

HUMANIDADES, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN EN PUEBLA

ACADEMIA JOURNALS



OPUS PRO SCIENTIA ET STUDIUM

ISSN 2644-0903 online

VOL. 2, NO. 1, 2020

WWW.ACADEMIAJOURNALS.COM

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN AUSPICIADO POR EL CONVENIO CONCYTEP-ACADEMIA JOURNALS



MARCELINO CRUZ ROSA AZUCENA

PROPUESTA DE DISEÑO DE ARMADURAS PARA NAVES INDUSTRIALES CONSIDERANDO LA
PARTICIPACIÓN DE LAS ACELERACIONES VERTICALES

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

DIRECTOR/PRESIDENTE: PH.D. JUAN PABLO HIDALGO TOXQUI

CO-DIRECTOR/SECRETARIO: DR. ENRIQUE MONTIEL PIÑA

VOCAL: M.I. EDGAR IRAM VILLAGRÁN ARROYO

NÚMERO DE SECUENCIA 2-13



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

“Propuesta de diseño de armaduras para naves industriales considerando la participación de las aceleraciones verticales”

Que para obtener el grado de licenciado en:

INGENIERO CIVIL

Presenta:

Marcelino Cruz Rosa Azucena

Director de tesis:

Ph.D. Juan Pablo Hidalgo Toxqui

Co-director de tesis:

Dr. Enrique Montiel Piña

Los integrantes del Honorable jurado de Examen Profesional:

Presidente Ph.D. Juan Pablo Hidalgo Toxqui

Secretario Dr. Enrique Montiel Piña

Vocal M.I. Edgar Iram Villagrán Arroyo

Puebla, Pue.

Fecha de aprobación: 7 de febrero del 2020

BUAP

Propuesta de diseño de armaduras para naves industriales considerando la participación de las aceleraciones verticales

*Juan Pablo Hidalgo Toxqui⁽¹⁾, Enrique Montiel Piña⁽¹⁾, Ana Elena Posada Sánchez⁽¹⁾,
Edgar Iram Villagrán Arroyo⁽¹⁾, Rosa Azucena Marcelino Cruz⁽²⁾*

⁽¹⁾ Profesor Investigador, Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Boulevard Valsequillo y Circuito, Ciudad Universitaria C.P. 72599, Puebla, Pue

⁽²⁾ Tesista, Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Boulevard Valsequillo y Circuito, Ciudad Universitaria C.P. 72599, Puebla, Pue

RESUMEN

Este artículo presenta el comportamiento dinámico experimental de una armadura tradicional usada comúnmente en naves industriales, esta se construyó a una determinada escala, se ejecutaron pruebas ante un pulso de aceleración aplicada en su base. Las variables independientes son: la longitud del claro, la carga muerta en cada nodo y la intensidad del pulso. El objetivo del estudio es observar el incremento de las aceleraciones verticales con respecto a las aceleraciones horizontales en forma de cocientes de aceleración.

ABSTRACT

This paper presents the experimental dynamic behavior of a traditional truss usually used in industrial bays, it was built in a specific scale, tests were carried out applying an acceleration pulse at the base of the truss. The independent variables were: the length of the beam, the dead load at each node and the intensity of the pulse. The target of the study's objective is observing the rising of the vertical accelerations against the horizontal accelerations as an acceleration index.

“Esta investigación fue realizada gracias al apoyo del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla”.

AGRADECIMIENTO

A mis Padres

“Un buen padre es una fuente de inspiración y autocontrol. Una buena madre es la raíz de la bondad y la humildad” Dr. T.P. Chia.

A mi Hermana

“La verdadera sabiduría está en reconocer la propia ignorancia”

A mi Abuelita

“El único valor definitivo para nuestra felicidad es la capacidad de amar” Rafael Santandreu.

A mis amigos

Por todo el apoyo, ánimo que me dieron “El tiempo que perdiste por tu rosa hace que tu rosa sea tan importante” *Antoine de Saint-Exupéry*.

Ph.D. Juan Pablo Hidalgo Toxqui

"Nunca permitas que el sentido de la moral te impida hacer lo que está bien" *Isaac Asimov*.

Dr. Enrique Montiel Piña

“Dios nunca te va a defraudar”.

Dr. José Camargo Pérez

“La civilización es el triunfo de la persuasión sobre la fuerza” Platón.

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

“Pensar bien, para vivir mejor”.

Arq. María Belén López Teutle

“La libertad significa ser dueños de nuestra propia vida” Platón.

Laboratorio de Ingeniería Estructural

“Si he podido ver más lejos que los demás, es porque me he parado en los hombros de gigantes”.

Laboratorio de Ingeniería Sísmica

“No se puede ganar una guerra como tampoco se puede ganar un terremoto.” *Jeannette Rankin*

A todos los que de una forma u otra ayudaron a la realización de esta tesis.

Índice

INTRODUCCIÓN	ix
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	1
1.1. Investigaciones y reglamentos.....	1
1.2. Armaduras	5
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	9
2.1. Teoría de análisis y diseño	9
2.2. Acelerómetro	10
2.3. Máquina de Charpy	12
2.4. Teoría de la Transformada de Fourier	13
2.5. Teorías del tratamiento de señales.....	14
2.6. Fundamentos del amortiguamiento	16
2.7. Procesamiento de datos	18
2.8. Teoría del ajuste lineal a la tendencia.....	19
CAPÍTULO 3. PLANTEAMIENTO DEL EXPERIMENTO	22
3.1. Análisis y diseño de la armadura real.....	23
3.2. Construcción.....	26
3.3. Construcción de la armadura AE.....	27
3.4. Construcción del muerto	29
3.5. Construcción de columnas.....	30
3.6. Construcción de la máquina de Charpy.....	31
3.7. Ubicación de los elementos en conjunto	33
CAPÍTULO 4. ENSAYE EXPERIMENTAL.....	35
4.1. Descripción del equipo.....	36
4.2. Protocolo de ensaye.....	39
CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	43
5.1. Frecuencias estructurales experimentales.....	44
5.2. Calibración del modelo por medio de la rigidez experimental	50
5.3. Rigidez experimental.....	53
5.4. Rigidez calibrada para los modelos teóricos de acero.....	57
5.5. Cálculo de periodos estructurales de las armaduras de acero.....	60

5.6. Amortiguamiento.....	61
CAPÍTULO 6. OBTENCIÓN APROXIMADA DE LOS COCIENTES DE ACELERACIÓN	63
6.1. Ecuación propuesta para la aproximación del valor de la aceleración de respuesta vertical en función de la rigidez vertical	66
6.2. Propuesta de ecuación para la aproximación del valor de la aceleración de respuesta vertical en función de los cocientes de rigideces.....	68
6.3. Aproximación de las aceleraciones verticales totales de diseño para armaduras de naves industriales en función del periodo estructural vertical.	70
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	75
BIBLIOGRAFÍAS	77
Anexo I. Resumen de los datos recabados con su respectivo tratamiento, así como su espectro de Fourier y sus cocientes espectrales para cada caso.....	I
Anexo II. Resumen de periodos estructurales y cocientes de aceleraciones para cada caso.....	II
Anexo III. Resumen de los cocientes de aceleraciones de respuesta contra la aceleración del impacto para cada caso.....	III
Anexo IV. Ajuste lineal a la tendencia de las relaciones de las aceleraciones de cada caso.....	IV
Anexo V. Factores de seguridad de la Ec. (6.5).....	V
Anexo VI. Fotografías del proceso constructivo.....	VI
Anexo VII. Planos.....	VII

INTRODUCCIÓN

El trabajo de un ingeniero civil es mantener la seguridad de las personas, para ello, éste debe de hacer un diseño estructural óptimo.

Con lo ocurrido con el sismo del 2017 hubo pérdidas humanas y económicas; ante esto se debe exhortar a la investigación de los vacíos en el diseño sísmico, con la finalidad de minimizar los riesgos en las construcciones ante los sismos.

El sector industrial es una parte fundamental de la economía poblana, su principal estructuración son las naves con armaduras ya que por su método constructivo ayuda a cubrir claros de gran magnitud facilitando la maniobra de maquinaria.

El diseño sísmico de armaduras de naves industriales se analiza por dos métodos el estático y el dinámico. Solo algunos reglamentos toman en cuenta la participación de la aceleración vertical, además que es escasa la información sobre su comportamiento.

Con lo anterior, el presente trabajo se enfoca en estudiar las aceleraciones de respuesta en una armadura de una nave industrial a escala, especialmente en el cociente de la componente vertical con respecto a la componente horizontal para que al final de esta tesis se pueda proponer una ecuación para estimar las aceleraciones verticales de diseño en naves industriales desplantadas en suelo firme, construidas con armaduras tradicionales.

Se consideran características particulares como la de un suelo duro, diversas variables como las longitudes de claros, cargas muertas, cargas vivas y la intensidad de la excitación.

Una vez concluida la investigación se determinó una ecuación de diseño que toma en cuenta las aceleraciones máximas horizontales que influyen en el comportamiento sísmico vertical de una armadura que forma parte de una nave industrial.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

El diseño sísmico de naves industriales ha tenido diversas limitaciones tales como la falta de estudios experimentales sobre los efectos de la componente vertical, vibración ambiental, efectos combinados de los movimientos de terreno, participación de los modos superiores de vibración, etc. así, este capítulo se enfoca en coleccionar información sobre el comportamiento de la aceleración vertical con respecto a las horizontales, con la finalidad de utilizarla para el diseño de este tipo de estructuras. Asimismo, se realiza una breve descripción histórica del uso de armaduras y se mencionan las características de los tres principales tipos de estos elementos estructurales.

Los estudios experimentales dinámicos en este tipo de estructuras no han tenido el suficiente auge debido a la falta de apoyo monetario, puesto que son necesarios equipos especializados para su ejecución, dado que el tipo de estructura generalmente son de gran escala, los resultados de los estudios experimentales ayudarían a mejorar los parámetros de diseño que están establecidos en los reglamentos actualmente.

De manera que se propone realizar una prueba experimental a una armadura escalada de aluminio, la cual será excitada en su base y se registrarán las aceleraciones en la parte de en medio de la estructura con ayuda de un acelerómetro triaxial, dicha prueba consistió en manipular tres variables: masa aplicada, longitud del claro y magnitud de golpe.

1.1. Investigaciones y reglamentos

En [1] se establece que la componente vertical tiene una importancia en el diseño sísmico en las naves industriales de grandes claros. En dicho estudio se comparó el valor recomendado en los reglamentos de Bogotá, contra un modelo analítico en SAP (por sus siglas en inglés Structural Analysis Program). El estudio contempla diferentes combinaciones de carga, así como diferentes tipos de suelos de acuerdo al territorio estudiado. Los resultados mostraron que la combinación más desfavorable es para la componente horizontal del sismo, así como el tipo de zona correspondiente a cerros;

sin embargo, en el segundo lugar y relativamente cercanos a los resultados anteriores se encuentra el efecto del sismo por la componente vertical, el cual es superior, en casi todos los casos, al efecto generado por cargas gravitacionales.

En [2] presentan las propiedades de los espectros de respuesta de las tres componentes principales del movimiento sísmico para una muestra de 97 sismos registrados en el planeta. Las direcciones principales del movimiento sísmico, dos direcciones horizontales y una vertical, constituyen una base para el estudio de sus propiedades espectrales. Se concluyó que el valor de la componente vertical con respecto a la horizontal. Depende de varios aspectos como el periodo de vibración de la estructura, cercanía o lejanía de la fuente, así como el tipo de suelo donde se transmiten las ondas; se observó una mayor actividad de la componente vertical teniendo un tipo de suelo rocoso y una mayor cercanía a la fuente.

En [3] muestran cómo los espectros de respuesta horizontal y vertical dependen de la magnitud, distancia, condiciones del suelo local, y tipo de fallas. Los mayores valores de la relación de la componente vertical respecto a la horizontal (a_v/a_H) de corto período se observan en el suelo holoceno y distancias cortas, donde pueden alcanzar valores en el rango de 0.1 s a 1.5 s de período; se observa que las mayores relaciones a_v/a_H de período largo ocurren en suelo rocoso donde pueden alcanzar valores tan altos como 0.7 segundos. Generalmente, a_v/a_H es 0.5 o menos, en los períodos más largos (0.3 a 2.0 segundos).

En [4] la relación a_v/a_H está en función del periodo del suelo, para periodos bajos la relación es alta mientras que para periodos altos la relación disminuye; se exceptúa en el caso en que la amplitud de la aceleración espectral horizontal es tan pequeña que produzca un cociente alto, sin ser consecuencia de una componente vertical intensa. En este estudio analizaron los periodos verticales de elementos estructurales como vigas, las cuales, por sus distintas formas de apoyo, tienen una variación de periodo. Así, los autores propusieron diferentes soluciones para disminuir los efectos de la componente

vertical de los sismos según sean sus condiciones de apoyo como su ubicación del terreno.

En [5] se establece que las componentes verticales del conjunto de acelerogramas empleado tienen periodos predominantes (medidos por el periodo medio) más cortos que sus correspondientes componentes horizontales. Este estudio hace la recomendación de considerar la inclusión de un espectro de diseño para aceleración vertical en futuras ediciones de la normatividad para el diseño de nuevas edificaciones o para la evaluación de edificaciones existentes ya que los sismos pueden tener epicentros cercanos a la Ciudad de México, como el ocurrido el 19 de septiembre de 2017.

El análisis y diseño dinámico se enfocan en tres componentes, dos horizontales y una vertical; esta metodología es seguida en muchos países, sin embargo, en nuestro país algunos reglamentos recomiendan el diseño sísmico teniendo en cuenta la componente vertical en dichas estructuras, por ello a continuación se presentan distintas reglamentaciones de diseño sísmico por componente verticales para naves industriales en diversos países.

El capítulo 3 del Manual de Diseño de Obras Civiles, diseño por sismo, publicado por la Comisión Federal de Electricidad y el Instituto de Investigaciones Eléctricas [6], recomienda tomar en cuenta la componente vertical del movimiento sísmico:

“Propone que en estructuras localizadas en las zonas sísmicas C y D, se realice un análisis estático ante la acción combinada de las tres componentes ortogonales del movimiento, considerando la acción de la componente vertical igual a $2/3$ de la componente mayor horizontal”.

El Reglamento de Construcciones para el Municipio de Puebla [7], presenta recomendaciones idénticas al [8], para tomar en cuenta la componente vertical del

movimiento sísmico, a continuación, se describen los párrafos donde se mencionan dichas recomendaciones:

“Art. 304 Análisis estático, VIII. Efectos tridireccionales. Las estructuras se analizarán ante la acción de dos componentes horizontales ortogonales del movimiento del terreno. Para el diseño de voladizos, vigas y losas de gran claro, columnas y muros de rigidez y los cimientos respectivos, adicionalmente se considerará la acción del componente vertical que se tomará como 2/3 del mayor horizontal”.

El Manual de Diseño de Obras Civiles Diseño por Sismo [9], expone para considerar el efecto de la componente vertical deberá tomarse en cuenta en los casos que se mencionan a continuación:

- Para todas las estructuras A+ Y A1.
- Para todas las estructuras A2, B1 y B2 en las sísmicas C y D.
- En elementos estructurales horizontales, con claros iguales o superiores a 15 m.
- En voladizos horizontales como marquesinas y balcones de longitud igual o superiores a 3 m.
- En elementos pretensados horizontales.
- En estructuras con aislamiento en la base.
- Así como cualquier otra estructura o elemento en que la variación de la acción sísmica vertical afecte en forma significativa su dimensionamiento.

Para la estimación de las aceleraciones verticales se plantea la siguiente ecuación:

$$a_{v(a', T_v)} = \begin{cases} 1.4 \cdot F_d \cdot a' & \text{si } T_v < 0.05, \\ 1.4 \cdot F_d \cdot a' \left(\frac{0.05}{T_v}\right)^{\frac{2}{3}} & \text{si } T_v \geq 0.05. \end{cases} \quad (1.1)$$

Donde:

F_d = es el factor de distancia igual a $a_0'/200$, pero no es mayor a 1

$a_v(a', T_v)$ = es la ordenada espectral vertical basada en la ordenada espectral modificada más desfavorable.

T_v = es el periodo vertical del sistema estructural y/o del elemento en revisión. Si no se conoce el periodo vertical deberá tomarse el valor de $T_v=0.05$ s.

a' = es la ordenada espectral horizontal.

1.2. Armaduras

Para el desarrollo del trabajo del ingeniero civil y para los habitantes es vital contar con sistemas estructurales capaces de soportar todas las edificaciones, sin tener que ser demasiado caro o imposible. Esta situación es favorecida por el uso de las armaduras. Este tipo de sistema estructural permite transmitir las fuerzas de manera equivalente a todas las partes de la estructura formada de manera precisa y funcional.

El uso de este sistema estructural empezó desde hace años anteriores, siendo un caso muy conocido la Torre Eiffel.

Existen ejemplos que remontan desde hace mucho tiempo en diferentes culturas antiguas, como es el caso de los egipcios, griegos, romanos, entre otras, los cuales construían techos de manera parecidas a la actualidad. Uno de estos casos son los romanos, que construían distintos tipos de estructuras para facilitar el transporte en las guerras.

Tiempo después arquitecto italiano Andrea Palladio (1518-1580), fue uno de los primeros en analizar y dibujar distintos tipos de armaduras fundamentales para puentes, aunque existían desde antes sistemas de este tipo en iglesias, de las cuales una muy notable es la de Saint-Girons, inaugurada en 1464 (ver Fig. 1.1).

Otro sistema estructural es como el que se muestra en la Fig. (1.2). Anteriormente estas naves contaban con muros de cargas y techos de madera a base de vigas y armaduras convencionales las cuales eran susceptibles a incendios, así que con el tiempo se buscó la respuesta a este tipo de requerimientos de seguridad en un material nuevo. El material que sustituyó a la madera fue el acero, cuyo uso resultó en la creación de la primera nave industrial con armaduras de la historia, ubicada en París, Francia, y de

nombre el Palacio de las Máquinas, que fue presentada como novedad en la construcción.



