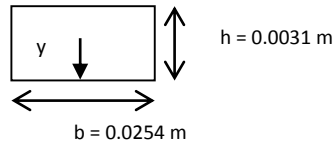
$$E = \frac{\sigma_z}{\varepsilon_z} = \frac{16.7845 \times 10^6}{254 \times 10^{-6}} = 66.08 \text{ GPa}$$

c) Determinación del módulo de elasticidad para la barra de latón (25.4 x 3.1 mm).

$$\sigma_z = \frac{M_x y}{I}$$

$$y = 1.55 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Sección transversal



$$I = \frac{1}{12} b h^3 = 6.3058 \times 10^{-11} \text{ m}^4$$

$$M_x = P * L = 0.5 * 9.81 * 0.28 = 1.3734 \text{ Nm}$$

$$\sigma_z = \frac{(1.3734 * 1.55 \times 10^{-3})}{6.3058 \times 10^{-11}} = 33.7591 \text{ MPa}$$

$$\sigma_z = \varepsilon_z E$$

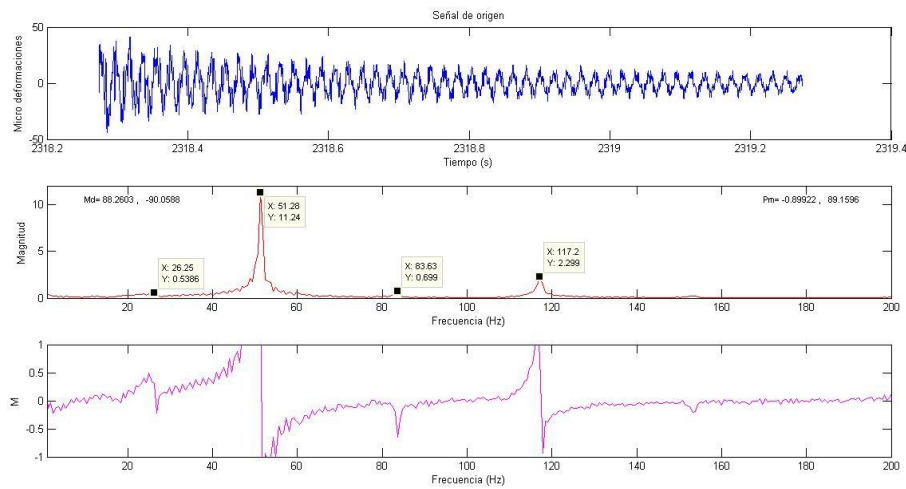
$$E = \frac{\sigma_z}{\varepsilon_z} = \frac{33.7591 \times 10^6}{331 \times 10^{-6}} = 101.84 \text{ GPa}$$

Apéndice C "Análisis del espectro de frecuencia"

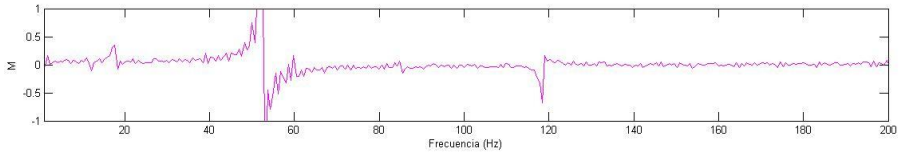
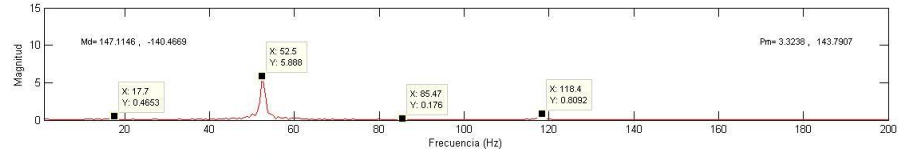
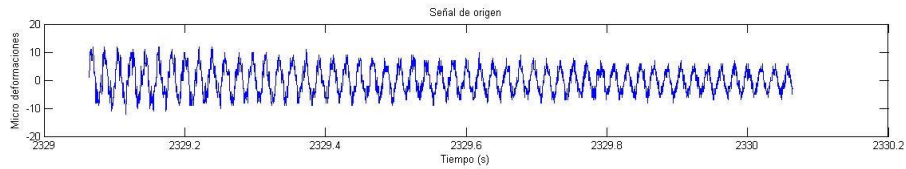
Tabla C1. Esfuerzos obtenidos para la probeta de latón, longitud de 900 mm.

| Hojas | G1 | G2 | Prom (tensión) | Prom (flexión) | Esfuerzo (Mpa) | Fuerza (Kg) |
|-------|--------|---------|----------------|----------------|----------------|-------------|
| H2 | 88.26 | -90.05 | -0.89 | 89.16 | -0.09 | -0.77 |
| H2a | 117.87 | -115.79 | 1.04 | 116.83 | 0.11 | 0.90 |
| H3 | 147.11 | -140.46 | 3.33 | 143.79 | 0.35 | 2.87 |
| H3a | 173.67 | -161.59 | 6.04 | 167.63 | 0.63 | 5.21 |
| H3b | 193.69 | -176.86 | 8.41 | 185.28 | 0.88 | 7.25 |
| H4 | 212.82 | -190.53 | 11.15 | 201.68 | 1.17 | 9.60 |
| H4a | 223.08 | -196.95 | 13.07 | 210.02 | 1.37 | 11.26 |
| H5 | 239.04 | -207.15 | 15.95 | 223.10 | 1.67 | 13.74 |
| H5a | 258.55 | -217.76 | 20.40 | 238.16 | 2.14 | 17.58 |
| H6 | 277.70 | -226.11 | 25.80 | 251.91 | 2.71 | 22.23 |
| H6a | 291.60 | -230.21 | 30.70 | 260.91 | 3.22 | 26.45 |
| H6b | 309.62 | -233.16 | 38.23 | 271.39 | 4.01 | 32.95 |
| H7 | 313.30 | -233.40 | 39.95 | 273.35 | 4.19 | 34.43 |
| H8 | 328.63 | -232.59 | 48.02 | 280.61 | 5.04 | 41.38 |
| H8a | 340.27 | -230.46 | 54.91 | 285.37 | 5.77 | 47.32 |
| H8b | 352.10 | -226.90 | 62.60 | 289.50 | 6.57 | 53.95 |
| H9 | 375.01 | -216.88 | 79.07 | 295.95 | 8.30 | 68.14 |
| H10 | 401.00 | -201.20 | 99.90 | 301.10 | 10.49 | 86.10 |

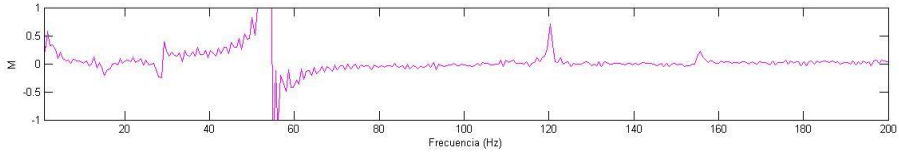
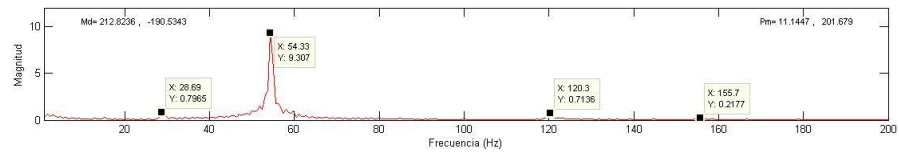
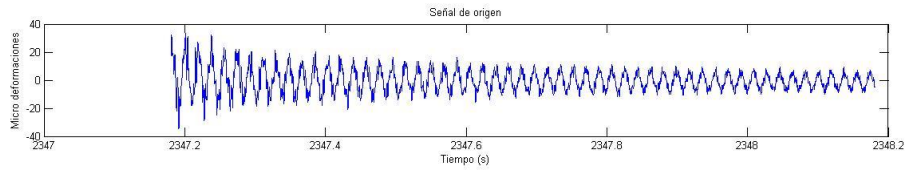
En la Figura C1, se muestran los espectros de frecuencia correspondientes los ensayos de la probeta de latón, longitud 900mm.