Figura 1.1 Imagen de la armadura de Sait-Girons, en Monein, Francia



Figura 1.2 Naves con apoyos en muros



Figura 1.3 Naves con apoyos articulados

Otro elemento de la construcción era la columna fija que se unía a la estructura, lo cual agrega rigidez a la estructura completa, no siempre es necesario, por ejemplo, en la construcción de puentes. En la Fig. (1.3) se muestra la solución a esta situación en

donde se incorpora el arco triarticulado, desarrollado para la construcción de puentes metálicos. La figura muestra una estructura con veinte arcos en forma de ojiva rebajada, los cuales estaban articulados a nivel del suelo. Cada arco estaba formado por dos mitades simétricas, conectadas en la clave del arco mediante una tercera rótula, alrededor de la que podían girar. El sistema de articulaciones permitía que los arcos se acomodasen para absorber los efectos de la dilatación térmica sin generar tensiones. Así mismo, se trata de una solución muy adecuada para evitar esfuerzos mecánicos en la estructura en el caso de que se produjeran asentamientos diferenciales (provocados por desplazamientos verticales desiguales en la cimentación) de los puntos de apoyo [10]

En la actualidad existen 4 tipos de armaduras principales las cuales son las comúnmente utilizadas por su complejidad y buen funcionamiento estructural, pues además de un armado eficiente, tienen una estructura rápida de fabricar y alta eficacia. En la Fig. (1.4) se muestran esquemáticamente este tipo de estructuras, las cuales se describen a continuación:

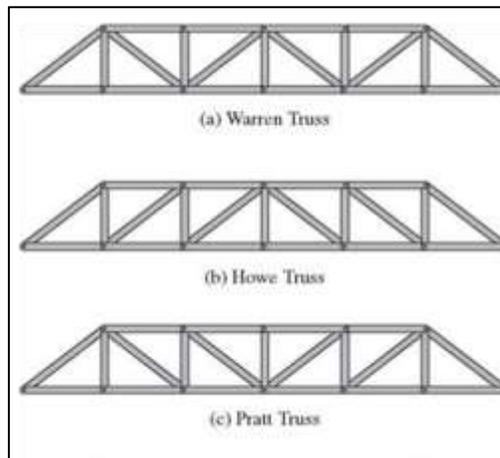


Figura 1.4 Tipos de armaduras

- a) Armadura Warren: La viga Warren se emplea en claros reducidos, medianos y grandes, con la ventaja de poseer una malla poco tupida. Puede llevar barras montantes agregadas para reducir los claros de las barras sometidas a la compresión o reducir la flexión en las barras de la cuerda inferior. Esta viga es económica, además de ser en un contexto de peso de las armaduras ligera por su simpleza.

- b) Armadura Howe: Es una estructura empleada para cubrir claros medianos; en ella, las diagonales trabajan a la compresión y los montantes a la tensión. Estas armaduras se usan frecuentemente en la construcción industrial para resolver apreciables claros y marcos mixtos. Presentan una buena relación peso-resistencia en relación con las vigas de alma llena, pero ciertos inconvenientes constructivos debido a la forma geométrica que presentan.
- c) Armadura Pratt: En ésta las diagonales trabajan a la tensión y los montantes trabajan a la compresión. Este tipo de armadura es una Viga de Celosía, cuya condición fundamental es la de ser geoméricamente indeformable. Como un punto en un plano queda determinado por el triángulo que les une a otros dos, el triángulo es el elemento fundamental de una armadura indeformable. De ahí el nombre de estructuras trianguladas. Estas vigas suelen diseñarse con nudos articulados y se emplean para cubrir claros muy largos sin tener grandes deflexiones.

Perea (2004) quien afirma que hay “necesidad de llevar a cabo estudios que consideren la componente vertical de movimientos del terreno, a fin de proponer recomendaciones cuantitativas de diseño sismorresistente en los reglamentos de construcciones, que consideren adecuadamente los efectos de las aceleraciones verticales del terreno en aquellos sitios en que puedan ser importantes”.

Por otra parte, después de un evento sísmico es necesario que muchas dependencias y organismos del gobierno sigan en funcionamiento, tales como servicio de bomberos, hospitales y en este punto las industrias en el estado, ya esta industria es generadora del 9.6% de la economía total, dicho sector es estratégico en la región por lo que detenerse costaría a la recesión del estado.

Por lo que esta investigación beneficiará a toda la industria Poblana que mueven la economía del estado, la cual debe cumplir como una estructura segura, además de promover el desarrollo de investigación aplicada en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP).

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se desarrolla el marco teórico, la teoría que son las bases para el desarrollo del experimento. Se describen, a manera de secciones, tanto las teorías aplicadas en el análisis del programan utilizado, la instrumentación empleada (acelerómetro, máquina de Charpy), análisis de Fourier, tratamiento de señales, amortiguamiento, ajuste lineal. Adicionalmente, se describe el procesamiento de los datos obtenidos del acelerómetro.

2.1. Teoría de análisis y diseño

El programa empleado para el diseño de los elementos estructurales de la armadura fue STAAD (que es un software para realizar el análisis y diseño de estructuras), debido a que contiene varios códigos reglamentarios para el diseño de una estructura. El código empleado fue el AISC-ASD (inglés Allowable Strength Design). Se basa en los principios del diseño de estado límite de servicio, el cual proporciona las fronteras de la utilidad estructural.

Con el método ASD, las cargas de servicio generalmente no se multiplican por factores de carga o de seguridad, éstas se acumulan para las combinaciones factibles. Los mayores valores se usan para determinar el mayor esfuerzo de los miembros (R_a), que se comparan contra las resistencias nominales (R_n) y divididas por el factor de seguridad (Ω) [10].

$$\frac{R_n}{\Omega} \geq R_a. \quad (2.1)$$

Teniendo los esfuerzos actuantes en la estructura, se compararán contra los esfuerzos permisibles, esto se empleará en la sección 3.1.

Las cargas aplicadas en el modelo son las siguientes:

- Carga muerta: Conjunto de acciones que se producen por el peso propio de la construcción; incluye el peso de la estructura misma y el de los elementos no estructurales, como muros divisorios, los revestimientos de pisos, muros y fachadas, la ventanearía, las instalaciones y todos aquellos elementos que conservan una posición fija en la construcción, de manera que gravitan en forma constante sobre la estructura. La carga muerta es, por tanto, la principal acción permanente.
- Carga Viva: Se considerarán cargas vivas las fuerzas que se producen por el uso y ocupación de las edificaciones y que no tienen carácter permanente, a menos que se justifiquen racionalmente otros valores.

2.2. Acelerómetro

Los acelerómetros son instrumentos para medir aceleración y vibración, éstos convierten la aceleración de la gravedad, en una señal eléctrica analógica proporcional a la intensidad aplicada al sistema, o mecanismo sometido a vibración o aceleración.

Las técnicas convencionales para medir la aceleración se fundamentan en lo que se conoce como la Segunda Ley de Newton en 1687, descrita en sus textos "*Principia*", esta ley establece que: "*la fuerza neta aplicada sobre un cuerpo es proporcional a la aceleración que adquiere dicho cuerpo*". La aceleración constante de una masa implica la aplicación de una fuerza F constante a una masa m constante. Tanto la fuerza como la aceleración son magnitudes vectoriales y, por lo tanto, tienen dirección y sentido, por lo tanto, el uso de acelerómetros implica que éstos deban registrar la aceleración en las tres direcciones perpendiculares.

Los acelerómetros son sensores inerciales que miden la segunda derivada de la posición con respecto al tiempo, o bien, se puede interpretar que miden la fuerza de inercia generada cuando una masa es afectada por un cambio de velocidad. Esta fuerza puede variar la tensión de un muelle, deformar un elemento o modificar la frecuencia de vibración de una masa. En la siguiente figura se muestra el esquema básico de un acelerómetro, existen diferentes tipos de acelerómetros, dependiendo su funcionamiento y su la forma de censar la aceleración.

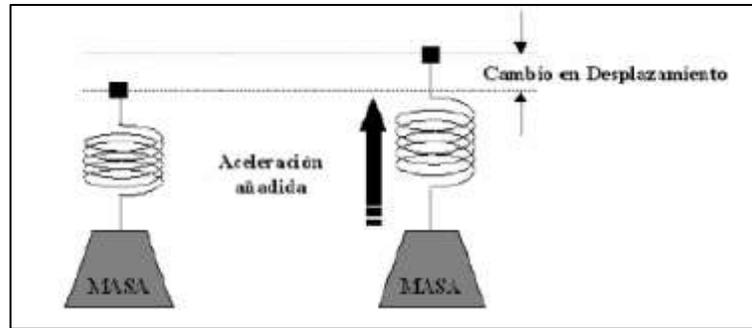


Figura 2.1 Esquema básico del acelerómetro

Tipos de acelerómetros:

- Acelerómetro mecánico: Consiste en una masa inerte y un resorte elástico, cuya función principal es medir con galgas extensiométricas los cambios de longitud del resorte; se emplea en sistemas rotativos desequilibrados que originan movimientos oscilatorios cuando están sometidos a aceleraciones o a desplazamientos de una masa inerte.
- Acelerómetro piezoeléctrico: Este tipo de dispositivo constan de un material cristalina llamado piezoeléctrico cuya función es la de recibir un tipo de señal, por ejemplo, de fuerza o de deformación, y convertirla en una señal eléctrica. Básicamente, cuando hay una deformación física en un intervalo de tiempo en los cristales, es decir, una aceleración, modifica su estructura cristalina cambiando sus características eléctricas, y produciendo una corriente eléctrica; se mide tal corriente y con estos valores es posible determinar o calcular la aceleración correspondiente.
- Acelerómetros piezoresistivos: Constan de un sustrato con una resistencia eléctrica determinada. Su funcionamiento se basa en la resistencia eléctrica de cambiar su valor cuando la materia se deforma mecánicamente. Se genera también una corriente que se mide, con el cambio en la resistencia mediante un circuito conocido como puente de Wheatstone.
- Acelerómetros capacitivos: Estos dispositivos contienen un par de placas conductoras paralelas que forman un microcondensador o capacitor. La idea es que se varía la posición relativa de las placas del microcondensador cuando se encuentra sometido a aceleraciones. Están integrados en chips de silicio que les proporciona soluciones a diferentes tipos problemas, por ejemplo, cuestiones

de humedad, temperatura, capacidades parásitas, número total de terminales, etc. de todos los métodos existentes para realizar medidas de posición, la medida de los cambios en el valor de una capacidad es la más versátil.

2.3. Máquina de Charpy

La máquina de Charpy, también llamada péndulo de Charpy, es una máquina de ensayo cuyo objetivo es conocer el comportamiento de un material ante un impacto. Este ensayo fue creado por Augustin Georges Albert Charpy (1865-1945).

El espécimen se golpea mediante una masa M , como se observa en la Fig. (2.2), la cual se encuentra acoplada al extremo del péndulo con una longitud L , que se deja caer desde una altura H .

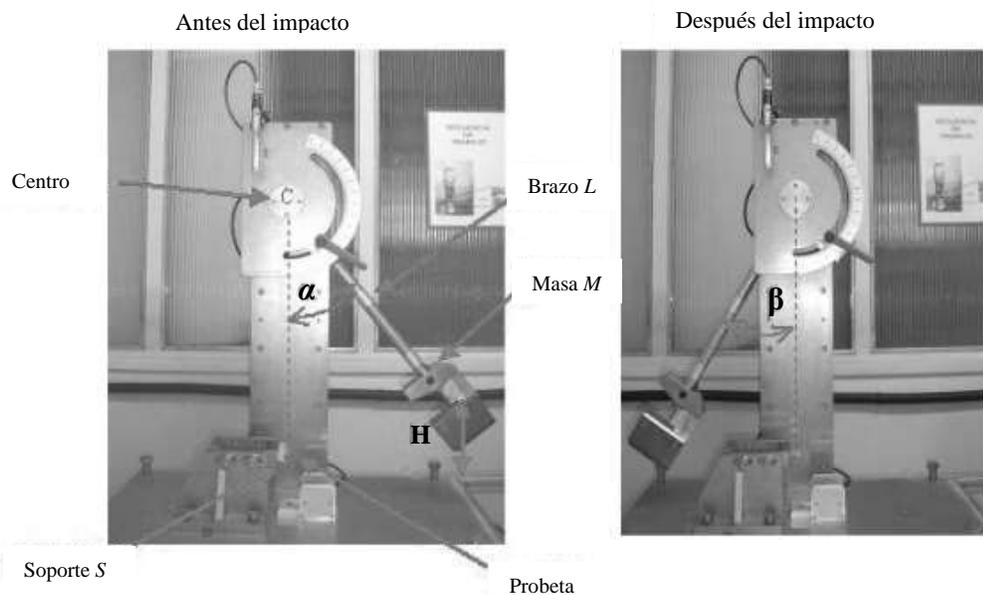


Figura 2.2 Péndulo de Charpy: a) antes del impacto y, b) después del impacto

La energía absorbida, E_a , se calcula por medio de la diferencia de energía potencial del péndulo antes y después de su impacto. Al tener el ángulo inicial de aplicación de carga (α) y el ángulo final (β) al que se eleva el péndulo después de la rotura completa de la probeta, la resistencia del material, R_a , se puede calcular con la siguiente expresión:

$$R_a = MgL(\cos \beta - \cos \alpha), \quad (2.2)$$

donde g es la gravedad. Dado que el material puede absorber energía dependiendo de su capacidad de reacción ante el impacto, puede presentar los siguientes modos de fractura [11]:

- Dúctil
- Frágil

En esta tesis no se le da el mismo enfoque anteriormente mencionado a la máquina de Charpy, pues el objetivo es solo usar la metodología de impacto para simular un sismo. En el presente trabajo la máquina de Charpy impactará contra el muerto que simulará nuestra cimentación, como se explica detalladamente en la sección 3.6.

2.4. Teoría de la Transformada de Fourier

En esta sección se describe el concepto de la Transformada de Fourier y su respectiva ecuación.

Un acelerograma es una representación temporal de la aceleración que experimenta un suelo en un determinado punto durante un sismo, este es registrado por medio de un acelerómetro.

La transformada de Fourier es con la que pasamos del dominio del tiempo al dominio de frecuencias, con lo que se obtiene, para diferentes valores de tiempo, lo que se conoce como el respectivo espectro de amplitudes o de Fourier, es decir, se consiguen con este método expresiones más simples [12] de manejar. La ecuación que permite realizar el cambio de dominios es la siguiente:

$$s_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i2\pi ft} dt. \quad (2.3)$$

Donde:

$s_x(f)$ = amplitud de una señal (onda de sonido o una onda electromagnética),

$x(t)$ = potencial de la señal,

ft = producto escalar con una exponencial compleja de una frecuencia.

El espectro de Fourier, es un parámetro que proporciona un conocimiento acerca de las frecuencias del acelerograma, de modo que, para cada periodo de oscilación, representa una amplitud máxima que le corresponde.

El espectro de Fourier en amplitudes, se define matemáticamente como:

$$FS = \sqrt{\left(\int_0^t a(\tau) \cos(\omega \cdot \tau) \cdot d\tau\right)^2 + \left(\int_0^t a(\tau) \sin(\omega \cdot \tau) \cdot d\tau\right)^2}. \quad (2.4)$$

Donde:

ω = Frecuencia angular,

a = aceleración,

τ = tiempo después de recibir el impulso.

De los espectros de Fourier se pueden deducir los periodos más importantes, con solo encontrar en que lugares se alcanzan los picos de amplitud. La frecuencia o periodo predominante de un registro, es aquel en que el espectro de Fourier alcanza su valor máximo de aceleración, y que además mantiene una correlación directa con distancia epicentral.

Con los espectros de Fourier se obtiene el mayor pico del registro, y por lo tanto el periodo predominante de la estructura.

2.5. Teorías del tratamiento de señales

En esta sección se explican los tratamientos aplicados al acelerograma, el cual, por situaciones externas, presenta una serie de contaminación por efectos externos, por lo que tal acelerograma se debe tratar con los siguientes parámetros:

- Corrección instrumental: Consiste en la convolución del registro con la función de transferencia del instrumento. Debemos conocer para ello las constantes de calibración del instrumento, como la sensibilidad del acelerómetro, la frecuencia natural de la estructura y el amortiguamiento

- Corrección de la línea base o corrección de ceros: Esto ocurre cuando los valores del acelerograma se encuentran desplazados respecto a la línea cero de aceleración. Este error puede ocurrir porque el acelerómetro no esté perfectamente nivelado en su emplazamiento, o bien, porque el sistema de registro provoque una deriva de los datos respecto a la línea base.

Otro factor que contamina las señales es el ruido. Para eliminación de éste, se suelen emplear diversos filtros, dependiendo del caso de ruido que se presente. A continuación, se exponen los tipos de ruido que afectan a un acelerograma:

- Ruido de alta frecuencia: son aquellos con frecuencias que aparecen por encima de la banda útil con la que se está trabajando. Este ruido afecta a los picos de aceleración fundamentalmente, sin embargo, no afecta mucho en el proceso de integración, ya que el área bajo la curva del espectro de Fourier es prácticamente la misma que para la señal corregida, dado que las desviaciones por encima y por debajo se compensan.
- Ruido de baja frecuencia: se presenta cuando el ruido aparece por debajo de la banda de frecuencias útil con la que se está trabajando.

De acuerdo con los anteriores errores se utilizan diferentes tipos de filtros, los cuales se muestran esquemáticamente en la siguiente figura, según sea el caso:

- Pasa-bajas: eliminar altas frecuencias.
- Pasa-altas: eliminar bajas frecuencias.
- Pasa-banda: elimina el ruido de alta y baja frecuencia simultáneamente.

Lo importante a la hora de aplicar los filtros es la elección de la frecuencia de corte adecuado, ya que una mala elección puede suponer eliminar parte de la señal que interesa, o por lo contrario no eliminar el ruido de la señal.

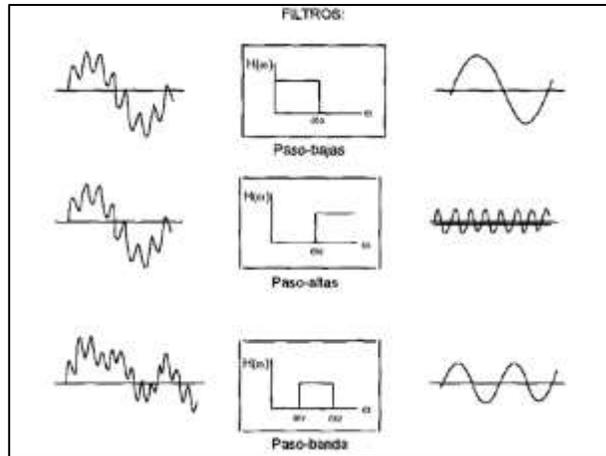


Figura 2.3 Comportamiento de los filtros ideales a) paso-bajas, b) paso altas, c) paso bandas

2.6. Fundamentos del amortiguamiento

Las estructuras reales poseen propiedades de amortiguamiento que reducen la vibración en la estructura; tal efecto amortiguador de las estructuras es causado por varios mecanismos, como lo es el consumo de energía vibratoria en estructuras en la forma de calor, sonido o la disipación de energía de estructuras que vibran hacia el campo exterior como por ejemplo el suelo. Aunque el mecanismo de disipación actual es complicado y difícil de determinar, usualmente se clasifica en los siguientes mecanismos de amortiguamiento en vibración estructural como:

- Amortiguamiento interno: es el causado por la fricción molecular en el material. Usualmente tratado como fuerza de amortiguamiento proporcional a la derivada en el tiempo de la deformación o deflexión.
- Amortiguamiento externo: causado por la vibración en el medio como el aire, agua o aceite, usualmente tratado como la fuerza proporcional a la velocidad de la estructura en el medio; para altas velocidades, la fuerza de amortiguamiento es considerada proporcional al cuadrado (o una mayor potencia) de la velocidad.
- Amortiguamiento friccionante: causado por la fricción de Coulomb en los nodos, apoyos u otras interfaces.

- Amortiguamiento histerético: es el causado por el consumo de energía debido a las propiedades histeréticas del conjunto de las fisuras, fluencia del material y otros.
- Amortiguamiento disipador: causado por la disipación de la energía de vibración de los sistemas hacia el exterior sin retorno. Un ejemplo de este efecto de amortiguamiento en una estructura es un medio continuo elástico, debido a la transmisión de energía de vibración de un medio continuo en la forma de una onda de transmisión disipativa [13]. En la Fig. (2.4) se muestran los componentes de este amortiguamiento, así como las respectivas ecuaciones para su cálculo a partir de la Ec. (2.5) en donde se calcula la amplitud posteriormente el amortiguamiento con ayuda del decremento logarítmico establecido en la Ec. (2.6), posteriormente se aplica la Ec. (2.7) para encontrar experimentalmente el porcentaje de amortiguamiento que un sistema oscilante está sufriendo.

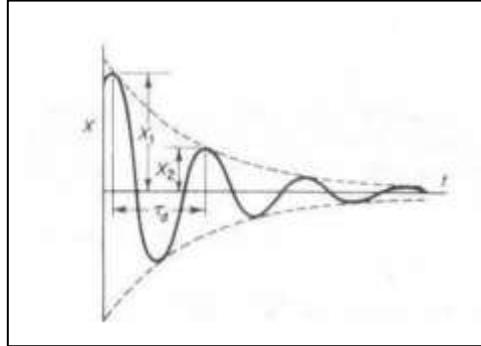


Figura 2.4 Amortiguamiento

$$x = X e^{-\xi \omega_n t} * \sin(\sqrt{1 - \xi^2} \omega_n t + \phi), \quad (2.5)$$

$$\delta = 2\pi\xi, \quad (2.6)$$

$$\xi = \frac{\delta}{2\pi}, \quad (2.7)$$

Donde:

X = Posición inicial,
 ξ = amortiguamiento,
 ω_n = Frecuencia natural de vibración,
 t = tiempo,
 ϕ = ángulo de fase,
 δ = Decremento logarítmico.

2.7. Procesamiento de datos

En esta sección se desglosa el procedimiento que se llevó a cabo con todos los registros obtenidos del acelerograma.

En el primer procedimiento los acelerogramas se trabajaron con la siguiente secuencia en el programa DEGTRA:

1. Corrección de línea base.
2. Posteriormente se procesaron las señales obtenidas por medio de filtros de frecuencias para quitar el ruido que estuviera causando interferencias en las señales, tanto por fenómenos naturales como por fenómenos mecánicos. Este filtrado de frecuencias se hace debido a que el acelerograma registrado es la suma de la señal sísmica útil, más el ruido. Por el planteamiento de la sección 2.5, se determina usar un filtro de pasa bajas de 10 a 100 Hz para cada acelerograma. Esto ya que el sistema estructural teórico trabaja a una frecuencia de treinta Hertz, por lo que no hay otras frecuencias de relevancia que trabajen fuera del rango propuesto. Este procedimiento se realiza para las aceleraciones máximas verticales (a_{my}) y la horizontal paralela al eje longitudinal de la armadura (a_{mz}).
3. Obtuvimos el espectro de Fourier, el cual es un parámetro que proporciona un amplio conocimiento acerca del contenido de frecuencias del acelerograma, de modo que el periodo fundamental de la estructura en el acelerograma estará representando con la amplitud máxima en el espectro, por lo que al obtener dichos espectros se obtiene el

comportamiento en una dirección paralela a la estructura y además se observa la energía disipada. Así, al espectro de Fourier sólo se aplica un suavizado de 6, como lo establece el programa de cómputo seleccionado, ya que es el que más ayuda a eliminar otras interferencias de las señales registradas.

4. Se obtuvo la frecuencia dominante de la estructura experimentada.

En el segundo procedimiento se obtiene el cociente de a_{my}/a_{mz} a partir de los acelerogramas tratados, esto es, las aceleraciones máximas de los ejes Y nombrada como a_{my} , dividido entre la aceleración máxima en el eje Z nombrada como a_{mz} . Todo este procedimiento se repite para obtener la misma información en cada caso.

En el tercer procedimiento se obtiene el amortiguamiento de la estructura por lo establecido en la sección 2.6, solo se realizó una vez, por las condiciones de la armadura.

Resumiendo, este apartado se enfoca entonces en el cálculo de las aceleraciones máximas de cada experimento, obteniendo la relación de aceleraciones máximas contra características específicas como son la longitud y masa. Con los datos recabados es posible graficar el cociente de las aceleraciones máximas verticales contra las horizontales para cada caso y así observar cómo se comporta la estructura en función de la excitación impuesta (a_{mF}), con lo que se concluye un patrón para estudiar el comportamiento de las aceleraciones verticales producto de un impulso horizontal en la base en naves industriales en suelo duro.

2.8. Teoría del ajuste lineal a la tendencia

Una línea de tendencia es una recta que marca la tendencia de una serie de datos; existen diversos tipos de líneas de tendencia de las cuales son:

- Lineal: predicción lineal de una variable respuesta cuantitativa, o independiente, a partir de una variable predictora cuantitativa, o dependiente.

- Polinomial: predicción de una variable de respuesta cuantitativa a partir de una variable predictora cuantitativa, donde la relación se modela como una función polinomial de grado n .
- Exponencial: la relación entre las variables dependiente (predictora) y la independiente (respuesta) es de tipo exponencial, habitualmente se emplea la base e .
- Logarítmica: la relación entre las variables respuesta y predictora es de tipo logarítmica, siendo el más común el logaritmo neperiano o natural.

La aplicación o elección de la relación depende del comportamiento de los datos, sin embargo, es común que se suele emplear para el caso de relaciones diferentes a la lineal de un proceso de linealización para posteriormente someter a prueba la fortaleza de la relación mediante el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson, que se denota como R^2 , el cual varía entre 0 y 1, en donde un valor de R^2 cercano a 0 indica que la línea de tendencia es mala, y un valor de R^2 cercano a 1 indica que el ajuste lineal respecto al conjunto de datos es aceptable. Lo anterior para una relación lineal con pendiente positiva. Una situación equivalente ocurre para una relación lineal negativa, pero R^2 debe encontrarse en el intervalo $(-1,0)$.

Debido a la gran cantidad de datos que se suele emplear para realizar el ajuste de líneas de tendencia, se suele emplear algún software que facilite los cálculos. Uno sencillo y suficiente para la cantidad de datos que se manejan en el presente trabajo es Excel.

El modelo lineal se basa en la siguiente ecuación general:

$$Y_i = (a + bX_i) + \epsilon_i, \quad (2.8)$$

donde:

Y_i = variable,

a = punto de corte en el eje de ordenadas y representa uno de los ejes de la regresión,

b = pendiente o gradiente de la recta, que es otro de los coeficientes de regresión,

ϵ_i = término de los residuos.

Los coeficientes de regresión se deben estimar de los datos, usando el método de mínimos cuadrados, que se basa en las siguientes ecuaciones [14]:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n}}{\sum x^2 - \frac{\sum x^2}{n}} = \frac{SSXY}{SSX} \quad (2.9)$$

$$= \frac{\text{suma corregida de productos}}{\text{suma cuadrada de } x},$$

y

$$a = \bar{y} - b\bar{x} = \frac{\sum y}{n} - b \frac{\sum x}{n}. \quad (2.10)$$

En base a esta teoría se selecciona la línea de tendencia de cada experimento, desde la crujía 20c hasta la 2c, como se muestra en el Anexo III.

CAPÍTULO 3. PLANTEAMIENTO DEL EXPERIMENTO

Fundada en 1531, la ciudad de Puebla comenzó a adquirir importancia como centro productivo a mediados de ese siglo; así mismo, la ciudad contó con las condiciones que le permitieron el desarrollo de una amplia gama de actividades productivas, gracias a la abundante presencia de agua, a la proximidad de sitios proveedores de materia prima y a su ubicación estratégica desde el punto de vista comercial. La rama textil cobró mayor importancia en esa misma época.

La producción textil inició con la instalación de obras que funcionaron durante el Virreinato, lo que permitió que en la ciudad se desarrollara una preferencia a la industria, que la ha distinguido a lo largo de su historia.

En el año 2019, la actividad industrial del estado aumentó 27.63% respecto a septiembre del año anterior; con base a cifras desestacionalizadas, este crecimiento se debe en gran medida al sector manufacturero que aumentó 52.63% a tasa anual, que representa el mayor crecimiento registrado en Puebla desde octubre de 2005. [15]

Las armaduras son un sistema estructural construido con barras rectas de sección constante que están unidas en sus extremos mediante articulaciones sin fricción, trabajan a fuerza axial de tensión y compresión, facilitando por un lado la maniobra de maquinaria y por otro el almacenaje de grandes cantidades de insumos o de productos propios.

En las siguientes secciones se desarrolla el análisis y el diseño de la armadura de longitud de 30 m, así como la construcción de una armadura de aluminio que se emplea como modelo experimental. También se presenta la construcción de los elementos que componen el experimento, los cuales son: muerto, columnas, máquina de Charpy y la ubicación en conjunto.

3.1. Análisis y diseño de la armadura real.

El análisis estructural tiene como objetivo principal conjugar geometría, materiales y cargas de una estructura, posteriormente, mediante un modelo matemático, se obtienen los elementos mecánicos, deformaciones, reacciones horizontales, reacciones verticales, periodos y frecuencias correspondientes.

En esta sección se desarrolla el diseño y análisis empleado en la armadura de acero nombrada como AR, así como el escalamiento, diseño y análisis de la armadura construida en el laboratorio; tal estructura es llamada AE y se emplea aluminio no estructural para su construcción.

El trabajo inicio con la modelación por computadora de un diseño analítico de una armadura real (AR), en acero, de una nave industrial para un claro de 30 m, tal diseño se muestra en la Fig. (3.1).

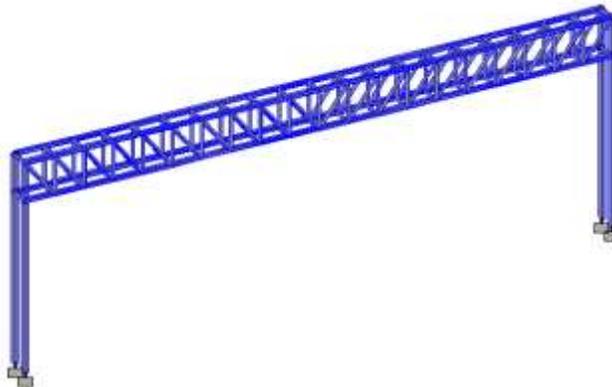


Figura 3.1 Marco de acero de longitud de 30 m

Para el análisis de dicho proyecto teórico se utilizó el software de Análisis y Diseño de Edificaciones (STAAD), en el cual se analizó la armadura con el código AISC-ASD para elementos de acero.

Se diseñó una armadura que cuenta con un claro 30 m, de carácter central, como se muestra en la Fig. (3.2); la distancia entre cada armadura es de 10 m.

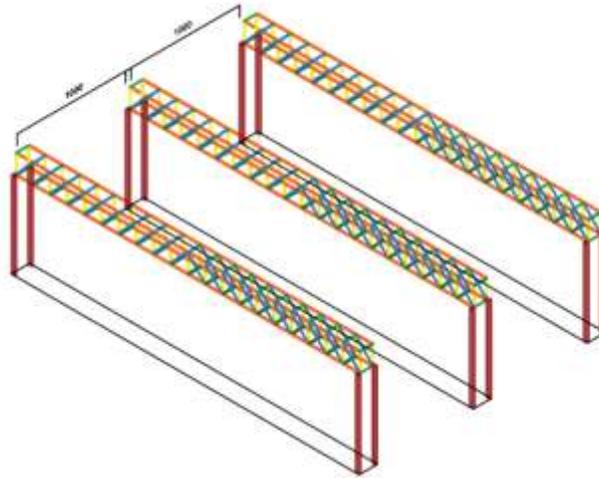


Figura 3.2 Armadura central

Con las características anteriores se realizó la bajada de cargas, conforme a las normas vigentes [15], que se muestran en la Tabla 3.1.

Cubierta		
Carga		Gravitacional
		kg/m ²
Lamina de perfil rectangular de calibre 24		5.41
Instalaciones		5
Carga puntual para cada nodo		
Carga muerta	74.36	kg/m ²
C _v	35.71	kg/m ²
C _{vins}	142.86	kg/m ²
C _{vmax}	285.71	kg/m ²
Peso total en cada nodo	252.93	kg/m ²

Tabla 3.1. Bajada de cargas

En la Fig. (3.3) se muestra las cargas empleadas, y que equivalen a cargas aplicadas, en el programa STAAD. Las secciones transversales empleadas en el diseño son:

- Cuerdas superiores e inferiores: 2LI 3 ½ de pulg x 3 ½ de pulg x 7/16 de pulg (espalda con espalda ).

- Diagonales y montenes: LI 3½ de pulg x 3½ de pulg x 7/16 de pulg
- Columnas: Tubular de 12 de pulg. x 6 de pulg

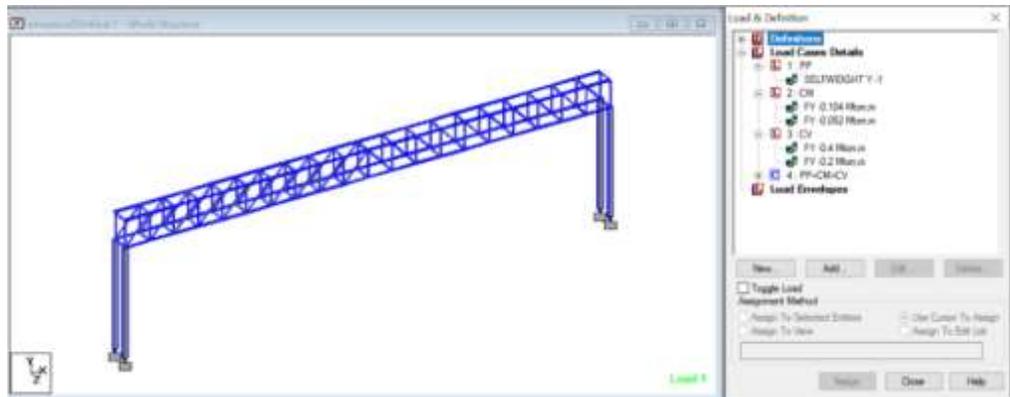


Figura 3.3 Cargas aplicadas y secciones empleadas en el programa STAAD

Con estas características se ejecutó el programa, donde se obtuvieron los esfuerzos de los elementos, como se observa en la Fig. (3.4). El color verde de las barras indica que el esfuerzo actuante no sobrepasa a los esfuerzos permisibles, dicho color identifica que la estructura cumple los requerimientos necesarios de trabajo, aunque la metodología de diseño esta sobre-diseñada ya que el factor de esfuerzo permisible obtenido es menor que el 80%, lo cual se considera aceptable, debido a que las secciones comerciales de aluminio no son tan pequeñas, se optó por emplear las secciones comerciales.

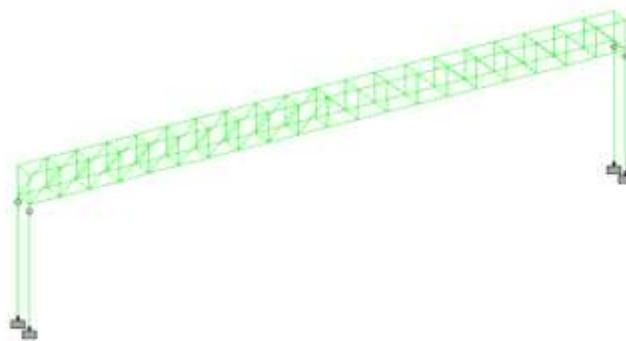


Figura 3.4 Factores de eficiencia STAAD

En base al diseño de la armadura real, se construyó el modelo de la armadura de aluminio a una escala de 1:0.094, por lo que la longitud del claro del modelo real de 30 m equivale a una longitud de 2.84 m en la armadura de aluminio, teniendo como resultado las siguientes secciones transversales:

- Cuerdas superiores e inferiores: 2LI $\frac{1}{2}$ de pulg x $\frac{1}{2}$ de pulg x $\frac{1}{16}$ de pulg.
- Diagonales y montenes: LI $\frac{1}{2}$ de pulg x $\frac{1}{2}$ de pulg x $\frac{1}{16}$ de pulg.
- Columnas: tubular de 2 de pulg x 1 de pulg.

Más detalles de las secciones transversales son mostrados en los planos del Anexo VIII.