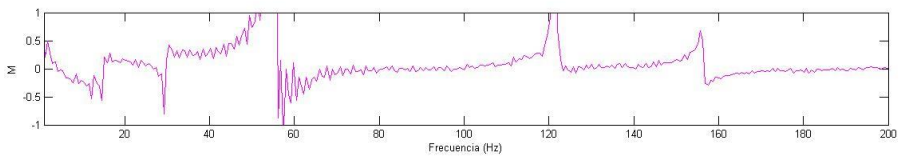
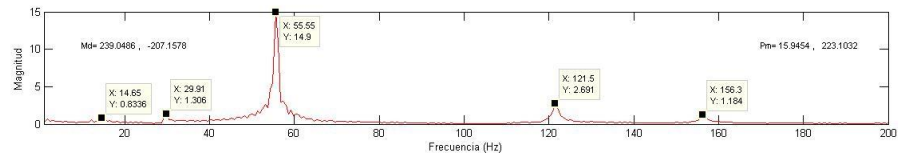
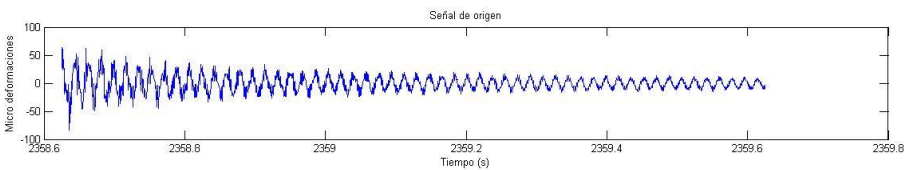
a) H2