Las uniones en los nodos se hicieron con placas de acero galvanizado de espesor de 0.224 cm, con dimensiones aproximadas de 4 cm x 4.5 cm, unidas por medio de un tornillo de $\frac{3}{8}$ de pulgada; para que cada placa trabajara como una articulación se cumplió que la proyección del centroide de cada elemento concurriera en un punto en común.

3.2. Construcción

En esta sección se explica el proceso constructivo, así como los elementos empleados en este experimento, que son:

- Armadura.
- Muerto.
- Columnas.
- Máquina de Charpy.

Por último, se plantea la ubicación de los elementos a participar, que en conjunto forman una simulación de una parte de una nave industrial sometida a un sismo, y el proceso constructivo de cada uno de ellos.

La unión entre armadura y columna es una articulación real tal como se explica en la sección 5.2, mientras la placa en base de columna se diseñó conforme a las Normas Técnicas Complementarias [15], respetando los lineamientos de diseño de acero para un diámetro de tornillo de $\frac{1}{4}$ de pulgada en el modelo AR, esta no se escaló para el modelo AE. Terminado la AE, se construyen las columnas de acero, las cuales tuvieron que ser empotradas a un muerto de concreto (suelo rígido), el empotramiento simuló la unión estructura-suelo, o bien la cimentación.

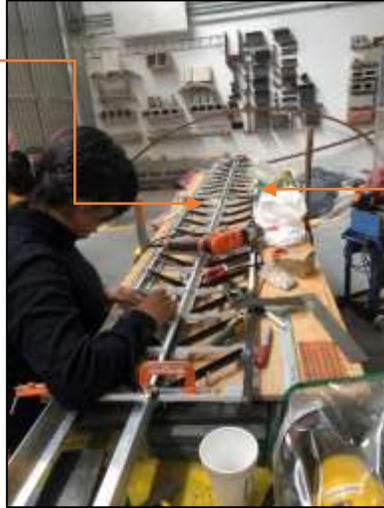
3.3. Construcción de la armadura AE

En esta sección se desarrolla el proceso constructivo de la armadura a escala (AE). Se decidió que las uniones de la armadura fueran por medio de tornillos, ya que la soldadura de aluminio es demasiado cara y difícil de trabajar, por lo cual es necesario mano de obra especializada, pues el espesor del perfil es muy pequeño.

El proceso constructivo fue el siguiente:

- Se cotizaron y se compraron los perfiles de aluminio de LI $\frac{1}{2}$ pulg x $\frac{1}{2}$ pulg x $\frac{1}{16}$ pulg.
- Los perfiles fueron cortados en las siguientes dimensiones:
 - 14 cm para los cuerdas superiores e inferiores,
 - 20 cm para diagonales,
 - 16 cm para montenes y
 - 8 cm para montenes superiores.
- Las placas de acero galvanizado fueron cortadas con dimensiones aproximadas de 4 cm x 4.5 cm.
- Se compraron tornillos de diámetro de $\frac{1}{8}$ de pulgada.
- Los perfiles se perforaron con ayuda de un perfil guía como se muestra en el Anexo VIII.
- La armadura se ensambló por dos partes, como se muestra en la Fig. (3.5), se usó de guía otros perfiles LI más grandes, esto se realizó para tener la misma longitud entre módulo y los aspectos a cuidar fueron la longitud y nivelación al claro de la armadura.
- En la fase dos se unieron las dos tiras de módulos por medio de montantes perpendiculares al claro de la armadura superior que unieran el ala del perfil hacia la otra ala del perfil. En la Fig. (3.6) se muestra una representación esquemática de esta situación, mientras que en la Fig. (3.7) se muestra la construcción de la armadura en una de sus fases, específicamente, en la fase 2.

Tira de módulos 2



Tira de módulos 1

Figura 3.5 Construcción de armadura fase 1

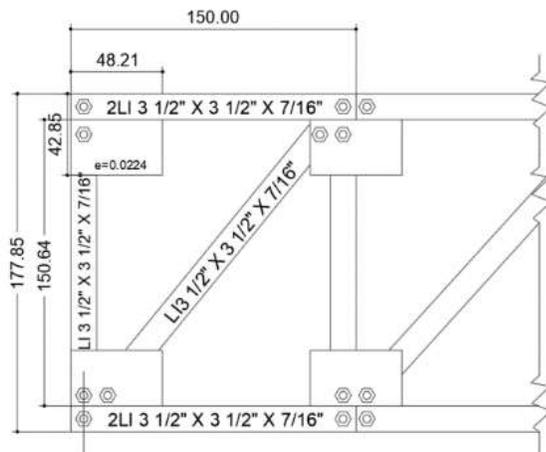


Figura 3.6 Vista frontal de la armadura



Figura 3.7 Construcción de armadura fase 2

Al terminar de construir la armadura, se esperó el tiempo necesario y suficiente hasta construir los otros elementos del experimento, los cuales se plantean en las siguientes secciones.

3.4. Construcción del muerto

Para la simulación del suelo duro se construyó un muerto de concreto, el cual está unido a las columnas por medio de placas base. Con esto, la propagación de onda llegará hasta la parte superior de la armadura a través del muerto.

Se utilizó la cimbra del laboratorio de estructuras para colocar el muerto; la primera se amplió hasta una longitud de 3.0 m de largo, por necesidades de trabajo. Las medidas del área transversal del muerto son de 0.25m x0.15 m. Se empleó un armex para el refuerzo interior de 0.20 m x 0.10 m como se ve en la Fig. (3.8).



Figura 3.8 Armado de muerto

Material	kg	Botes
Agua	37.64	2
Cemento	69.69	1.2
Grava	167.64	3.2
Arena	94.8	2.6

Tabla 3.2 . Dosificación de la mezcla del muerto.

En la Tabla 3.2 se muestra la dosificación del concreto para el muerto, durante el colado del muerto se ahogaron las placas de asiento para el golpe del martillo. En la Fig. (3.9) se muestran las primeras placas; una se estableció en la cara transversal de uno de los lados del muerto, otra placa se colocó en la esquina superior de muerto. Vale la pena

resaltar que las placas contaron con unas anclas para no tener problemas de adherencia con el concreto.



Figura 3.9 Placa de acero empleados en el muerto

Durante el colado del muerto se contó con el apoyo de cuatro personas; ése se realizó sin maquinaria, se vibró y se desmórfó dos días después. En la Fig. (3.10) se muestra el colado del concreto y su correspondiente muestreo de concreto en cilindros de 20 cm x10 cm.

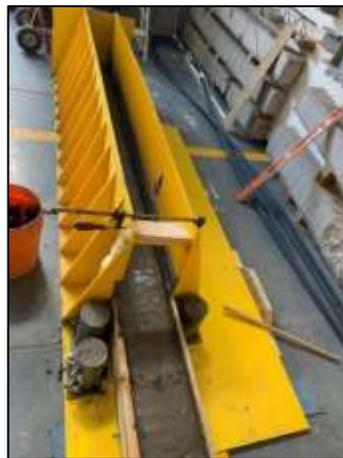


Figura 3.10 Colado del muerto

3.5. Construcción de columnas

Teniendo el escalamiento de las columnas, se planteó usar aluminio al comprar el material y cortarlo, se notó que la unión entre columna y muerto tenía que ser por medio de una placa base, esto no se pudo llevar a cabo, ya que la placa de aluminio como la soldadura es bastante cara y difícil de hacer, se decidió hacerlas de acero.

Se establecieron las separaciones mínimas conforme al diámetro de los tornillos, de acuerdo a lo establecido en las Normas Técnicas Complementarias [15], siendo de 3/8 de pulgada y con 2 tornillos por cada columna, y conforme a los elementos mencionados del análisis.

Por cuestión de construcción se decidió soldar las dos columnas en una sola placa de acero, por lo cual se tuvieron dos columnas con 4 perforaciones dobles, las cuales se anclaron al muerto, teniendo una placa inmóvil y la segunda fue móvil, de modo que se podía recorrer de lugar conforme se reducía la armadura. En la Fig. (3.11) se muestra el proceso de soldado mencionado.



Figura 3.11 Posición de las dos columnas en la placa de unión

3.6. Construcción de la máquina de Charpy

En esta sección se explica cómo se construyó la máquina de Charpy, de la cual se describió su funcionamiento en la sección 2.3. Es menester mencionar que esta máquina se realizó con el objetivo específico de excitar el muerto de concreto.

En la Fig. (3.12) se muestra el martillo con medición de fuerza de impacto, el cual contiene diversos cabezales para dicho golpe, este tiene una celda que registra la magnitud de golpe, el instrumento se estableció para que el martillo este perpendicular al muerto, por lo que en estas condiciones se construyó un péndulo para golpear el muerto, lo que constituye en efecto a una máquina de Charpy.



Figura 3.12 Martillo con medición de fuerza de impacto, con cabezales

Las partes de la máquina de Charpy son las siguientes:

- Marco de soporte (1)
- Cuadro porta martillo (2)
- Barra de acero (3)
- Sistema de articulación (chumaceras) (4)

En la Fig. (3.13) se muestra el marco de soporte, el cual en efecto proporciona soporte a la estructura principal. El cuadro porta martillo es donde se instala al martillo con medición de fuerza de impacto. El sistema de articulación se conforma de la flecha con las chumaceras, el cual permite que el cuadro porta martillo tenga la libertad de movimiento como un péndulo. La flecha es una barra lisa de acero con diámetro de $\frac{1}{2}$ pulgada. Las chumaceras son de rótulas de $\frac{1}{2}$ de pulgada de diámetro.



Figura 3.13 Marco de soporte con péndulo

En la Fig. (3.14) se muestra el funcionamiento de la máquina de Charpy, la cual impacta en la placa ahogada de acero en el muerto. El marco de soporte cuadrado deja balancear a un cierto ángulo de inclinación.

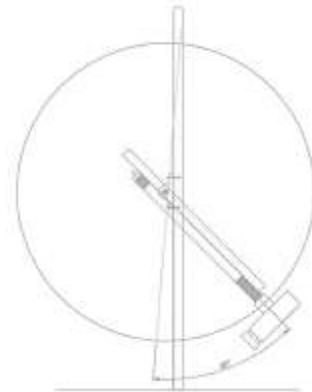


Figura 3.14 Máquina de Charpy

3.7. Ubicación de los elementos en conjunto

Debido a que el muerto debía estar fijo, se decidió colocar a la estructura-muerto fuera del laboratorio. En la Fig. (3.15) se muestra la ubicación del conjunto y sus elementos, que son:

- Armadura (1)
- Columnas (2)
- Muerto (3)
- Máquina de Charpy (4)
- Computadora (elementos de adquisición de datos) (5)
- Acelerómetro (6)

Todos estos elementos tuvieron una posición similar en cada experimento, variando la longitud de la armadura, la cual en cada caso redujo sus módulos; también la posición del acelerómetro fue al centro del claro de la armadura, la columna de lado izquierdo, se modificó de posición conforme al claro, la columna de lado derecho conservó la posición inicial.



Figura 3.15 Elementos en conjunto

Finalmente, la construcción de los elementos tuvo una duración de un año, debido a la complejidad del proceso constructivo, en el siguiente capítulo se explica el protocolo de ensaye.

CAPÍTULO 4. ENSAYE EXPERIMENTAL

Ante la falta de información sobre el diseño sísmico bajo aceleraciones verticales en armaduras tradicionales se elaboró este experimento como se planteó en el CAPÍTULO 1, por lo cual, se considera que este es de ayuda para observar y comprender el comportamiento de las aceleraciones de respuesta de una armadura tradicional, en la Fig. (4.1) se muestra la armadura a escala ensayada.

Más adelante en este capítulo se detalla los protocolos del experimento realizado, así como los instrumentos y manejo empleados, es decir, los modos de empleo físico y de software, donde es necesario, de la máquina de Charpy y el acelerómetro triaxial.

Así, se presenta tanto la metodología de ensaye del experimento de la armadura a escala ante impulsos dinámicos, como la instrumentación empleada en la medición.



Figura 4.1 Colocación del ensaye para las aceleraciones de respuesta

4.1. Descripción del equipo

Se empleó un acelerómetro triaxial Marca: National Instruments N. de serie: 356B21; este tipo de dispositivos, también denominados acelerómetro de tres ejes. Al igual que los de un solo eje o monoaxiales, se emplean para la medición de aceleración y vibración en múltiples sectores de una estructura. La diferencia entre uno y otro tipo radica en que con el primero de éstos se pueden medir simultáneamente la aceleración o vibración en las tres coordenadas, mientras que con los acelerómetros monoaxiales solo registran la información en una dirección. La teoría general del funcionamiento de un acelerómetro ya fue descrita en la sección 2.2.

El modo en el que se instrumentó el acelerómetro fue al centro del claro de la armadura, su base se adhirió al monten transversal de la misma, como se observa en la Fig. (4.2); se procuró que el acelerómetro estuviera a nivel y al centro del monten, alineado con los ejes globales en cada experimento y que estuviera en la misma posición en todos los ensayos.



Figura 4.2. Acelerómetro triaxial

El acelerómetro va conectado a la tarjeta de adquisición de datos, Fig. (4.3), la cual procesa las señales, a su vez, dicha tarjeta es conectada a la computadora donde se recabaron los registros, ver Fig. (4.4).

Se recabaron los datos con ayuda de un programa llamado “DYNVIEW CR” el cual arroja los acelerogramas en los ejes X, Y y Z, así como las TRF (Transformadas

Rápidas de Fourier), comúnmente conocidas como rápidas de Fourier, como se ve en la Fig. (4.5).

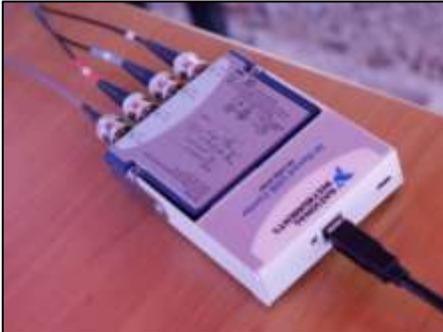


Figura 4.3 Tarjeta de adquisición de datos de velocidad



Figura 4.4 Computadora

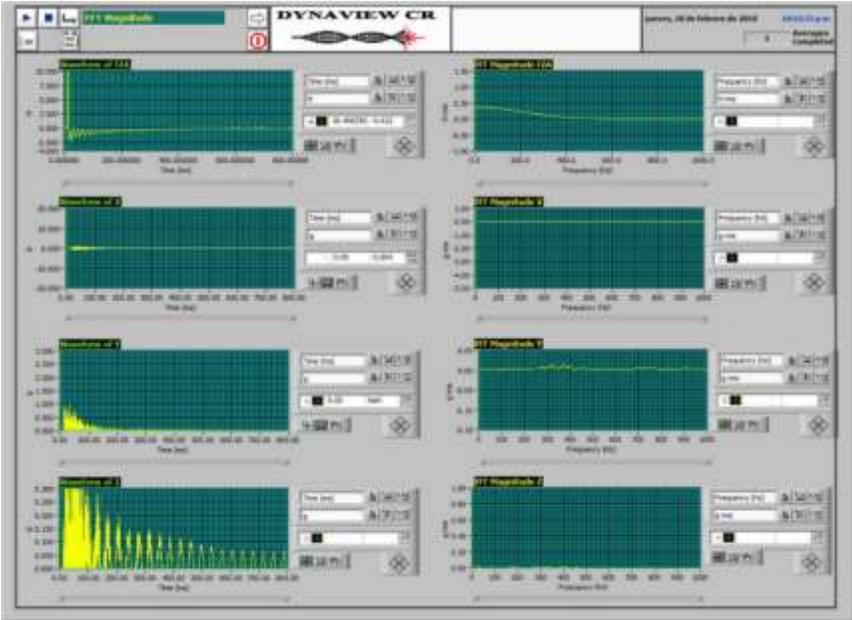


Figura 4.5 Vista general del software DYNVIEW CR

El martillo, marca LIXIE el cual se muestra en la siguiente figura, tiene la función de medir la fuerza de impacto, contiene una pequeña celda en la parte frontal del martillo, así como distintos cabezales de distintos materiales, para excitar diversos materiales en diferentes formas; mide alrededor de 70 cm de altura y su peso es de 11.725 kg. este es la parte fundamental de la máquina de Charpy.



Figura 4.6 Martillo instrumentado marca LIXIE

Los antecedentes de la máquina de Charpy, así como su uso específico se detalla en la sección 2.3, mientras que su proceso de construcción se explicó en la sección 3.6.

En la Fig. (4.7) se muestra cómo se colocó el martillo en la ejecución de la prueba como una máquina de Charpy, la cual solo impacta al muerto de concreto en dirección horizontal. El martillo se ubicó perpendicularmente al muerto y se impactó en una placa ubicada ahogada en el concreto.



Figura 4.7 Máquina de Charpy

4.2. Protocolo de ensaye

Para el desarrollo experimental del trabajo de investigación, se realizaron un conjunto de actividades de diseño en computadora de la armadura en acero, escalamiento, construcción, construcción de una máquina de Charpy para excitación del muerto, estudio experimental, análisis de datos, interpretación de los mismos, propuesta de expresión matemática que contemple el comportamiento de las aceleraciones verticales de diseño de una armadura, entre otras.

El trabajo experimental inicio con el planteamiento de un modelo de computadora que representa el diseño analítico de una armadura real (AR) de acero de una nave industrial. Posteriormente se realizó un escalamiento de la misma, para luego construirla en aluminio. A tal estructura se le denotará en lo sucesivo como (AE).

Teniendo la AE se construyen las columnas de acero, las cuales estaban empotradas a un muerto de concreto a través de placas de unión, como lo establece la Norma NTC de Acero 2017. Tal empotramiento de las columnas al muerto simuló la unión de la estructura al suelo rígido.

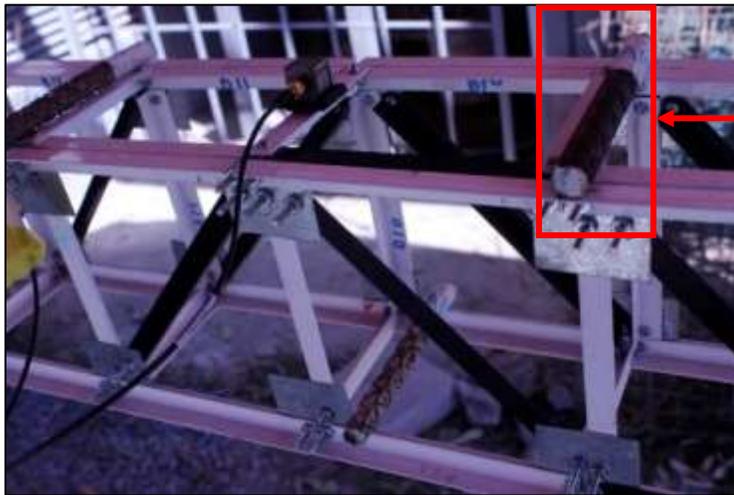
Para las diversas pruebas de medición de aceleración, se excitó la base de la armadura mediante el martillo, con el cual se midió la fuerza de impacto ejercida. Las aceleraciones de la armadura fueron recabadas con ayuda del acelerómetro triaxial que se fijó en medio del claro de la AE. Específicamente, la prueba consistió en manipular tres variables: la masa a excitar, la longitud del claro de la armadura y la magnitud del golpe.

La masa de la armadura se varió de la siguiente manera:

1. Masa original o peso propio (*masa 0*), ver Fig. (4.8).
2. Se agregó una masa puntual simulada, en promedio de 300 g (*masa 1*) en cada nodo, lo cual se muestra en la Fig. (4.9).
3. Se agregó una segunda masa puntual simulada, en promedio de 300 g (*masa 2*) (en total 600 g respecto al peso propio), en cada nodo, ver Fig. (4.10).

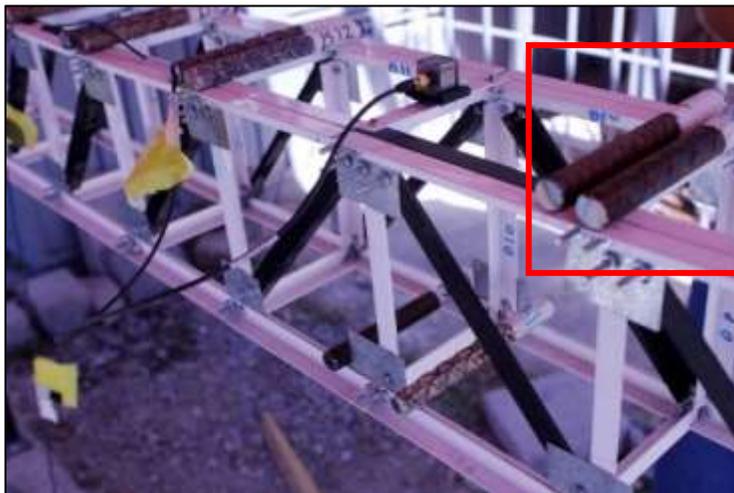


Figura 4.8 Set up del caso 20c+0-5



Masa 1

Figura 4.9 Masa aplicada *masa1*



Masa 2

Figura 4.10 Masa aplicada *masa 2*

La longitud inicial de la armadura fue de 2.84 m, ver Fig. (4.8), el claro de ésta se fue disminuyendo cada 0.28 m, eliminando un par de crujías en cada ensaye, como lo muestra la Fig. (4.11). En cada caso de disminución de longitud se modificaba la masa de acuerdo con los cambios descritos y se realizaban las mediciones correspondientes



Figura 4.11 Set up del caso 2c+0-6

La Máquina de Charpy, aplicó una fuerza de excitación, mediante 7 golpes de diferentes intensidades (es decir, se empleaba diferente ángulo de inclinación para dejar caer el péndulo, como se ilustra en la Fig. (4.12)).



Figura 4.12 Vista del martillo antes del impacto

La aplicación de los 7 golpes se realizó para los tres valores de masa, es decir, *masa 0*, *masa 1*, *masa 2* y cada valor de longitud del claro ensayado, es decir, 2.84 m de longitud original y cada longitud disminuida en 0.28 cm.

De acuerdo con lo anterior, se recabaron en total 210 señales, llamados acelerogramas, para cada uno de los ejes globales, es decir, 630 señales en total, los cuales se emplean para realizar esta investigación.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en los experimentos, los cuales se recabaron con el acelerómetro triaxial en el centro del claro de las armaduras desde las 20 crujías (20c) hasta 2 crujías (2c). A los acelerogramas obtenidos se les aplicó la metodología presentada en la sección 2.7 para su tratamiento, con el análisis de la sección 2.5. La finalidad de este capítulo es presentar el comportamiento de una armadura tradicional sometida a un golpe de ariete en la cimentación. El muestreo de concreto en cilindros no se probó porque no se quería saber la resistencia del muerto, pues este solo fue un medio de transporte de ondas para el experimento.

Los archivos obtenidos del acelerómetro triaxial fueron nombrados respecto los ejes globales X , Y y Z , como se muestra la Fig. (5.1); es importante mencionar que en la Fig. (5.1a) se muestra la asignación de los ejes de acuerdo con el acelerómetro, sin embargo, el programa STAAD asigna nombres a los ejes de manera diferentes, como se muestra en la Fig. (5.1b), por lo que resultó necesario al momento de realizar los cálculos efectuar un renombramiento a ejes locales, x , y y z , para garantizar que los resultados no se alteraran ni confundieran.

En los siguientes subtemas encontraremos los resultados de la secuencia aplicada para analizar la estructura sometida a una excitación, obteniendo así sus características de respuesta ante una acción.

Además, se realizó una calibración del modelo teórico con la ayuda de los resultados obtenidos de las pruebas experimentales.

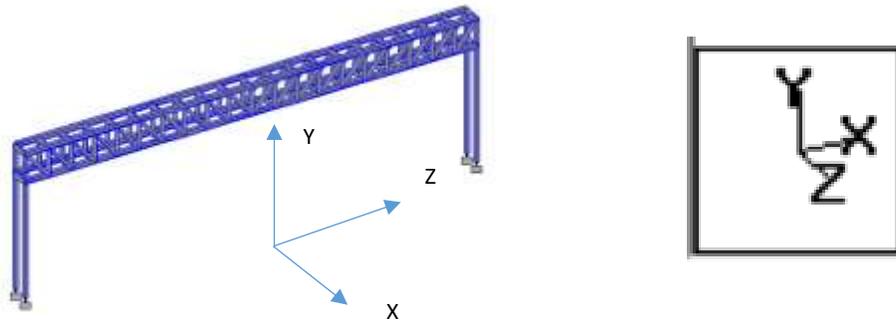


Figura 5.1 Ejes del acelerómetro y del programa STAAD. a) Ejes globales del acelerómetro. b) Ejes locales del programa STAAD

5.1. Frecuencias estructurales experimentales

En esta sección se analizan los registros obtenidos experimentalmente hasta tener una frecuencia estructural aproximado en dirección de los ejes *Y* y *Z* en los ejes globales de cada caso analizado, dichos periodos ayudarán a la calibración del modelo teórico realizado en el programa STAAD.

Las Fig. (5.2) y (5.3) son un ejemplo de los acelerogramas obtenidos experimentalmente, estos son del caso 20c+1-6, para ambos ejes globales; los acelerogramas se sometieron a un filtro pasa-bandas 10-100 Hz, corregidos de línea base como se explicó en la sección de 2.5. Del resto de los ensayos se presentan los más sobresalientes, siendo de 20c hasta 2 c del caso de *masa 0* ya que tiene la misma tendencia que la *masa 1*, en el Anexo I.

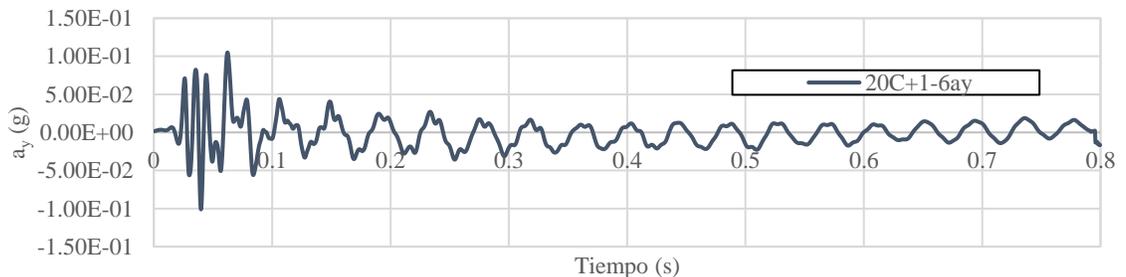


Figura 5.2 Aceleración en Y del caso 20c+1-6

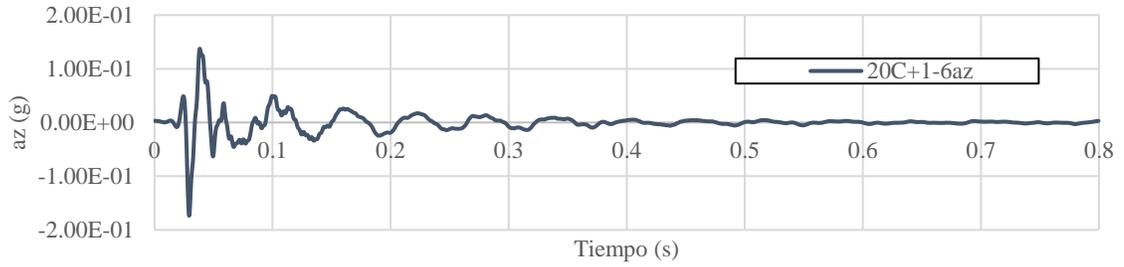


Figura 5.3 Aceleración en Z del caso 20c+1-6

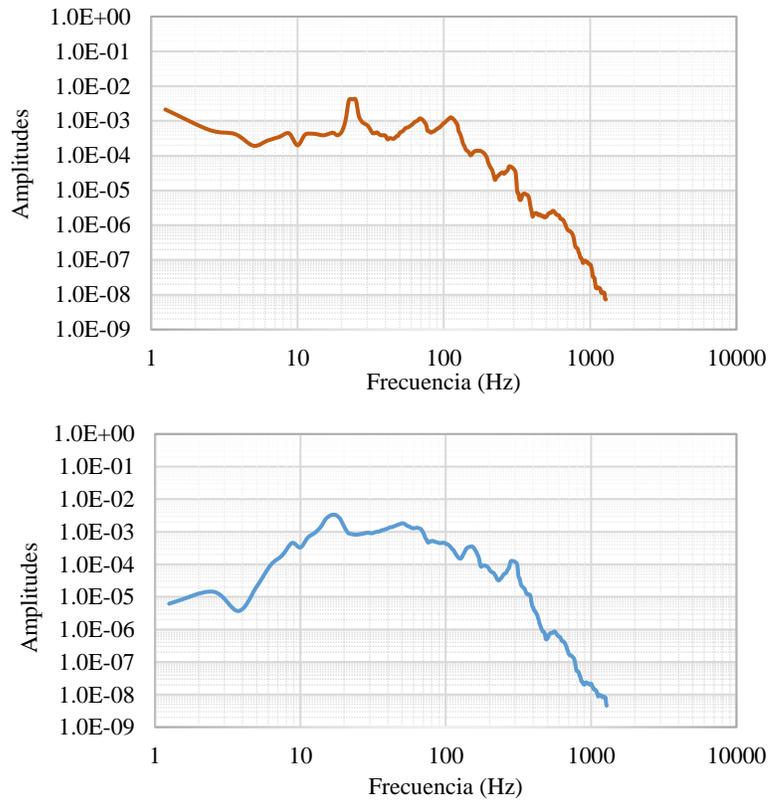


Figura 5.4 Espectro de Fourier del caso 20c+1-6 para los ejes Y y Z respectivamente

En la Fig. (5.4) se muestran los espectros de Fourier obtenidos con los tratamientos anteriormente mencionados, con cada uno de los gráficos se obtuvo la máxima ordenada espectral para obtener la frecuencia estructural, como se explicó en la sección 2.4, el resto de los espectros de Fourier para las demás pruebas se presentan los más representativos en el Anexo 1.

En la Fig. (5.5) se muestra un ejemplo de los cocientes de los espectros de Fourier, es decir, el espectro de amplitud de Fourier verticales (Y) entre el espectro de amplitud de

Fourier horizontal (Z), sin embargo, éstos no los podemos tomar en cuenta para el análisis dinámico de la estructura, ya que el método de Nakamura aplica los cocientes de la aceleración de respuesta en la estructura entre las aceleraciones del suelo.

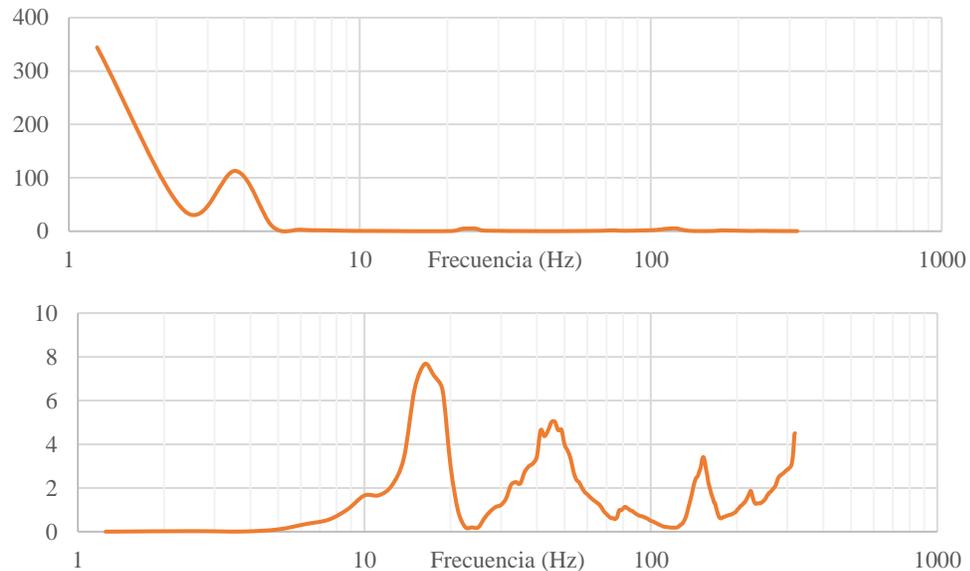


Figura 5.5 Cocientes espectrales de Fourier para el caso 20c+1-6 para los ejes Y y Z respectivamente

En el primer gráfico de la Fig. (5.5) se observa que el primer pico refleja la presencia de contaminación, mientras en el segundo gráfico se observa la amplificación de la señal respecto al eje Z . Sin embargo, debido a que no se puede aplicar la técnica de los cocientes espectrales de Nakamura, se opta por el método para la obtención de los cocientes de las frecuencias estructurales de cocientes de las aceleraciones. Estos cocientes se hicieron con las aceleraciones máximas de respuesta por lo que estos cocientes solo se reflejan la amplificación de la señal respecto a la del eje opuesto.

En la Tabla 5.1 se presenta un ejemplo de los periodos estructurales obtenidos del caso 20+1 para diferentes intensidades, en el cual se observa un valor constante del periodo estructural, por ello se decide tomar el promedio de estos valores como el valor del periodo estructural representativo. Para este caso la frecuencia estructural en el eje Y es de 22.86 Hz y en el eje Z es de 22.5 Hz, por lo que se observa que este valor es constante y suena razonable emplearlo de referencia para la calibración del modelo teórico realizado en el programa STAAD; adicionalmente, el resto de las tablas de los

casos representativos de las frecuencias estructurales obtenido se presentan en Anexo II.

Frecuencia estructural en Z [Hz]		Frecuencia estructural en Y [Hz]	
20+1-6	17.50	20+1-6	23.75
20+1-7	22.50	20+1-7	23.75
20+1-8	18.75	20+1-8	22.50
20+1-9	22.50	20+1-9	22.50
20+1-10	22.50	20+1-10	22.50
20+1-11	23.75	20+1-11	22.50
20+1-12	21.25	20+1-12	22.50
promedio	22.50	promedio	22.86

Tabla 5.1 Resumen de frecuencia por cada intensidad obtenidos a partir de las aceleraciones de respuestas recabadas por el acelerómetro triaxial para el caso 20+1

Al observar que la frecuencia estructural está en el intervalo de 17-24 Hz, se considera que los filtros aplicados son correctos porque permitieron el paso de frecuencias entre 10-100 Hz.

Experimento	Frecuencia estructural en Z [Hz]			Frecuencia estructural en Y [Hz]		
	0 masa	1 masa	2 masa	0 masa	1 masa	2 masa
20	20.00	22.50	40.00	28.75	22.50	20.00
18	18.75	19.31	31.25	32.50	28.75	25.00
16	19.03	25.16	40.00	35.00	31.25	27.50
14	23.75	22.97	22.50	50.00	41.25	32.50
12	22.50	22.50	22.50	32.50	26.25	23.75
10	26.41	26.72	26.25	72.50	52.50	51.25
8	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50
6	30.00	37.73	28.75	30.00	28.75	88.75
4	28.75	28.75	29.38	38.13	39.38	78.75
2	30.63	31.25	30.00	31.25	31.25	30.00

Tabla 5.2 Resumen de los promedios de los periodos obtenidos a partir de las aceleraciones de respuestas recabadas por el acelerómetro triaxial

Por otra parte, en la Tabla 5.2 se presenta el resumen de los valores promedios de los periodos estructurales en los ejes Y y Z de cada caso de masa, es decir, para *masa 0*, *masa 1* y *masa 2*, y cada cantidad de crujías desde 20c a 2c.

Se puede observar en la misma tabla que los valores de los periodos estructurales en el eje Z son más estables que los del eje Y, esto quiere decir que como las columnas son las mismas, la rigidez lateral es la misma y por ende es estable, por otra parte, la frecuencia estructural en el eje Y, que es más variable, se considera que esta condición es debida a la presencia de contaminación ya que los valores de los periodos son muy elevados, por lo que se requiere de una corrección de los valores resaltados en la tabla con color amarillo. Esta acción se deben realizar modelos en el programa STAAD para ver qué periodo arroja con cada caso de crujías.

Teniendo el resultado de la frecuencia estructural experimental se realiza la calibración del modelo analíticos en el programa STAAD con las características del experimento 20c+1, modelo al que se colocó una varilla con masa aproximada de 125 g, debido esto, en el programa se simuló las características reales, colocando una carga muerta colocada puntual en cada uno de los nodos. En la Fig. (5.6) se presenta el modelo analítico real en el programa STAAD.