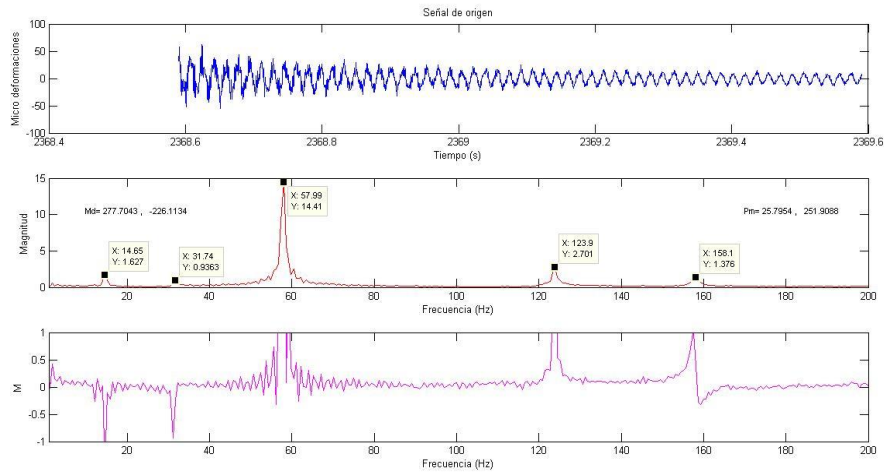
b) H3



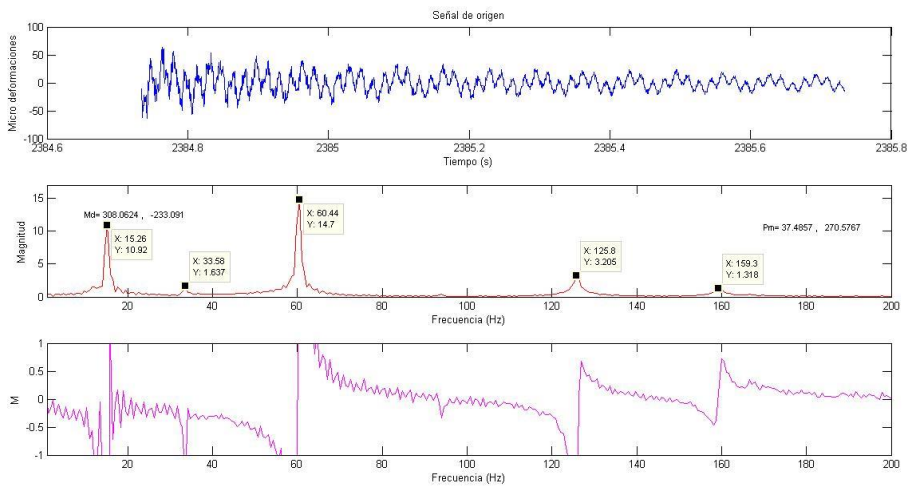
c) H4



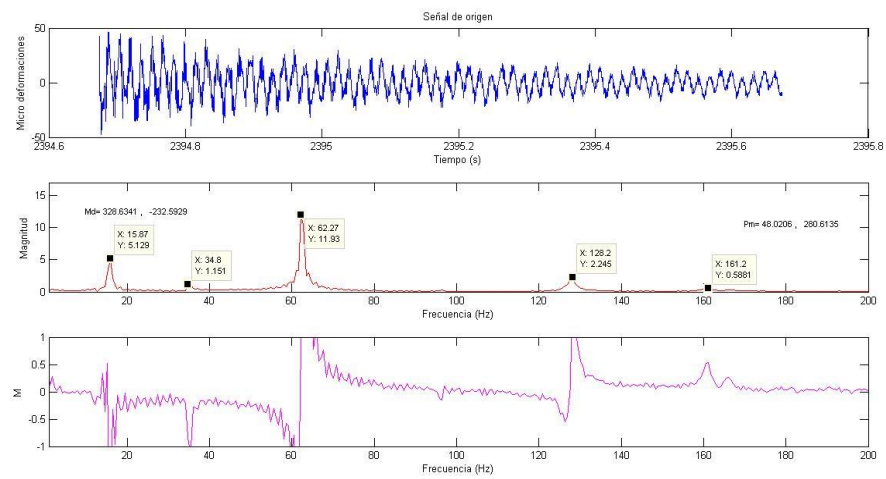
d) H5



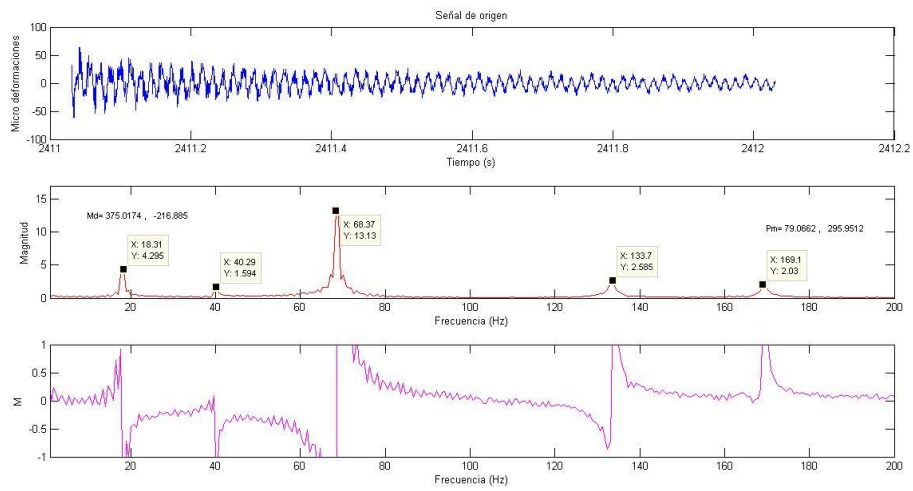
e) H6



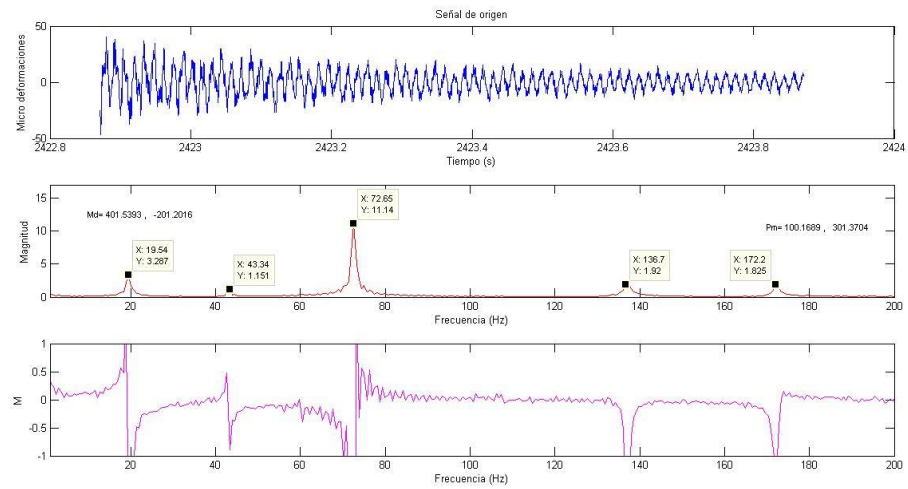
f) H7



g) H8



h) H9



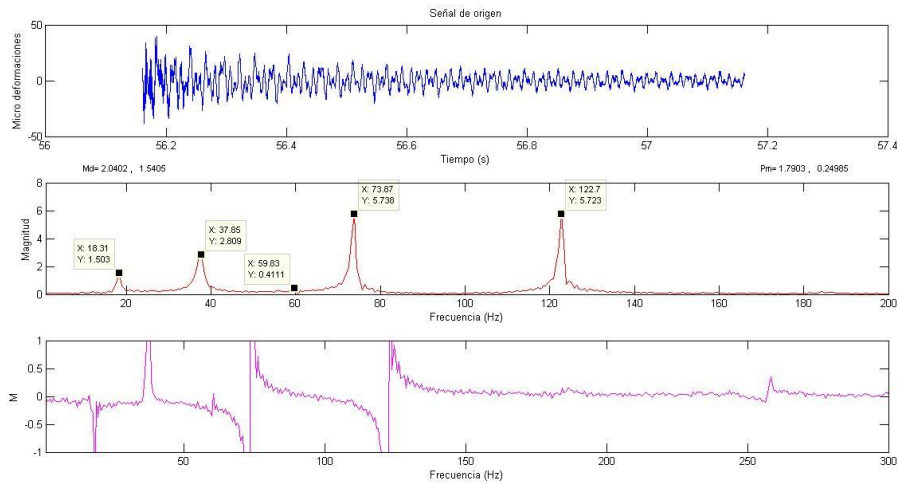
i) H10

Figura C1. Espectros de frecuencia de la probeta de latón, longitud 900mm.

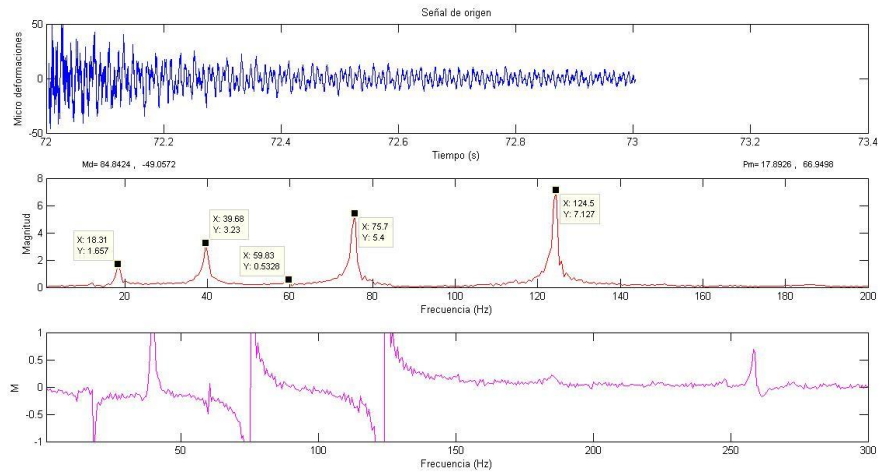
Tabla C2. Esfuerzos obtenidos para la probeta de latón, longitud de 800 mm

| Hojas | G1 | G2 | Prom (tensión) | Prom (flexión) | Esfuerzo (Mpa) | Fuerza (Kg) |
|-------|--------|--------|----------------|----------------|----------------|-------------|
| H1 | 2.04 | 1.54 | 1.79 | 0.25 | 0.19 | 1.54 |
| H1a | 3.93 | 0.15 | 2.04 | 1.89 | 0.21 | 1.76 |
| H2 | 84.84 | -49.05 | 17.90 | 66.95 | 1.88 | 15.42 |
| H3 | 167.52 | -80.03 | 43.75 | 123.78 | 4.59 | 37.70 |
| H3a | 214.66 | -84.59 | 65.04 | 149.63 | 6.83 | 56.05 |
| H4 | 259.46 | -77.72 | 90.87 | 168.59 | 9.54 | 78.31 |
| H4a | 308.27 | -59.60 | 124.34 | 183.94 | 13.06 | 107.15 |
| H5 | 351.06 | -35.81 | 157.63 | 193.44 | 16.55 | 135.84 |
| H6 | 380.00 | -14.87 | 182.57 | 197.44 | 19.17 | 157.34 |
| H7 | 407.04 | 5.58 | 206.31 | 200.73 | 21.66 | 177.80 |

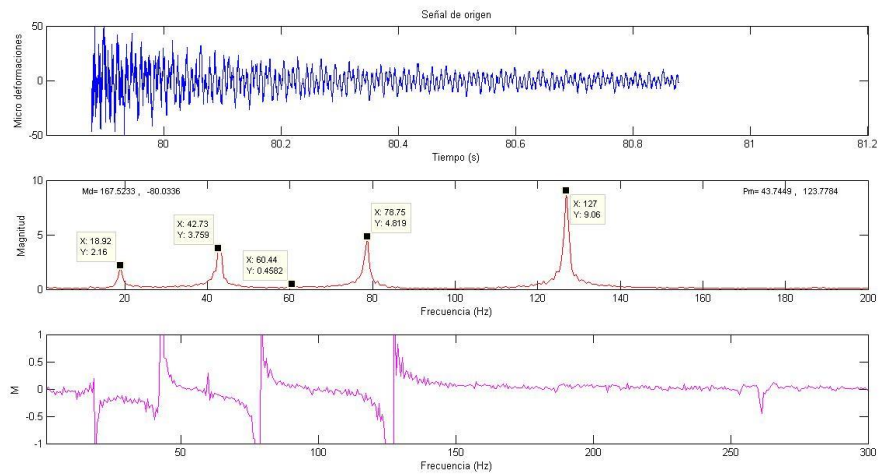
En la Figura C2, se muestran los espectros de frecuencia correspondientes los ensayos de la probeta de latón, longitud 800mm.