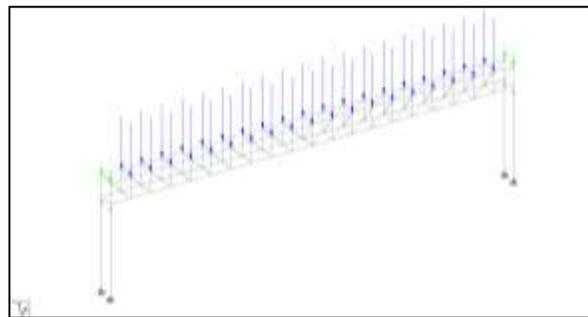


Figura 5.6 Modelo de STAAD con las cargas aplicadas del caso *masa 1*

Teniendo estas características se aplica el análisis dinámico en el programa para estimar el periodo estructural en y, posteriormente se aplica el análisis en dirección vertical a la armadura. En la Fig. (5.7) se presenta el espectro de diseño empleado en este análisis dinámico el cual corresponde al espectro de respuesta de CFE para el sitio de Puebla.

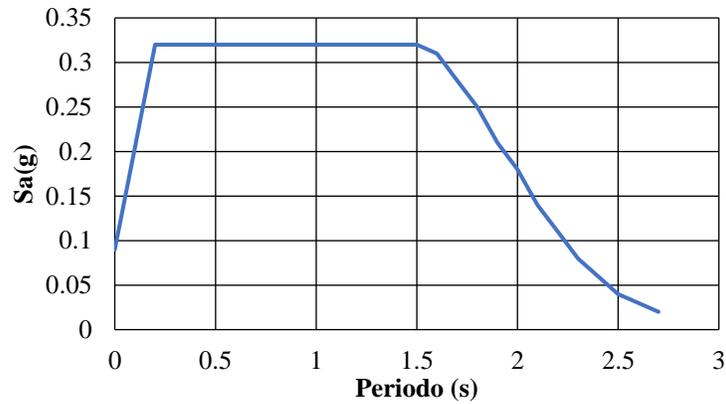


Figura 5.7 Espectro de diseño para zona sísmica B, $c=0.3$, $T_a=0.2$, $T_b=1.4$, $r=0.66$

Se obtuvo el modo fundamental de vibración en forma analítica a través del mismo software, como se observa en la Fig. (5.8), y en la Tabla 5.3 se presenta la frecuencia estructural obtenida en el eje y, cuyo valor es de 15.195 Hz, este resultado no corresponde al del caso 20c+1 establecido experimentalmente y presentado en la Tabla 5.2 (resaltado en color violeta), con valor de 22.5 Hz, por lo que es necesario realizar un ajuste para la calibración del modelo.

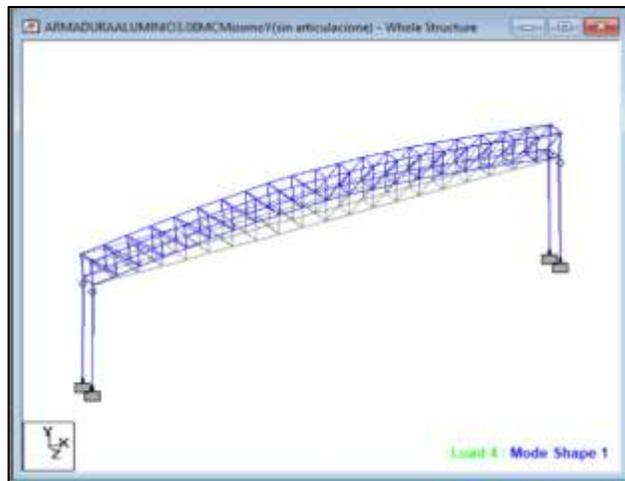


Figura 5.8 Modo 1 de la estructura teórica en el programa STAAD.

	Frecuencia Hz	Periodo (s)	Participación Y %
1	15.195	0.066	55.737

Tabla 5.3 Periodo de la estructura teórica calibrado obtenida del programa STAAD

5.2. Calibración del modelo por medio de la rigidez experimental

En esta sección se calibro el modelo de STAAD modificando el módulo de elasticidad, esto se realiza empleando el valor de la rigidez obtenida experimentalmente en la sección anterior. El objetivo es igualar el valor de la frecuencia estructural en dirección Y , obtenida por medio de los registros del acelerómetro contra el valor que se obtiene del programa STAAD.

Para igualar la frecuencia estructural sobre el eje Y obtenida con el acelerómetro, con el valor obtenido del programa, se requiere calcular el producto del módulo de elasticidad con el momento de inercia (EI). Para esto se considera el hecho que debido a que la armadura de estudio está apoyada por articulación parcialmente rígida sobre las columnas, pero esta ecuación es para apoyos articulados, dicha ecuación es para el cálculo los desplazamientos es posible emplear la siguiente ecuación:

$$\Delta = \frac{P L^3}{48 E I} \quad (5.1)$$

donde Δ es el desplazamiento, P es la carga aplicada, L es la longitud del claro, E es el módulo de elasticidad o módulo de Young, del material empleado en la armadura e I es el momento de inercia de la misma, la cual se emplea para el cálculo de deflexiones en una viga simplemente apoyada, con la cual se realizó la calibración de los modelos, y utilizando la Ley de Hooke, Ec. (5.2), la cual establece que:

$$\Delta = \frac{P}{k} \quad (5.2)$$

donde k es la rigidez mediante un cálculo directo se encuentra que:

$$E I = \frac{L^3 k}{48} \quad (5.3)$$

Al cambiar las condiciones de apoyo en el programa STAAD de simplemente apoyada o empotrada, no cambia la frecuencia estructural, es decir, que la condición de los apoyos no tuvo influencia en el periodo estructural; por lo que se varía el valor del módulo de elasticidad del material para alcanzar la calibración, el valor obtenido difiere a los valores establecidos teóricos del E mostrados en la Tabla 5.4.

Propiedades	Aluminio
Módulo de elasticidad, kg/cm ²	700000
Módulo de rigidez cortante, kg/cm ²	280000
Módulo de Poisson	0.33
Peso, kg/cm ³	0.0027
Coefficiente de expansión lineal	23x10-5

Tabla 5.4 Propiedades del aluminio

Se decidió modificar el módulo de elasticidad principalmente por que el aluminio empleado se usa para elaborar cancelería y elementos no estructurales. Comúnmente el aluminio tiene pocas aleaciones y regularmente se usa puro, pero en el material empleado en la construcción de la armadura se desconoce la cantidad de aluminio que contenga, de esta forma se realiza un procedimiento de iteración en el programa STAAD el cual contempla los siguientes pasos:

- Se estableció un nuevo material llamado “Aluminio”, el cual tenía las mismas características que el aluminio predeterminado en el programa, los cuales son las siguientes características:

Módulo de Young: 7 000 000 ton/m²

Razón de Poisson: 0.33

Densidad: 2.71 ton/m³

Coefficiente térmico: 0.000 023

Amortiguamiento crítico: 0.03

Módulo de cortante: 0 ton/m²

- Se aplicó una fuerza puntual de 0.1268 kg en cada nodo (la cual es igual a la aplicada en el caso de *masa 1*).
- Posteriormente, se hizo una iteración con el valor del Módulo de Young, hasta obtener el mismo desplazamiento que experimentalmente se obtuvo, cuyo valor aproximado es $\Delta = -0.000 74$ m.

Los resultados se muestran en la Tabla 5.5.

N. de iteración	E (ton/m ²)	Desplazamiento mm
1	6 964 662	-0.199
2	6 000 000	-0.231
3	2 500 000	-0.545
4	2 000 000	-0.677
5	1 500 000	-0.894
6	1 859 000	-0.727

Tabla 5.5 Iteración del Módulo de elasticidad y el desplazamiento obtenido en STAAD

Al final, se obtuvo una deflexión teórica de $\Delta = -0.000\ 74$ m contra una deflexión experimental de $-0.000\ 727$ m obtenida en la siguiente sección. En la Fig. (5.9) se observa el valor de $E = 1859\ 000$ kg/m² como E es más aproximado a nuestro valor obtenido teóricamente.



Figura 5.9 Datos introducidos para el empleo del módulo de elasticidad del aluminio

En la Fig. (5.10) se muestra el primer modo de vibración empleando el nuevo valor de E . El valor de frecuencia es igual a 22.66 Hz (para los parámetros mostrados en la tabla 5.6), que es cercano al valor obtenido por las señales del acelerómetro, de 22.5 Hz; según lo planteado por [16], el rango de tolerancia entre el periodo obtenido teóricamente y el periodo obtenido por las señales del acelerómetro se recomienda que debe ser menor que 0.5 Hz, por lo tanto se concluye que el modelo analítico está calibrado a través del valor propuesto de E el cual se obtuvo de los valores experimentales k .

Sin embargo, el valor obtenido de E no se puede tomar para la realización de los cálculos, ya que el valor aun es el producto de EI , esto se obtuvo así ya que es una sección en cajón y su grado de complejidad para calcular su inercia es mayor, por lo que se decidió introducir en el programa STAAD en el valor de E como EI para fines ingenieriles únicamente para esta sección de la tesis, como se calculó en la Ec. (5.3).

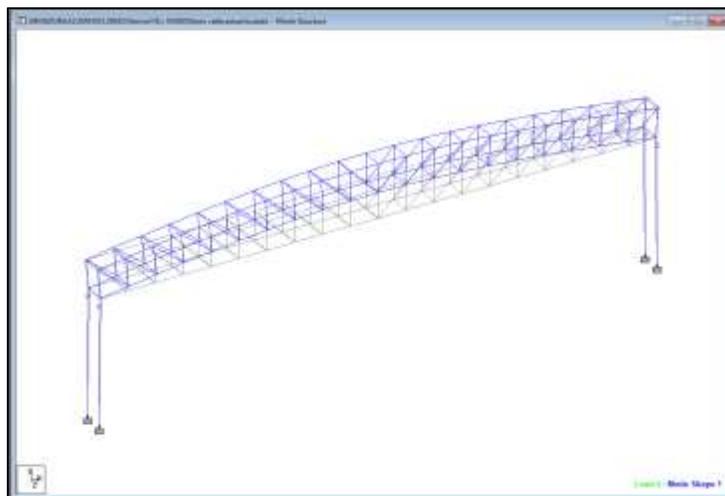


Figura 5.10 Modo 1 de la estructura teórica calibrado en el programa STAAD

	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Participación Y %
1	22.664	0.044	55.839

Tabla 5.6 Periodo de la estructura teórica obtenida del programa STAAD calibrado

5.3. Rigidez experimental

Durante el trabajo de investigación de esta tesis se realizó la prueba de la rigidez experimental debido a que, como se comentó anteriormente, en el programa STAAD al cambiar las condiciones de apoyo de simplemente apoyada o empotrada no cambia significativamente el valor de la frecuencia estructural.

El objetivo de la prueba fue la obtención del valor experimental del k de la armadura a escala para usarlo en el modelo analítico debido a que se empleó aluminio no estructural y no hay estudios o literatura sobre el módulo de elasticidad.

Las condiciones del experimento fueron las siguientes:

- Se realizó el experimento dentro del laboratorio de estructuras para la protección del equipo de instrumentación externa.
- Se omitió la unión de empotramiento de las columnas a la cimentación debido a que las cargas empleadas eran de poca magnitud, provocando reacciones mínimas en los apoyos, así también, un problema fue el trasladar el muerto, ya quedó enterrado en el suelo.
- Para registrar los desplazamientos se instrumentó un transductor de desplazamiento¹ de 25 mm CDP-25 en el centro del claro de la armadura, ya que las cargas se aplicaron en el mismo punto, esto se puede observar en la Fig. (5.11).
- Las cargas aplicadas fueron varillas con diferentes diámetros y longitudes; en la Fig. (5.12) se muestran las masas aplicadas en el experimento.

La rigidez (k) se define matemáticamente como la fuerza necesaria para producir un desplazamiento unitario, por lo tanto, para encontrar la rigidez del modelo se le inducirá una carga vertical en el centro del claro (P) y se medirán físicamente los desplazamientos (Δ) en esta posición, la ecuación empleada para encontrar la rigidez es la Ec. (5.2).

En la Tabla 5.7 se presentan los datos recabados mediante el equipo de instrumentación, los cuales corresponden a desplazamientos en milímetros provocados por la carga aplicada mostrada en la Fig. (5.12), en dicha tabla también se encuentran los desplazamientos se

¹ El transductor de desplazamiento es un instrumento para medir las deformaciones de los elementos de manera más exacta. El laboratorio de estructuras cuenta con sensores de deformación unitaria a través de galgas de deformación (o strainage), transductores de desplazamiento o LVDT (linear variable differential transformer), 16 piezas de 25 mm, 2 de 50 mm, 2 de 100 mm y uno de 500 mm, dos sensores de fuerza o celdas de carga las cuales miden las fuerzas actuantes durante el experimento, un colector de información o Datalogger de 30 canales, un sistema de cómputo y el software Visual Log para visualizar y archivar, en tiempo real, los datos de deformación, desplazamiento y carga del ensaye. Este equipo se denomina Tokyo Sokky Kenkyujo, Todo el equipo mencionado se empleó en el ensaye y toma de datos.

transformaron a metros, después se obtuvo su valor absoluto para la aplicación de la ecuación de la rigidez anteriormente descrita.

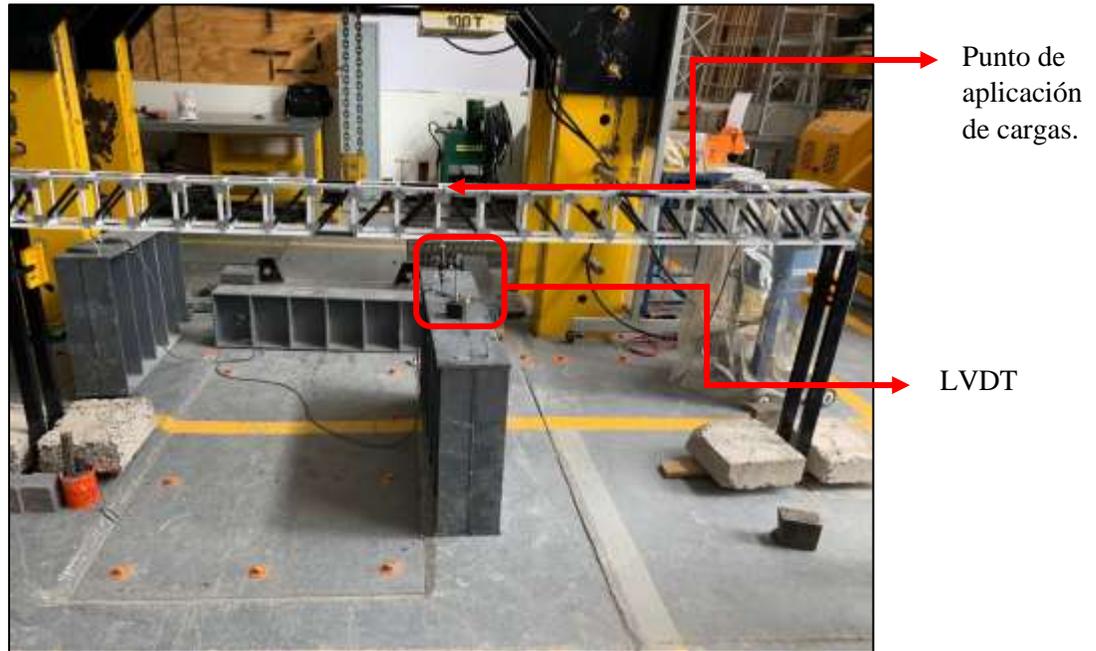


Figura 5.11 Colocación del ensaye para obtención de rigidez experimental



Figura 5.12 Masa aplicada al experimento de rigidez

De los datos obtenidos en la Tabla 5.7 se usaron los valores de las cargas aplicadas que corresponden al caso 1 ($masa 1 = 2.63\text{kg}$), debido a que corresponde a condiciones de una estructura existente.

Desplazamiento Δ_{κ} (mm)	Desplazamiento Δ_{κ} (m)	Desplazamiento absoluto $ \Delta_{\kappa} $ (m)	Carga aplicada P (kg)	k (kg/cm)
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
-0.01600	-0.00002	0.00002	0.01600	10.00000
-0.29400	-0.00029	0.00029	1.67500	56.97279
-0.57200	-0.00057	0.00057	2.15500	37.67483
-0.73800	-0.00074	0.00074	2.63000	35.63686
-1.01400	-0.00101	0.00101	3.11000	30.67061
-1.77000	-0.00177	0.00177	3.59500	20.31073
-1.86000	-0.00186	0.00186	4.06500	21.85484
-2.01000	-0.00201	0.00201	4.52000	22.48756
-1.77000	-0.00177	0.00177	3.59500	29.45103
-1.77000	-0.00177	0.00177	3.59500	23.63800

Tabla 5.7 Resumen de prueba de rigidez

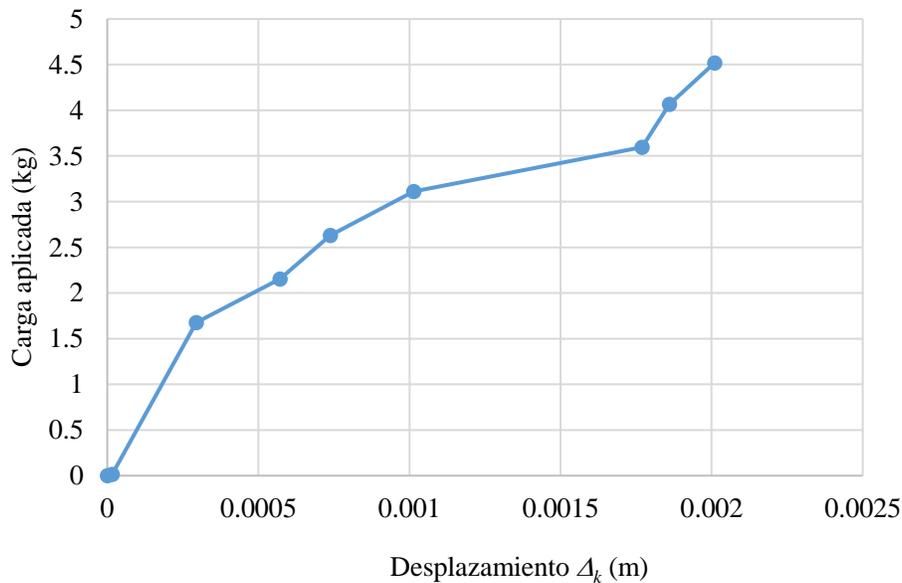


Figura 5.13 Relación carga-desplazamiento experimental obtenida

En la Fig. (5.13) se muestra la relación carga-desplazamiento del modelo en aluminio, se observa que el aluminio no tiene un comportamiento tan lineal, pero para fines ingenieriles supondremos que este comportamiento es lineal. El valor de rigidez obtenido

experimentalmente para el modelo de 20 crujías fue $K_{20Alum}=35.63$ kg/cm, que se obtiene aplicando la Ec. (5.2) a los valores obtenidos experimentalmente. Con este valor se hace una aproximación del módulo de elasticidad que veremos en la siguiente sección.