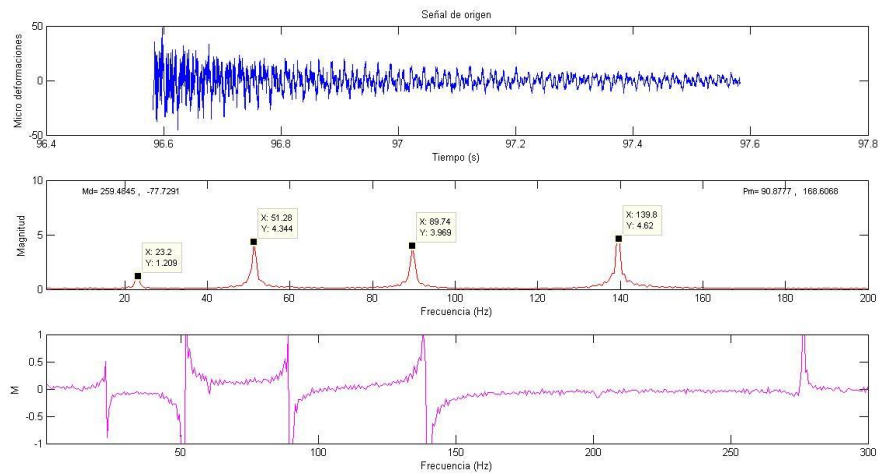
a) H1



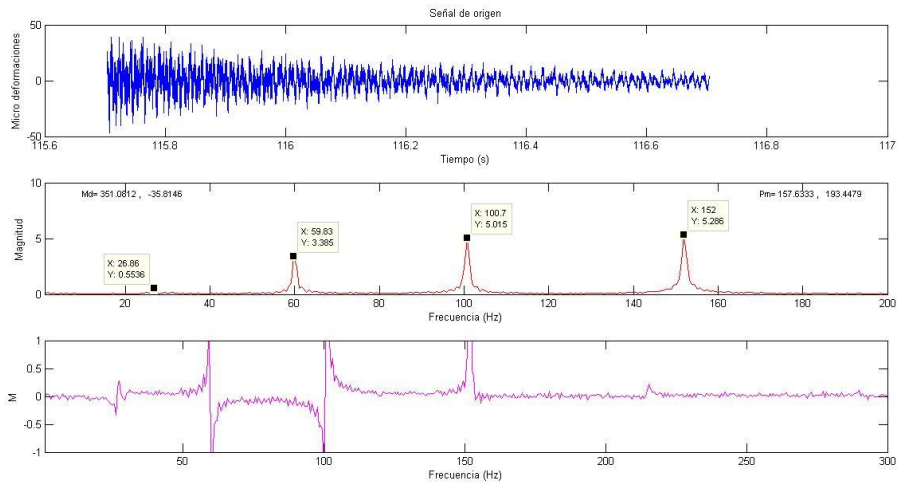
b) H2



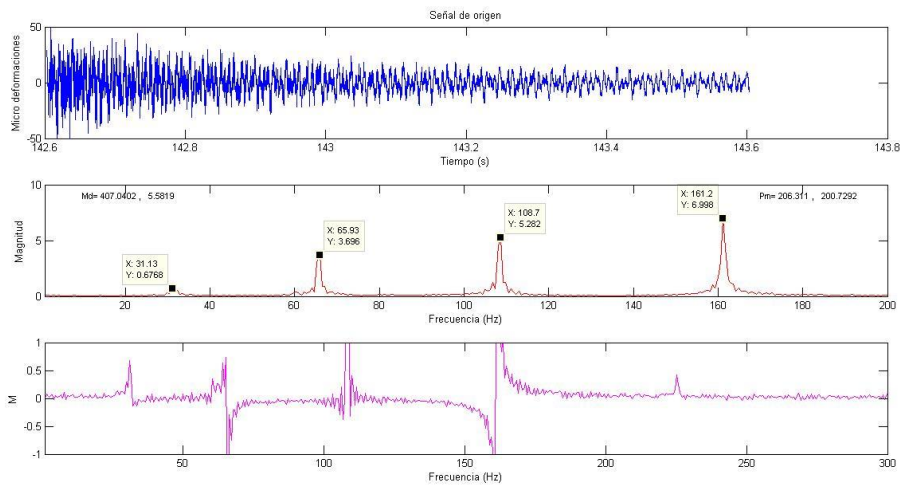
c) H3



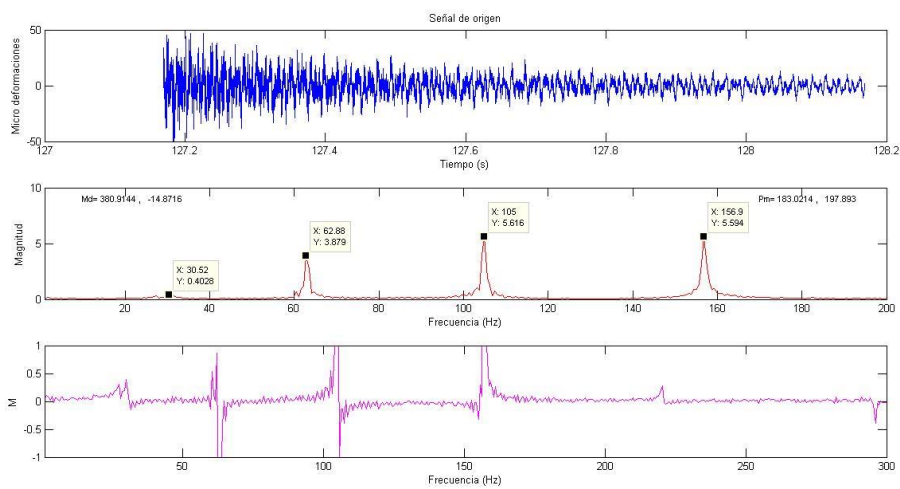
d) H4



e) H5



f) H6



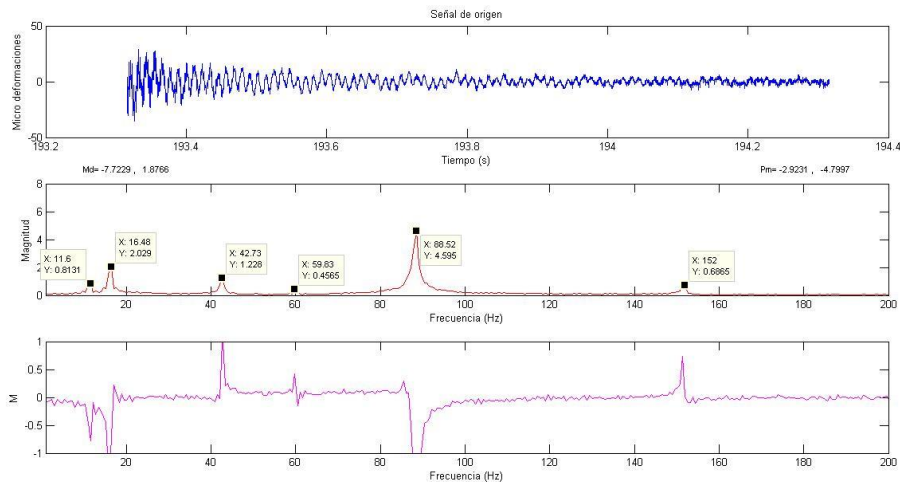
g) H7

Figura C2. Espectros de frecuencia de la probeta de latón, longitud 800mm

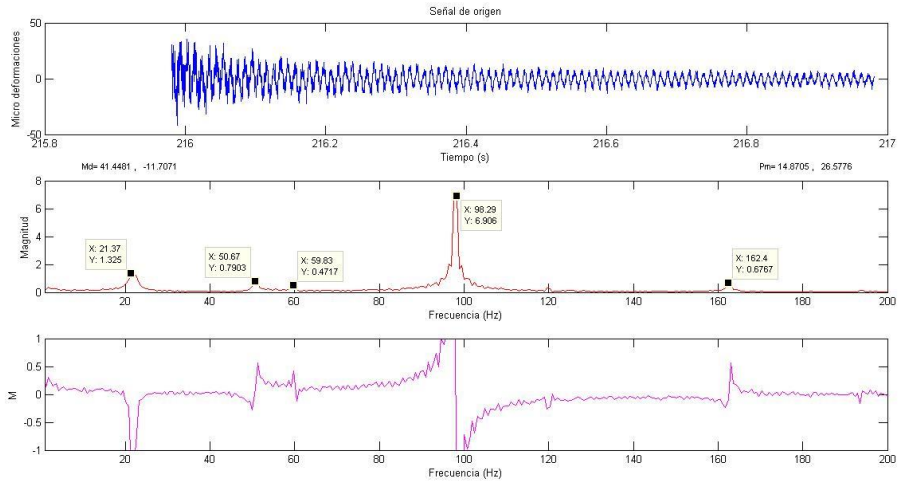
Tabla C3. Esfuerzos obtenidos para la probeta de latón, longitud de 680 mm

| | G1 | G2 | Prom (tensión) | Prom (flexión) | Esfuerzo (Mpa) | Fuerza (Kg) |
|-----|--------|--------|----------------|----------------|----------------|-------------|
| H1a | -1.14 | -0.54 | -0.84 | -0.30 | -0.09 | -0.72 |
| H2 | 7.74 | -1.52 | 3.11 | 4.63 | 0.33 | 2.68 |
| H2a | 15.94 | -2.09 | 6.93 | 9.02 | 0.73 | 5.97 |
| H3 | 41.37 | -11.70 | 14.84 | 26.54 | 1.56 | 12.79 |
| H3a | 68.78 | -21.04 | 23.87 | 44.91 | 2.51 | 20.57 |
| H4 | 96.69 | -29.98 | 33.36 | 63.34 | 3.50 | 28.75 |
| H4a | 127.11 | -36.65 | 45.23 | 81.88 | 4.75 | 38.98 |
| H5 | 163.11 | -40.32 | 61.40 | 101.72 | 6.45 | 52.91 |
| H5a | 197.98 | -36.52 | 80.73 | 117.25 | 8.48 | 69.57 |
| H6 | 227.18 | -28.19 | 99.50 | 127.69 | 10.45 | 85.75 |
| H6a | 269.77 | -9.87 | 129.95 | 139.82 | 13.64 | 111.99 |
| H7 | 305.55 | 11.61 | 158.58 | 146.97 | 16.65 | 136.67 |
| H7a | 344.34 | 39.71 | 192.03 | 152.32 | 20.16 | 165.49 |
| H8 | 374.51 | 63.96 | 219.24 | 155.28 | 23.02 | 188.94 |
| H9 | 401.47 | 86.76 | 244.12 | 157.36 | 25.63 | 210.38 |

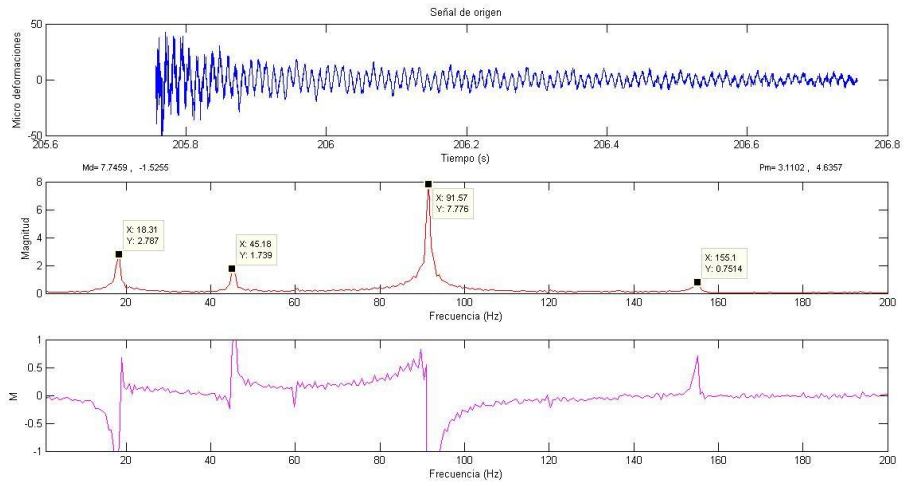
En la Figura C3, se muestran los espectros de frecuencia correspondientes los ensayos de la probeta de latón, longitud 680mm.