El valor de $K_{20Alum}=35.63$ kg/cm fue comparado con un modelo analítico en el programa STAAD recreando las condiciones reales del experimento, dando como resultado $K_{20AlumSTAAD}=33.04$ kg/cm, lo cual indica una buena aproximación por parte de los modelos analíticos. Se decide usar el valor de K_{20Alum} ya que las pruebas experimentales son la base de esta investigación.

5.4. Rigidez calibrada para los modelos teóricos de acero.

En esta sección se obtiene la rigidez calibrada de los modelos teóricos de acero para cada claro de armadura que se emplearán en las ecuaciones que aproximan los cocientes de aceleraciones del siguiente capítulo. Este paso se realiza debido a que en este proyecto de investigación no se pudo realizar modelos analíticos detallados para todos los casos de claros de la armadura de acero.

La rigidez calibrada de los modelos teóricos de acero (K_{ci}) se calcula con ayuda del factor de amplificación de rigidez (F_{ki}) obtenido con la siguiente ecuación:

$$F_{ki} = \frac{k_i}{K_{20Alum}} \quad (5.4)$$

Donde:

k_i = rigidez analítica obtenida de cada modelo de aluminio,

K_{20Alum} = rigidez experimental obtenida del modelo de 20 crujías de aluminio,

Para la obtención de la rigidez calibrada en los modelos de acero se empleó la siguiente ecuación:

$$K_{ci} = K_{20Ac} F_{ki} \quad (5.5)$$

donde K_{20Ac} es la rigidez analíticamente obtenida mediante el programa de cómputo STAAD para el modelo de 20 crujías de acero.

Para calcular la rigidez analítica, para cada modelo de aluminio, es necesario primero determinar EI , la cual se determina mediante la Ec. (5.6).

$$EI = \frac{L^3 P}{48 \Delta} = \frac{L^3 K_{20Alum}}{48} \quad (5.6)$$

La ecuación anterior se obtiene a partir de la ecuación para el cálculo de desplazamientos al centro del claro de una viga simplemente apoyada con una carga concentrada en el centro, de donde se despeja EI y se sustituye el valor experimentalmente de K_{20Alum} , para una longitud de claro 284 cm.

El valor de EI calculado de esta forma, para los correspondientes datos del ensaye, es igual a 17 006 430.53 kg·cm². Es importante mencionar que dicho valor es constante ya que todos los casos experimentales se realizaron con el mismo material y las mismas secciones.

Posteriormente se calcula el valor de la rigidez calibrada de cada modelo de aluminio (k_i) partiendo de la Ec.(5.6) y haciendo P como un valor unitario, para facilitar la obtención de los factores de la rigidez, con lo que se obtiene el valor constante de $48 EI = 816 308 665.4$ kg·cm².

Con lo anterior, para obtener los valores de la rigidez, se emplea la siguiente ecuación

$$k_i = \frac{48EI}{L^3} \quad (5.7)$$

en donde la única variable dependiente es la longitud del claro para cada caso, por lo que al sustituir este dato en la Ec. (5.7) se encuentran los respectivos valores de la rigidez.

Los resultados obtenidos a partir de la anterior ecuación para la rigidez calibrada de cada modelo de aluminio se presentan en la Tabla 5.8. A continuación se calculan los factores de rigidez (F_{ki}) con la Ec. (5.4) y los resultados se presentan en la Tabla 5.9.

Posteriormente se obtuvo la rigidez vertical en el centro del claro de la armadura en acero de 20 crujías en el programa STAAD, aplicando la Ec. (5.2) y colocando una carga teórica de $P=0.002491$ ton por cada nodo; se obtuvo una deformación al centro del claro de 0.207 mm y, en consecuencia, una rigidez teórica de $K_{20Ac}=218.36$ kg/cm.

En la Tabla 5.9 se presentan los valores buscados de la rigidez calibrada para los modelos en acero K_{ci} .

Caso	Longitud (cm)	Longitud (cm ³)	1/k	k_i [kg/cm]
20c	284.50	23027501.13	0.0282	35.45
18c	253.70	16329068.15	0.0200	49.99
16c	225.60	11481993.22	0.0141	71.09
14c	197.30	7680354.32	0.0094	106.29
12c	168.90	4818245.77	0.0059	169.42
10c	142.30	2881473.97	0.0035	283.30
8c	114.40	1497193.98	0.0018	545.23
6c	84.40	601211.58	7.37E-04	1357.77
4c	56.40	179406.14	2.20E-04	4550.06
2c	28.30	22665.19	2.78E-05	36015.97

Tabla 5.8 Rigidez de cada caso por método experimental

Caso	F_{ki} Factor de amplificación por rigidez	K_{ci} calibrada de acero STAAD en y [kg/cm]	k de STAAD en z [kg/cm]
20	1.0	218.4	452.38
18	1.4	307.9	452.38
16	2.0	437.9	452.38
14	3.0	654.7	452.38
12	4.8	1043.6	452.38
10	8.0	1745.0	452.38
8	15.4	3358.5	452.38
6	38.3	8363.6	452.38
4	128.4	28027.4	452.38
2	1016.0	221850.6	452.38

Tabla 5.9 Rigidez teórica de cada caso por método teórico (STAAD)

Los valores de rigidez calibrados se emplean en el siguiente capítulo para realizar una relación entre la rigidez y los cocientes de aceleraciones máximas de respuesta las cual nos

ayudaran a comprender el comportamiento de la armadura entre excitaciones de tipo impulso donde se varia las longitudes de claro.

5.5. Cálculo de periodos estructurales de las armaduras de acero

En esta sección se obtuvo el periodo estructural de las armaduras de acero desde 20 a 2 crujiás con el objetivo de proponer en el siguiente capítulo una ecuación que aproxime los cocientes de aceleraciones máximas de respuesta en función del periodo estructural vertical de las armaduras. Los periodos se obtienen partiendo de la ecuación del periodo estructural para sistemas de un grado de libertad mostrada en la siguiente ecuación:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (5.8)$$

Esta ecuación se modificó para extrapolar los periodos estructurales de todos los casos de armaduras en acero debido a que solo se contó en esta investigación con el modelo analítico de la armadura de acero de 20 crujiás (T_{a20c}), así también, no se contaba con el valor de la masa de cada caso por lo cual se usó un factor de correctivo (F_{tm}) que se aplica cada vez que se descuentan dos crujiás en la armadura; El valor de la rigidez (k) de cada caso se sustituye por el factor de rigidez (F_{ki}), y el valor de la masa (m) se considera unitario y se obtiene como resultado la siguiente ecuación:

$$T_{aic} = T_{a20c} \cdot F_{tm} \sqrt{\frac{1}{F_{ki}}} \quad (5.9)$$

El valor F_{tm} se obtuvo a partir de conseguir el periodo estructural vertical de un modelo analítico en el programa STAAD de la armadura de 18 crujiás en acero, al contar con este valor se calculó el porcentaje de error con la ecuación:

$$\%error = \frac{T_{a18c} - T_{a18STAAD}}{T_{a18c}} \quad (5.10)$$

Donde:

T_{a18c} =Periodo estructural de la armadura de acero del caso de 18c calculado con el Ec. (5.9)

sin el F_{tm} ,

$T_{a18STAAD}$ = Periodo estructural de la armadura de acero del caso de 18c obtenido por medio de STAAD.

Al aplicar la anterior ecuación se obtuvo un porcentaje de error del 11%, por lo que se iteró el valor de F_{tm} hasta encontrar que 0.88 da un porcentaje de error del -0.7%, el cual se considera aceptable.

En resumen, la Ec. (5.8) convirtió en un factor de reducción simplificado para obtener los periodos estructurales de todos los casos de crujías a partir del único caso estudiado profundamente a través de los programas sofisticados de cómputo en la Ec. (5.9).

En la siguiente tabla se muestran los factores calculados de $F_{tm} \sqrt{\frac{1}{F_{ki}}}$ así como el periodo estructural de cada caso T_{aic} .

N. de crujías	T_{aic} (s) STAAD de acero	Factor de periodos
20	0.212	1.000
18	0.157	0.842
16	0.132	0.706
14	0.108	0.578
12	0.085	0.457
10	0.066	0.354
8	0.048	0.255
6	0.030	0.162
4	0.016	0.088
2	0.006	0.031

Tabla 5.10 Obtención del periodo estructural en el eje y de la armadura de acero

5.6. Amortiguamiento

En esta sección se presenta el amortiguamiento de la armadura a escala fabricada en aluminio con fundamentos de la sección 2.6. El cálculo de dicho amortiguamiento se realizó únicamente para el acelerograma del caso 20c+0-6 en la dirección Z, ya que en este caso era posible identificar los valores picos de cada amplitud, como se muestra en la Fig. (5.14). A este acelerograma se le realizó el tratamiento de señales el cual consiste en, corrección de línea base y filtro pasa bandas 10-100 Hz.

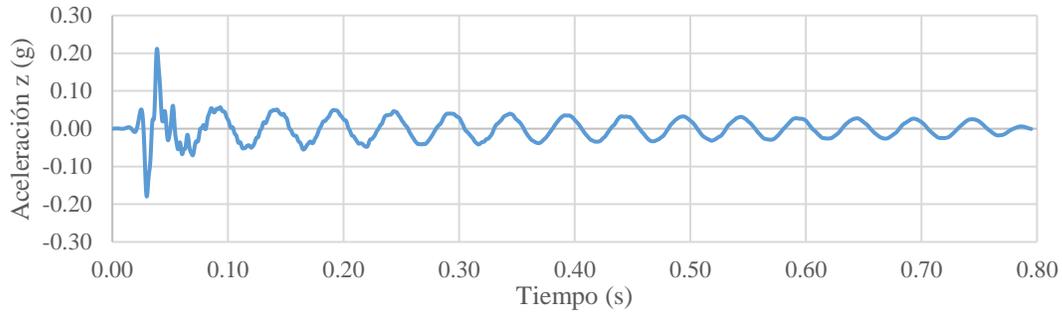


Figura 5.14 Acelerograma para el caso 20c+0-6

En la Tabla 5.11 se presentan los resultados para determinar un valor del porcentaje crítico de amortiguamiento que en promedio resulta ser $\xi = 2.88\%$.

En el manual de diseño de obras civiles de diseño por sismo, en la sección 3.4.3 tabla 4.1 [17], se establece que el amortiguamiento de una estructura ligera de acero atornilladas debe ser del 3%. El porcentaje de amortiguamiento obtenido en los experimentos de esta investigación, $\xi = 2.88\%$, es muy parecido al que dicta el mencionado manual, del 3 %, por lo que el comportamiento de la armadura a escala se puede considerar igual a la de una armadura acero real con conexiones atornilladas.

	Posición inicial (g)	Posición final (g)	Decremento logarítmico	Factor de Amortiguamiento
	X_i	X_f	$\delta = \ln \frac{x_1}{x_2}$	$\xi = \frac{\delta}{2\pi}$
1	0.0516	0.0504	0.02	0.00
2	0.0504	0.0479	0.05	0.01
3	0.0479	0.0454	0.05	0.01
4	0.0454	0.0367	0.21	0.03
5	0.0367	0.0385	-0.05	-0.01
6	0.0385	0.0318	0.19	0.03
7	0.0318	0.029	0.09	0.01
8	0.029	0.0319	-0.10	-0.02
9	0.0319	0.028	0.13	0.02
10	0.028	0.0269	0.04	0.01
11	0.0269	0.0257	0.05	0.01
12	0.0257	0.0265	-0.03	0.00
13	0.0265	0.0243	0.09	0.01
14	0.0243	0.00408	1.78	0.28
		Promedio		2.88%

Tabla 5.11 Obtención de amortiguamiento en base al acelerograma del caso 20c+0-6

CAPÍTULO 6. OBTENCIÓN APROXIMADA DE LOS COCIENTES DE ACELERACIÓN

En este capítulo se presentan las ecuaciones que aproximan el valor de la aceleración vertical máxima en función de la aceleración horizontal máxima en la parte central del claro de la armadura la cual ha sido el objetivo principal de esta tesis. La propuesta se fundamentó en los reglamentos de diseño sismorresistente y artículos científicos relacionados al tema.

El objetivo de las ecuaciones es estimar el valor de las fuerzas sísmicas verticales en el centro del claro útil para el diseño dinámico de armaduras tradicionales desplantadas en suelo firme y con columnas robustas.

Las ecuaciones que se presentan están en función de la aceleración horizontal, rigidez vertical de la armadura, la rigidez lateral de las columnas y periodo estructural. Se presentan tres propuestas, la primera en función de la rigidez vertical de la armadura, mientras que la segunda está en función del cociente de las rigideces vertical y lateral de la armadura; la última propuesta se encuentra en función del periodo estructural vertical; al final se determina la propuesta que resulta más adecuada para aproximar las aceleraciones verticales de diseño para armaduras de naves industriales desplantadas en suelo duro.

Antes de dar principio a las propuestas anteriormente mencionadas, en las secciones subsecuentes, se discute un punto importante sobre los cocientes de aceleraciones debido a que se observa, durante esta investigación, que éstos encuentran influenciados por la intensidad de la excitación; sin embargo, para fines prácticos de ingeniería, los mencionados cocientes se consideran independientes de la intensidad para las ecuaciones que aproximan dichos valores.

La influencia de la excitación en los cocientes de aceleraciones se puede calcular mediante el ajuste de las líneas de tendencia que relacionan los cocientes de las aceleraciones a_{my}/a_{mx} contra la intensidad de golpe de los datos obtenidos de las secciones anteriores, se obtienen diferentes gráficos de los cuales se extraen la pendiente m , y la ordenada al origen

b , de cada línea de tendencia basadas en la teoría de la sección 2.8., como se muestra en la siguiente sección.

En la Tabla 6.1 a la Tabla 6.3 se presentan los resúmenes del promedio de los cocientes de las aceleraciones de los caso de 20 crujía hasta la de 2 crujía, además dichas tablas contienen las rigideces verticales de la armadura K_Y y la rigidez lateral de las columnas K_X , así como su cociente K_Y/K_X . En la Tabla 6.1 se presenta el caso *masa 0*, el cual es el más relevante para nuestro estudio ya que la carga muerta aplicada es la más próxima a aquella que tendría una armadura durante un sismo.

Crujías	L	a_{my}/a_{mx}	K_Y	K_X	K_Y/K_X	m	b
20	284.500	0.610	218.4	452.380	0.5	0.009	0.662
18	253.700	0.600	307.9	452.380	0.7	0.011	0.760
16	225.600	0.490	437.9	452.380	1.0	0.018	1.000
14	197.300	0.410	654.7	452.380	1.4	0.026	1.280
12	168.900	0.330	1043.6	452.380	2.3	0.014	0.640
10	142.300	0.260	1745.0	452.380	3.9	0.012	1.380
8	114.400	0.210	3358.5	452.380	7.4	0.019	1.360
6	84.400	0.270	8363.6	452.380	18.5	0.013	1.180
4	56.400	0.520	28027.4	452.380	62.0	-0.015	1.960
2	28.300	0.260	221850.6	452.380	490.4	0.005	0.860

Tabla 6.1 Resumen de los cocientes de aceleraciones máximas con su respectiva rigidez del caso *masa 0*

En la Tabla 6.2 se presenta el mismo contenido mencionada anteriormente, a diferencia de que esta corresponde al caso *masa 1*, en Tabla 6.3 se presenta el caso *masa 2*.

Crujías	L	a_{my}/a_{mx}	K_Y	K_X	K_Y/K_X	m	b
20	284.500	0.620	218.360	452.380	0.483	-0.003	0.722
18	253.700	0.560	307.935	452.380	0.681	0.003	0.475
16	225.600	0.490	437.928	452.380	0.968	-0.007	0.676
14	197.300	0.410	654.694	452.380	1.447	0.018	0.029
12	168.900	0.380	1043.592	452.380	2.307	0.000	0.378
10	142.300	0.330	1745.039	452.380	3.857	-0.005	0.459
8	114.400	0.180	3358.473	452.380	7.424	0.007	0.177
6	84.400	0.250	8363.587	452.380	18.488	-0.019	0.916
4	56.400	0.390	28027.385	452.380	61.955	0.007	0.206
2	28.300	0.250	221850.592	452.380	490.408	0.000	0.248

Tabla 6.2 Resumen de los cocientes de aceleraciones máximas con su respectiva rigidez del caso *masa 1*

En la Fig. (6.1) se muestra un ejemplo de dichas líneas de tendencias obtenidas del caso de 20 crujías, con las variables de masas aplicadas, en dicha figura observamos que las líneas de tendencias de *masa 0* y *masa 1* tienen pendiente similar, pero con diferentes ordenadas al

origen, pero con diferentes ordenadas al origen, mientras la *masa 2* es muy diferentes ambos valores y significativamente mayor.