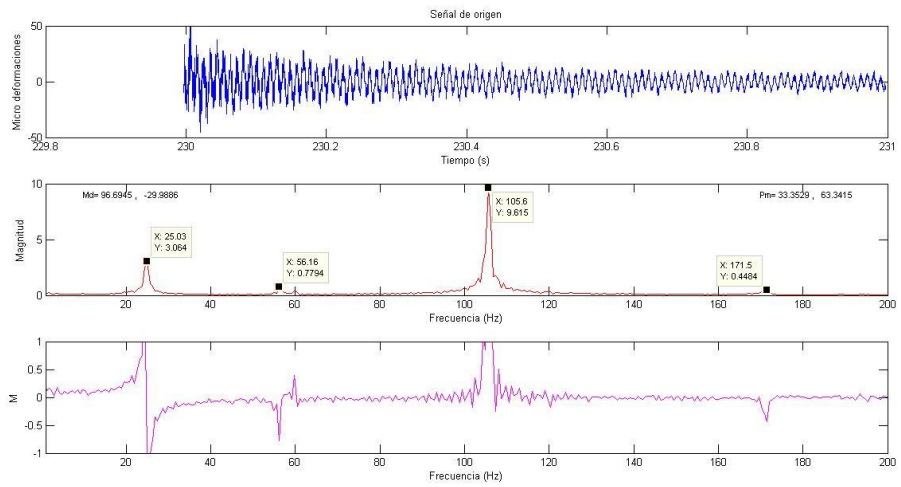
a) H1



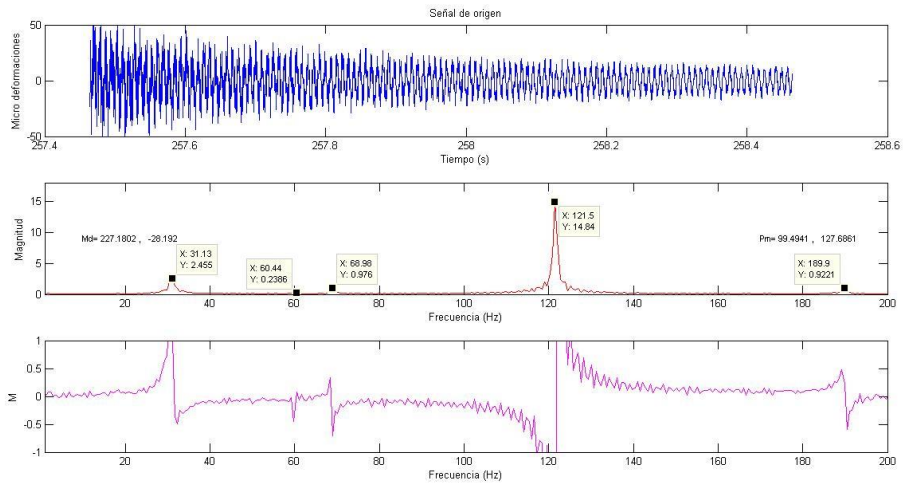
b) H2



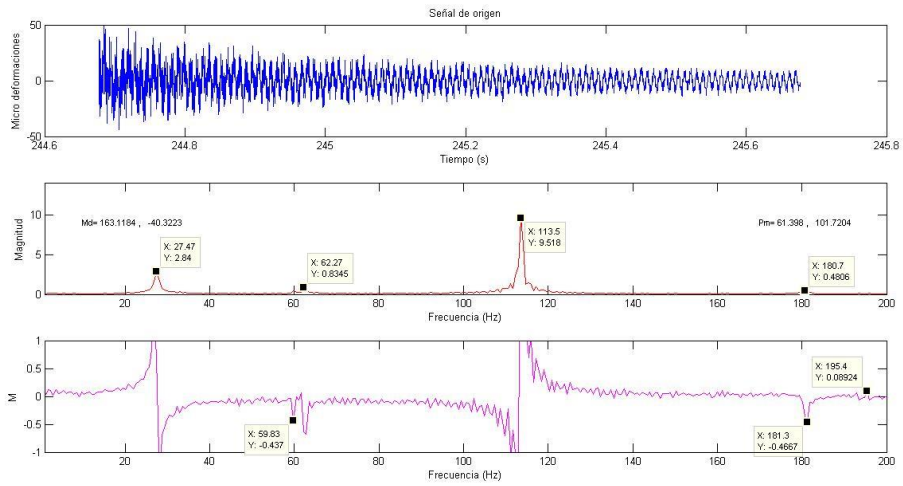
c) H3



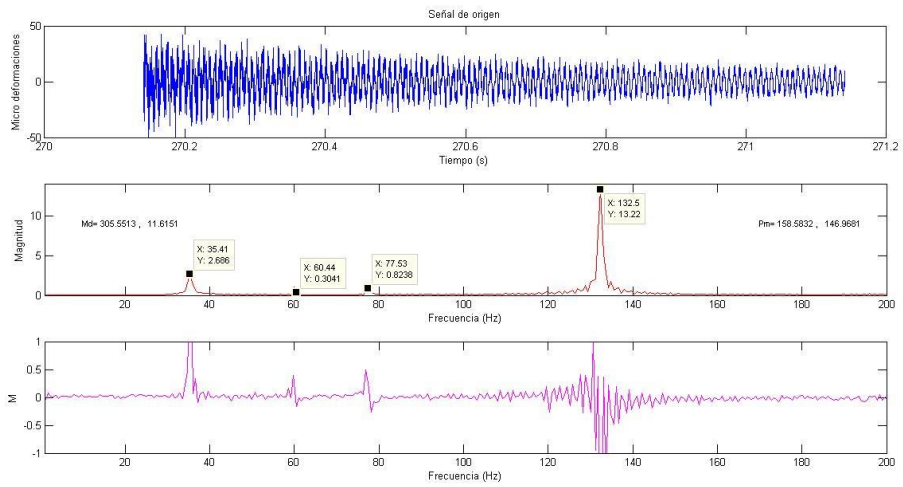
d) H4



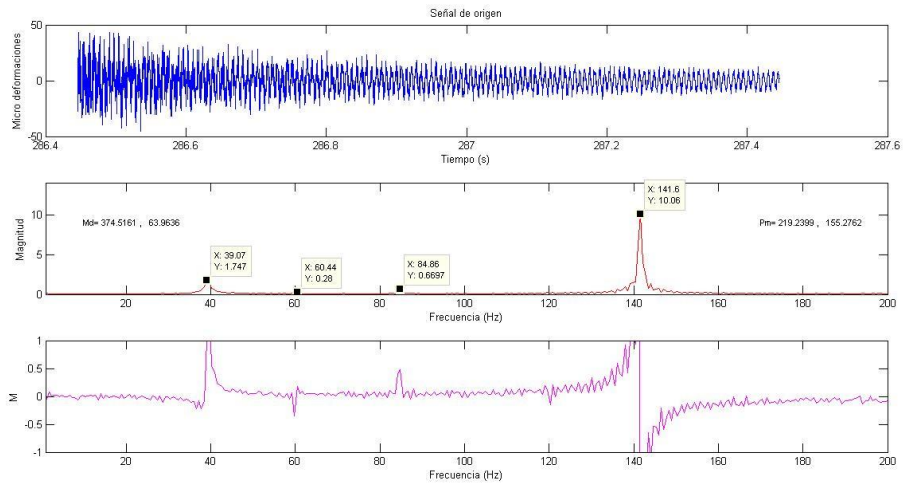
e) H5



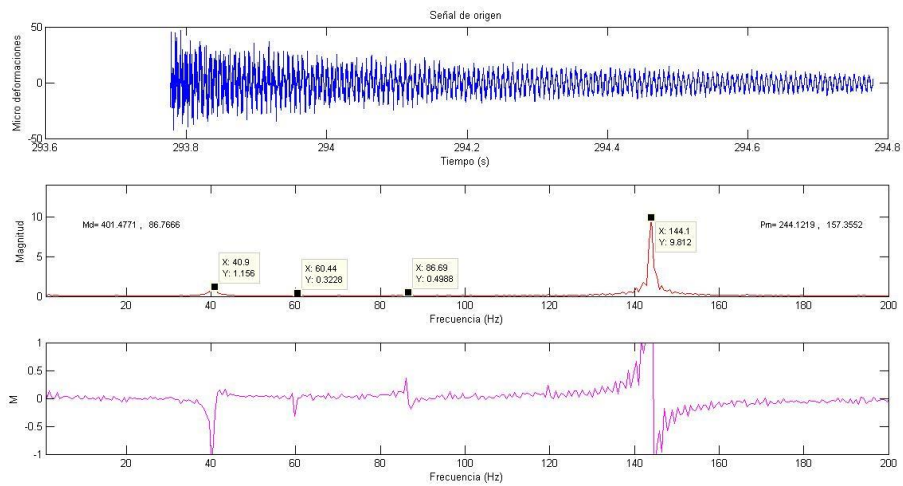
f) H6



g) H7



h) H8



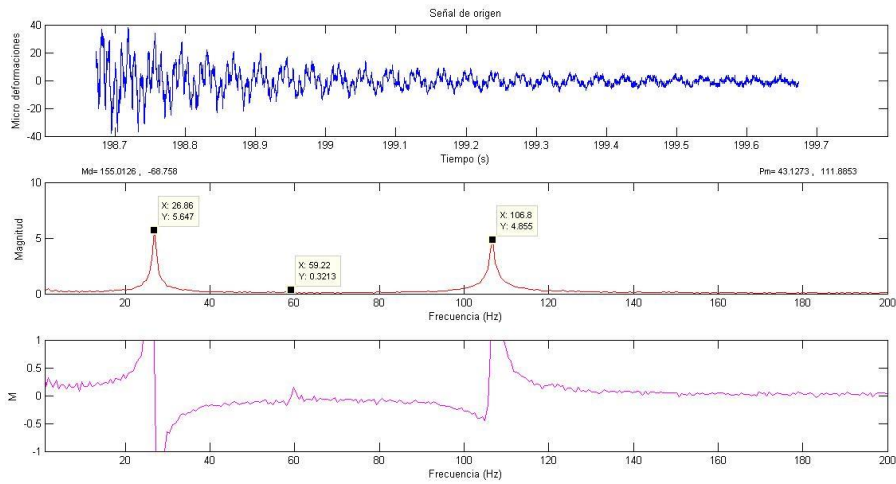
i) H9

Figura C3. Espectros de frecuencia de la probeta de latón, longitud 680mm

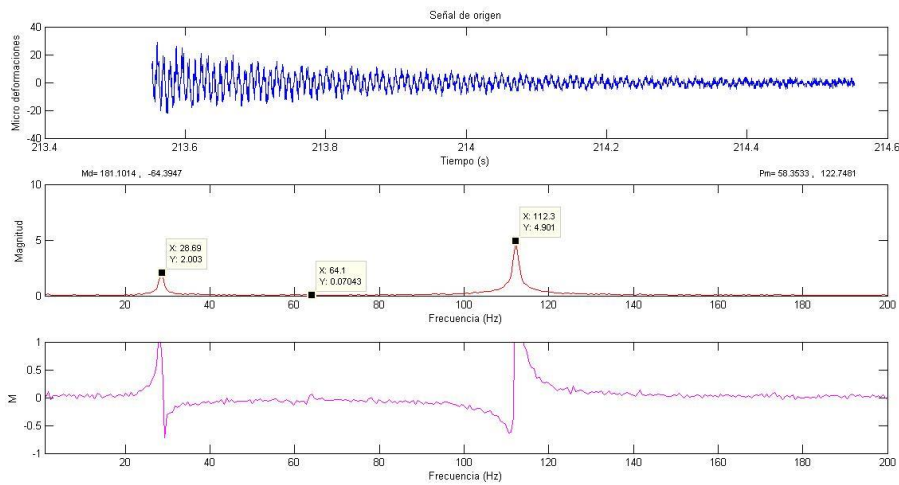
Tabla C4. Esfuerzos obtenidos para la probeta de aluminio, longitud de 900 mm

| Hojas | G1 | G2 | Prom (tensión) | Prom (flexión) | Esfuerzo (Mpa) | Fuerza (Kg) |
|-------|--------|--------|----------------|----------------|----------------|-------------|
| H1 | 0.10 | 4.19 | 2.15 | -2.05 | 0.15 | 1.23 |
| H1a | 100.11 | -57.65 | 21.23 | 78.88 | 1.49 | 12.20 |
| H2 | 155.01 | -68.75 | 43.13 | 111.88 | 3.02 | 24.78 |
| H3 | 181.10 | -64.39 | 58.36 | 122.75 | 4.08 | 33.53 |
| H4 | 200.95 | -56.27 | 72.34 | 128.61 | 5.06 | 41.56 |

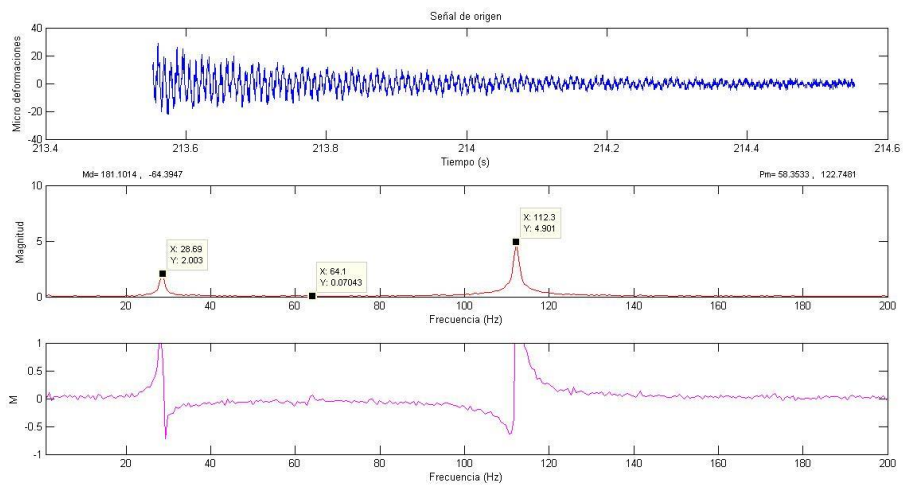
En la Figura C4, se muestran los espectros de frecuencia correspondientes los ensayos de la probeta de aluminio, longitud de 900mm.



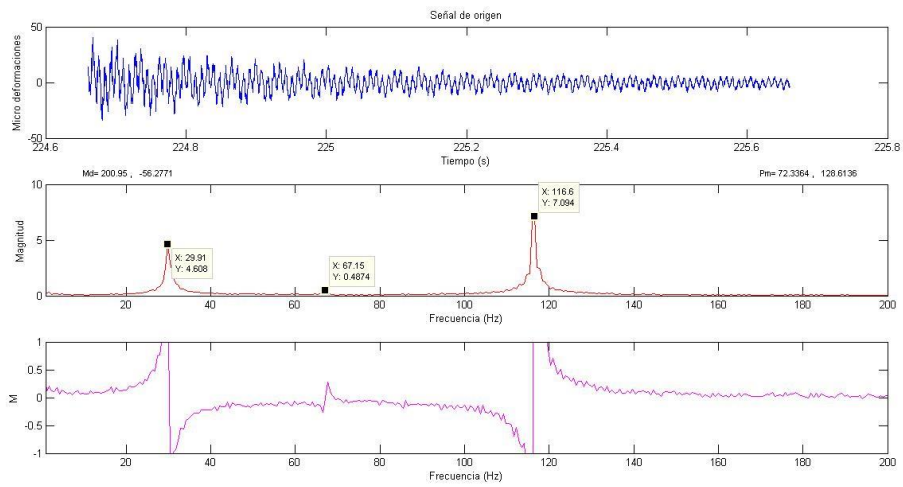
a) H1



b) H2



c) H3



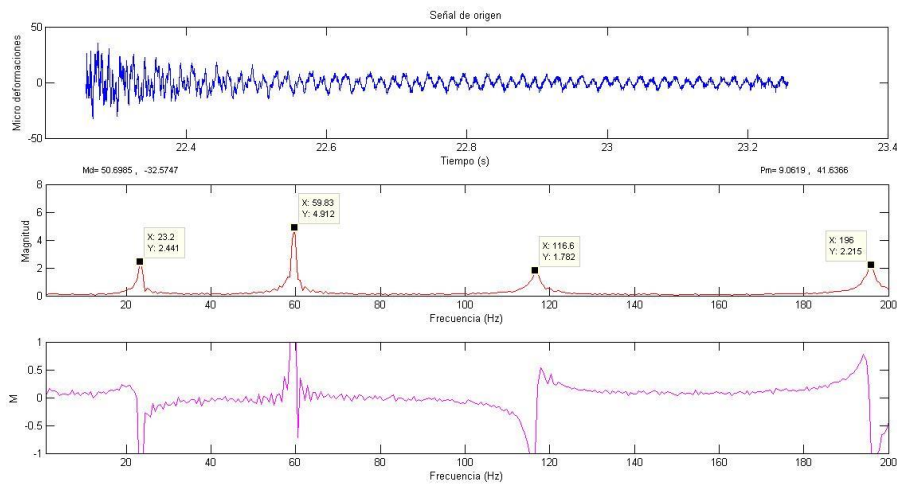
d) H4

Figura C4. Espectros de frecuencia de la probeta de aluminio, longitud 900mm

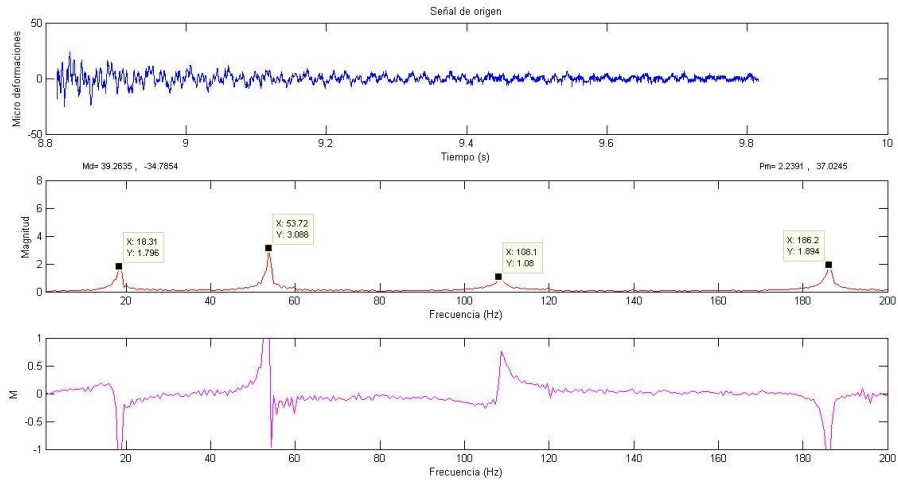
Tabla C5. Esfuerzos obtenidos para la probeta de aluminio, longitud de 800 mm

| Grados | G1 | G2 | Prom (tensión) | Prom (flexión) | Esfuerzo (Mpa) | Fuerza (Kg) |
|--------|--------|--------|----------------|----------------|----------------|-------------|
| H1 | 39.26 | -34.78 | 2.24 | 37.02 | 0.16 | 1.29 |
| H1a | 40.44 | -36.03 | 2.21 | 38.24 | 0.15 | 1.27 |
| H2 | 50.69 | -32.57 | 9.06 | 41.63 | 0.63 | 5.21 |
| H2a | 88.05 | -37.66 | 25.20 | 62.86 | 1.76 | 14.48 |
| H3 | 109.28 | -29.91 | 39.69 | 69.60 | 2.78 | 22.80 |
| H4 | 140.07 | -14.94 | 62.57 | 77.51 | 4.38 | 35.95 |
| H4a | 170.06 | 6.05 | 88.06 | 82.00 | 6.16 | 50.59 |
| H5 | 204.50 | 36.70 | 120.60 | 83.90 | 8.44 | 69.29 |
| H6 | 224.37 | 56.11 | 140.24 | 84.13 | 9.82 | 80.57 |

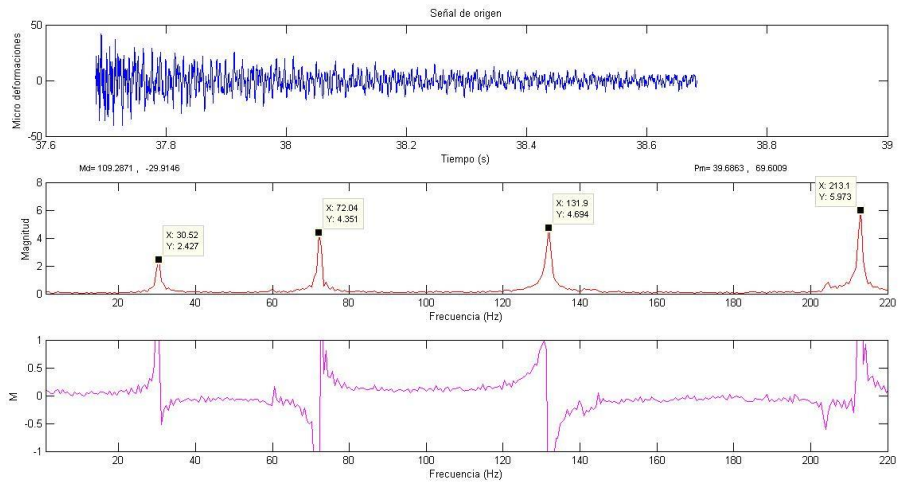
En la Figura C5, se muestran los espectros de frecuencia correspondientes los ensayos de la probeta de aluminio, longitud de 800mm.



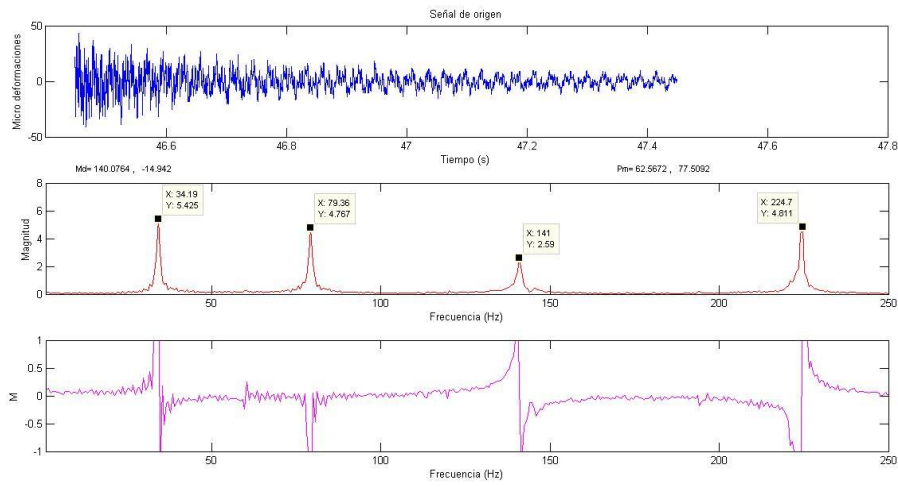
a) H1



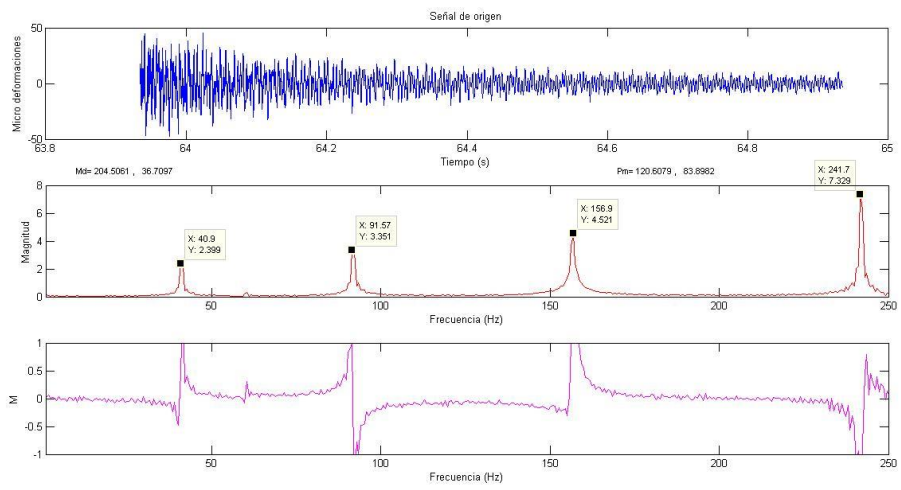
b) H2



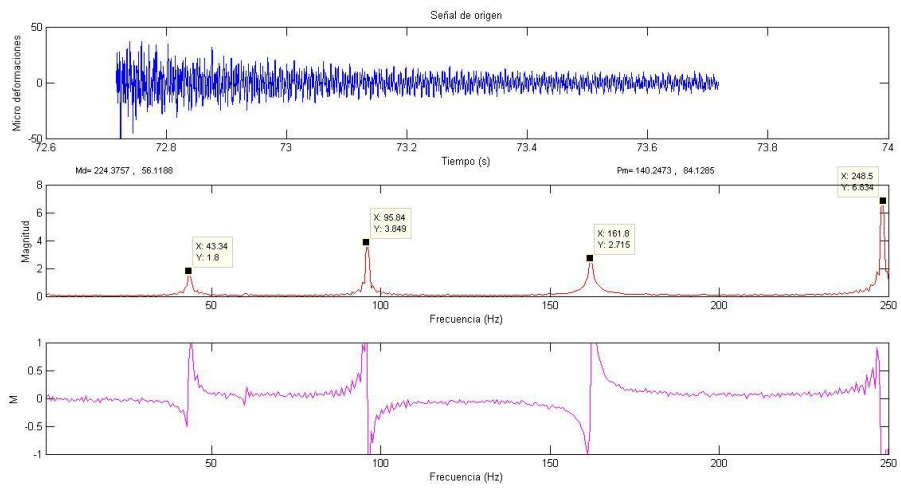
c) H3



d) H4



e) H5



f) H6

Figura C5. Espectros de frecuencia de la probeta de aluminio, longitud 800mm

Referencias

- A., I. (2014). Seismic assessment of guyed towers: A case study combining field measurements and pushover analysis. *HBRC, Structure and Metallic Institute, Egypt*, 7.
- Acosta Flores, M., Jiménez López, E., & Rodríguez Ramirez, J. (2016). Modelo para el análisis experimental de esfuerzos intralaminares en materiales compuestos laminados sujetos a carga axial. *Dyna*, 216-222.
- Albizu I, M. A. (2011). A method for the sag-tension calculation en electrical overhead lines. *ResearchGate*, 11.
- Baker Catherine, B. J. (2013). Sag-Tension Calculation Program for Wood Pole Overhead Lines. *ResearchGate*, 7.
- Balbastro G.C., S. V. (2012). Uso deCFDparaestudiodepresionesdelvientoencubiertascurvasaisladas. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 6.
- Barrera Domínguez Hector Antonio, C. V. (2008). ESTUDIO DE UN AMORTIGUADOR ESPACIOADOR DE VIBRACIÓN DEL TIPO "cable doble" PARA LINEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA. *Memorias del 14 Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, 12.
- Beer, F., Johnston, E., DeWolf, J., & Mazurek, D. (2009). *Mecánica de Materiales*. McGraw Hill.
- Bottega, W. J. (2006). *Engineering Vibrations*. CRC Taylor & Francis.
- Carrillo Baeza José G., A. U. (2012). Diseño y construcción de un microtensómetro universal automatizado. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 13.
- Case, J., Chilver, L., & Ross, C. (1999). *Strength of Materials and Structures*. ARNOLD.
- Chapra, S. C. (2012). *Applied Numerical Methods with MATLAB*. McGraw Hill.
- Chen , X., Devanathan, R., & Meng Fong, A. (2002). *ADVANCED AUTOMATION TECHNIQUES IN ADAPTATIVE MATERIAL PROCESSING*. World Scientific.
- Cheng Zhong Qu, X. W. (2012). Damage Identification for Transmission Towers Basad on HHT. *ScienceDirect*, 5.
- Chudnovsky, B. (2013). *Electrical Power Transmisión and Distribution*. CRC Press.

- Comisión Federal de Electricidad. (2013). *CONSTRUCCIÓN DE LÍNEAS AÉREAS DE ALTA TENSIÓN DE 69 kV HASTA 138 kV (CFE DCCLAAT1)*. CFE.
- Comisión Federal de Electricidad. (2014). *DISEÑO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN AÉREAS (CFE DCDLTA01)*. CFE.
- Comisión Federal de Electricidad. (2016). *TORRES PARA LÍNEAS DE TRANSMISIÓN Y SUBTRANSMISIÓN (CFE J1000-50)*. CFE.
- Comisión Federal de Electricidad. (2014). *CONSTRUCCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN AÉREAS (CFE DCCLTA01)*. CFE.
- Cortés, F. R. (2012). *MATLAB Aplicado a Robótica y Mecatrónica*. Alfaomega.
- Doohyun Kyung, J. (2015). Load-carrying behavior of transmission-tower connected foundations subjected to different load directions. *ScienceDirect*, 13.
- Espejo Edgar, M. J. (2007). Caracterización de modos de falla típicos en cables de transmisión mecánica. *INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN*, 8.
- Grover, G. K. (1972). *Mechanical Vibrations*. N.C. Jain.
- Hibbeler, R. C. (2010). *Dinámica, Ingeniería Mecánica*. Prentice Hall.
- Hibbeler, R. C. (2012). *Structural Analysis*. PEARSON.
- Holm Krarup Niels, Z. Z. (2017). Active Modal Control of Rain-Wind Induce Vibration of Stay Cables. *ScienceDirect*, 6.
- Inman, D. J. (2007). *Engineering Vibration*. Prentice Hall.
- J.L. Manzanares Japón, I. H. (2013). Relación entre el parámetro flecha-luz y la carga crítica de pandeo lateral para arcos parabólicos biempotrados bajo diferentes hipótesis de cálculo. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño de Ingeniería*, 11.
- Jacques Hamian, Y. B. (2018). Sag-Tension Calculations: Refinements and Enhancements Made by Trimble Energy Solutions. *ResearchGate*.
- Jimenez Octavio J.R., S. M. (2015). Aplicación de un mallado móvil de elementos finitos a la interacción dinámica catenaria-pantógrafo. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 7.
- Kalpakjian, S., Schmid, S., & Musa, H. (2009). *MANUFACTURING ENGINEERING AND TECHNOLOGY*. Prentice Hall.

- Katarzyna Mazur, M. W. (2017). Secure and Time-Aware Communication of Wireless Sensors Monitoring Overhead Transmission Lines. *MDPI*, 35.
- Krzysztof Fedor, I. C. (2016). Structural analysis of tension tower subjected to exceptional loads during installation of line conductors. *ScienceDirect*, 8.
- Kussul Ernst, B. T. (2006). Scaling down of microequipment parameters. *SCIENCE@DIRECT*, 211-222.
- Laya Pereira, A, M. O. (2007). Determinación experimental de los parámetros dinámicos del modelo a escala del puente de Vega de Asa. *8vo Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, 8.
- Machado, S. d. (2012). Vibraciones Eólicas en Líneas de Transmisión. *ResearchGate*.
- Marta, K. H. (2017). Influence of motion parameters on incidence of resonant track rope vibrations in a bi-cable ropeway system. *ScienceDirect*, 6.
- Michal Wydra, P. K. (2016). Power System State Estimation Accuracy Enhancement Using Temperature Measurements of Overhead Line Conductors. *METROLOGY AND MEASUREMENT SYSTEMS*.
- Michal Wydra, P. K. (2018). Overhead Transmission Line Sag Estimation Using a Simple Optomechanical System with Chirped Fiber Bragg Gratings. Part 1: Preliminary Measurements. *MDPI*.
- Moreno Báez Miguel A., J. R. (2010). Determinación Experimental de la Rigidez Equivalente para un cable OPGW. *MEMORIAS DEL XVI CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM*, 9.
- Mott, R. L. (2009). *Resistencia de Materiales*. Prentice Hall.
- Myszka, D. H. (2012). *Máquinas y Mecanismos*. PEARSON.
- Nieto F., J. J. (2013). Aplicación de métodos computacionales en la evaluación de la respuesta aeroelástica de puentes soportados por cables. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño de Ingeniería*, 9.
- Rafael, C. B. (2014). Determinación de límites de transmisión en sistemas eléctricos de potencia. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 16.
- Repetto C.E., R. A. (2014). Medición de frecuencias de resonancia, factor de pérdida y módulo de Young dinámico de varillas empotradas. *Revistas Brasileira de Ensino de Física*, 9.
- S. Graham, K. (2000). *Fundamentals of Mechanical Vibrations*. McGraw Hill.
- Shetty, D., & Kolk, R. (s.f.). *Mechatronics System Design*. CENGAGE Learning.

Szymon Spodzieja, I. C. (2016). Influence of anchoring cables position on load carrying capacity of tension transmission tower. *ScienceDirect*, 8.

Thiago B. Carlos, J. K. (2017). Dynamic response due to cable rupture in a transmission lines guyed towers. *ScienceDirect*, 6.

Timoshenko, S. (2008). *Engineerings Mechanics*. McGraw Hill.

Tocci, R., & Widmer, N. (2003). *Sistemas Digitales Principios y aplicaciones*. Prentice Hall.

Wilson, J., Buffa, A., & Lou, B. (2007). *Física*. Prentice Hall.

Zill, D. G. (2002). *Ecuaciones Diferenciales con aplicaciones de modelado*. MATH LEARNING.