Crujías	L	a_{my}/a_{mx}	K_Y	K_X	K_Y/K_X	m	b
20	284.500	0.710	218.360	452.380	0.483	-0.006	0.861
18	253.700	0.840	307.935	452.380	0.681	0.008	0.475
16	225.600	0.470	437.928	452.380	0.968	-0.008	0.737
14	197.300	0.360	654.694	452.380	1.447	-0.004	0.494
12	168.900	0.400	1043.592	452.380	2.307	0.003	0.323
10	142.300	0.470	1745.039	452.380	3.857	0.003	0.325
8	114.400	0.340	3358.473	452.380	7.424	0.003	0.171
6	84.400	0.240	8363.587	452.380	18.488	-0.015	0.673
4	56.400	0.330	28027.385	452.380	61.955	0.005	0.179
2	28.300	0.270	221850.592	452.380	490.408	0.001	0.236

Tabla 6.3 Resumen de los cocientes de aceleraciones máximas con su respectiva rigidez del caso *masa 2*

Por otro lado, se debe recordar que para la armadura de aluminio del caso de *masa 0* equivale a una armadura de acero simulando estar sujeta únicamente a su peso propio lo cual es cercano a las condiciones de peso que tendría la estructura durante la ocurrencia de un sismo, mientras que el peso del caso *masa 1* tendría una baja probabilidad de ocurrencia durante un sismo, sin embargo, el tercer caso es muy posible que no suceda en condiciones reales y se realiza como ejercicio académico.

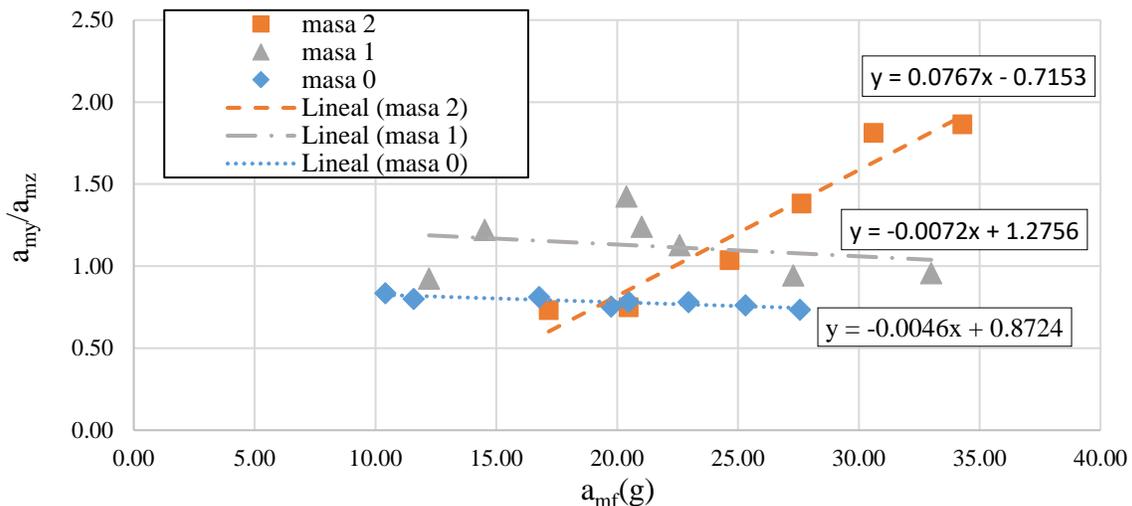


Figura 6.1 Relación intensidad de golpe y cociente de máxima aceleración caso 20c

La pendiente de la línea de tendencia de los casos *0* y *1* es muy pequeña y no hay gran influencia en la relación cocientes-intensidad y la única que tiene un valor significativo es la

del caso de *masa 2*, pero esta no se toma en cuenta en las ecuaciones propuestas en el estudio por las condiciones de carga de casi nula probabilidad de ocurrencia durante un sismo, por lo anteriormente mencionado se puede decir que estas tendencias de los casos *0* y *1* se toman como valores constantes de pendiente igual a cero por simplicidad ingenieril.

6.1. Ecuación propuesta para la aproximación del valor de la aceleración de respuesta vertical en función de la rigidez vertical

La ecuación propuesta para la aproximación del valor de la aceleración de respuesta vertical en función de la rigidez vertical K_Y , se obtuvo con el promedio de los cocientes de las aceleraciones de respuesta de los casos de 20 crujías hasta 6 crujías contra la rigidez vertical de la armadura del caso correspondiente calculada anteriormente. No se tomó en cuenta las crujías 4 y 2 ya que estas poseen una rigidez muy grande a comparación de la rigidez de una armadura real y se decidió no contemplarla. En la Fig. (6.2) se muestra el cociente de las aceleraciones máximas contra la rigidez vertical de la armadura.

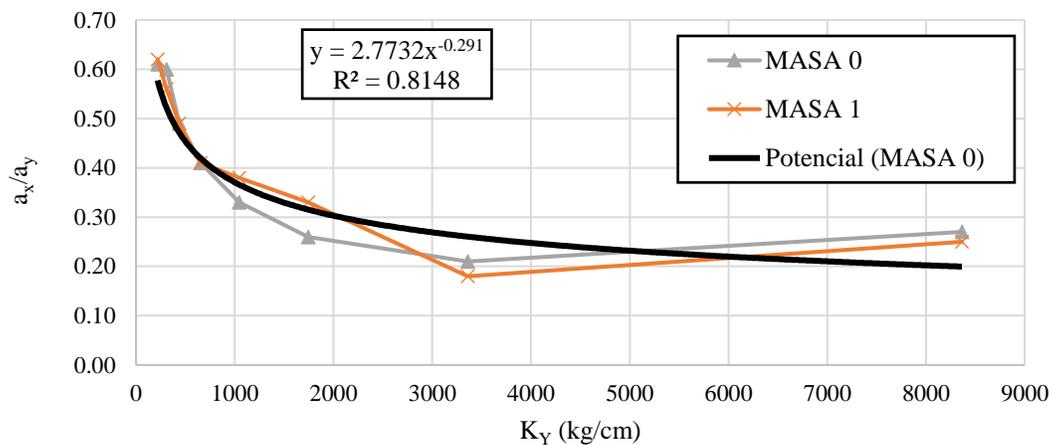


Figura 6.2 Relación de cociente de aceleraciones a la rigidez vertical

En la misma figura se puede observar que las relaciones de *masa 0* y *masa 1* llevan ligeramente la misma línea de tendencia, el ajuste en esta línea podría ser de tipo potencial. El ajuste, realizado con las condiciones que se establecieron en la sección 2.8, tiene el valor $R^2 = 0.81$, lo que significa que es un ajuste aceptablemente bueno.

La Ec. (6.1) se obtuvo de la línea de tendencia mostrada en la Fig. (6.2), al tener este resultado podemos establecer una ecuación que aproximará el valor de la aceleración de respuesta vertical respecto a la aceleración de respuesta horizontal y conforme su rigidez vertical de la armadura. Tal relación está dada por la Ec. (6.1)

$$\frac{a_y}{a_x} = 2.7732 K_y^{-0.291} \quad (6.1)$$

El uso de la ecuación anterior empleando las aceleraciones registradas es el siguiente:

- Una vez obtenida la Ec. (6.1) se despeja la a_y y se obtiene la Ec. (6.2).

$$a_y = 2.7732 a_x K_y^{-0.291} \quad (6.2)$$

- Sustituir en la Ec. (6.2) cada dato obtenido de la aceleración máxima horizontal por medio experimental y obtener el valor de aceleraciones máximas verticales aproximadas numéricamente.
- Obtener un factor de seguridad como el cociente de aceleraciones máximas verticales aproximadas numéricamente con los datos obtenidos de aceleraciones máximas verticales medidos del acelerómetro similar a la Ec. (6.2)

En la Fig. (6.3) la mayoría de los valores tienden a ser menores que uno, esto refleja que no se está de lado de la seguridad y que debe ser modificada para ser una ecuación útil para diseño.

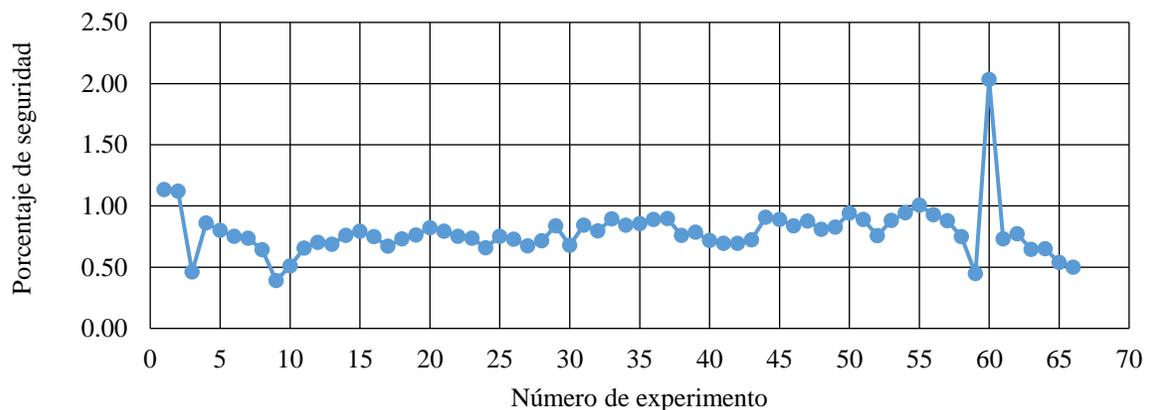


Figura 6.3 Factor de seguridad de los experimentos obtenida de la Ec. (6.2).

6.2. Propuesta de ecuación para la aproximación del valor de la aceleración de respuesta vertical en función de los cocientes de rigideces

La segunda propuesta de ecuación para la aproximación del valor de la aceleración de respuesta vertical en función de los cocientes de rigideces. Se obtuvo con el promedio de los cocientes de las aceleraciones de respuesta de los casos de 20 crujías hasta 6 crujías contra los cocientes de rigideces obtenido a su vez de la rigidez vertical K_Y entre la rigidez vertical horizontal K_Z de la armadura del caso correspondiente, calculada en la sección 5.3.

En la Fig. (6.4) se muestra el cociente de las aceleraciones máximas contra el cociente de rigideces de la armadura correspondiente a los casos de 20 crujías hasta 6 crujías; vale la pena mencionar que no se tomó en cuenta las crujías 4 y 2 ya que estas poseen una rigidez muy grande a comparación de la rigidez de una armadura existente y se decidió no contemplarla.

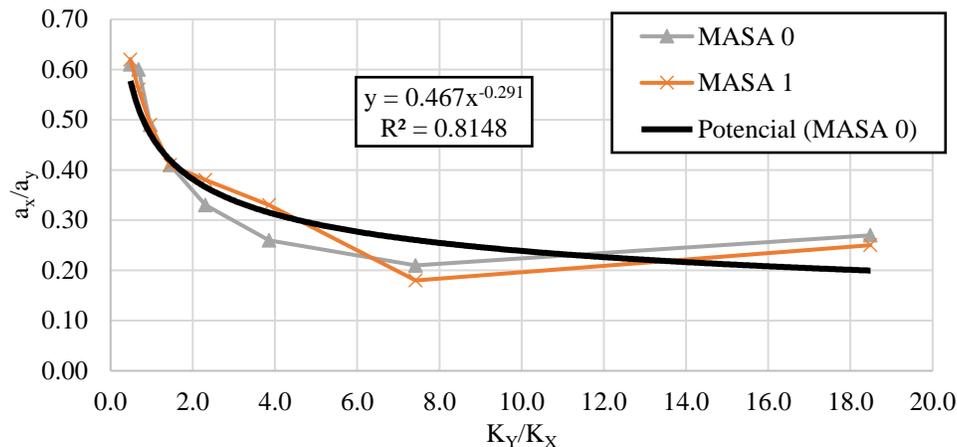


Figura 6.4 Relación de cociente de aceleraciones al cociente de rigideces

En la misma figura se puede observar que llevan ligeramente la misma línea de tendencia, el ajuste en esta línea es de tipo potencial. El ajuste, realizado con las condiciones que se establecieron en la sección 2.8, es el valor R^2 es igual a 0.8148, lo que significa que el ajuste también es aceptable.

$$\frac{a_y}{a_x} = 0.467 \frac{K_y}{K_z}^{-0.291} \quad (6.3)$$

La Ec. (6.3) se ajustó a partir de la línea de tendencia mostrada en la Fig. (6.4), al tener este resultado podemos establecer una ecuación que aproximará el valor de la aceleración de respuesta vertical respecto a la aceleración de respuesta horizontal y en función del cociente de rigidez vertical de la armadura entre la rigidez horizontal de las columnas.

El uso de la Ec. (6.3) empleando las rigideces y la aceleración horizontal es como se describe a continuación:

- Una vez obtenida la Ec (6.3) se despeja a_y y se obtiene la Ec. (6.4).

$$a_y = 0.467 a_x \frac{K_y^{-0.291}}{K_z} \quad (6.4)$$

- Sustituir en la Ec. (6.4) cada dato obtenido de aceleración máxima horizontal por medio experimental y obtener el valor de aceleraciones máximas verticales aproximadas numéricamente.
- Posteriormente se obtiene un factor de seguridad de aceleraciones máximas verticales aproximadas numéricamente con los datos obtenidos de aceleraciones máximas verticales medidos del acelerómetro.

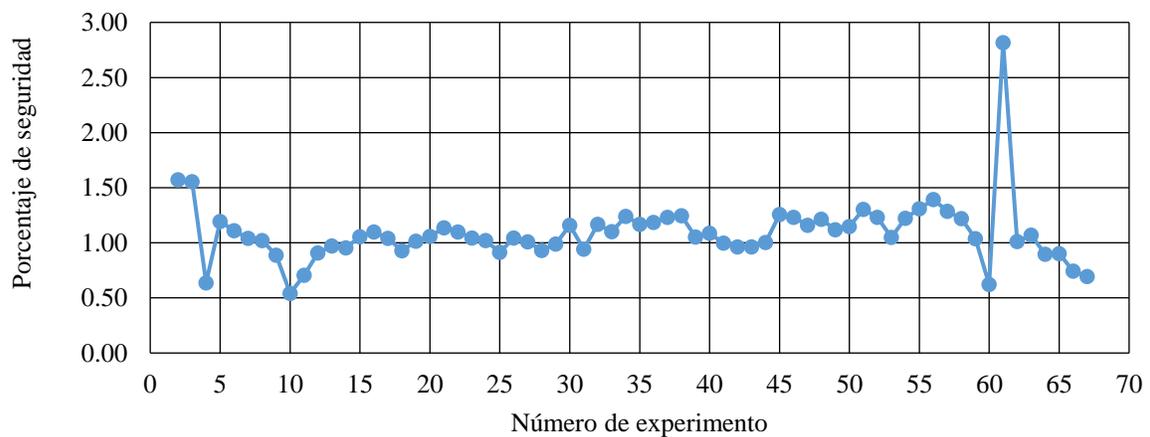


Figura 6.5 Factor de seguridad de los experimentos obtenidos

Del procedimiento anterior se obtiene los factores de seguridad mostrados en la Fig. (6.5) de la cual se puede decir que varios valores tienden a ser menores que uno, esto refleja que no se está de lado de la seguridad.

6.3. Aproximación de las aceleraciones verticales totales de diseño para armaduras de naves industriales en función del periodo estructural vertical.

En esta sección se plantea dos hipótesis para la determinación de las aceleraciones verticales totales de diseño para armaduras de naves industriales.

1. En el suelo se producen dos componentes importantes de las aceleraciones para diseño en presencia de un sismo las cuales se esquematizan en la Fig. (6.6) las cuales son: aceleración de diseño vertical en el suelo a_v y la aceleración de diseño horizontal en el suelo a' .

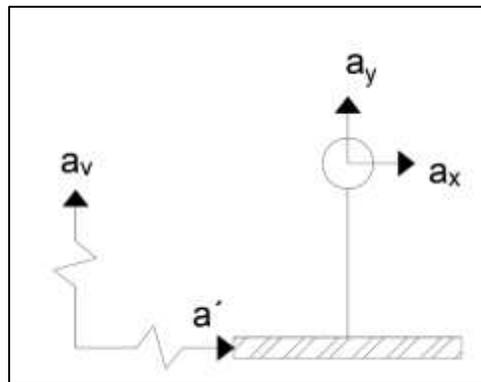


Figura 6.6 Esquema de las aceleraciones que actúan en un modelo de un grado de libertad

En la misma figura encontramos las componentes de las aceleraciones de respuesta de un grado de libertad las cuales son aceleración de respuesta vertical en la parte superior de la estructura a_y y la aceleración de respuesta horizontal en la parte superior de la estructura a_x , fuerzas producidas por las a' y a_v .

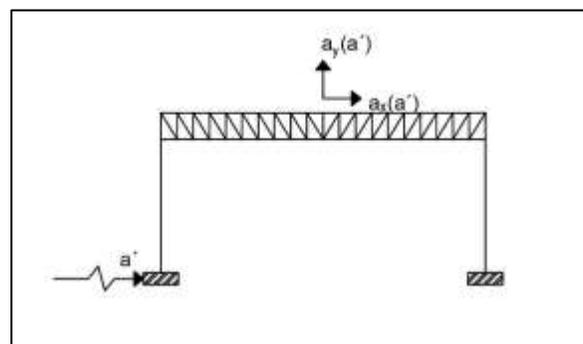


Figura 6.7 Esquema de las aceleraciones de la armadura

2. En cambio, en la armadura experimentada se produjeron dos componentes de la aceleración de respuesta causadas por la aceleración horizontal del suelo (a') mostradas en la Fig. (6.7) donde: $a_y(a')$ es la aceleración de respuesta vertical en la parte superior de la estructura causada por a' y $a_x(a')$ es la aceleración de respuesta horizontal en la parte superior de la estructura causada por a' .

Las aceleraciones verticales de diseño (a_y) que se usan en la práctica actualmente solo son las aceleraciones verticales del suelo (a_v) a partir de aceleraciones horizontales y que a su vez son obtenidas del mismo suelo (a'), es decir, $a_y = a_v(a')$. No obstante, se observó en esta investigación que las aceleraciones de respuesta verticales obtenidas en armaduras flexibles son producto de las aceleraciones horizontales del suelo (a'), por lo que se hace evidentes tomar en cuenta participación respuesta vertical producto de las aceleraciones horizontales en el cálculo de las aceleraciones verticales totales de diseño *para armaduras de periodos mayores que 0.05s*.

Para poder formar la propuesta de diseño en la Fig. (6.8) se presenta el cociente de aceleraciones vertical a horizontal obtenidos experimentalmente en función del periodo vertical de la estructura calculado en la sección 5.5.

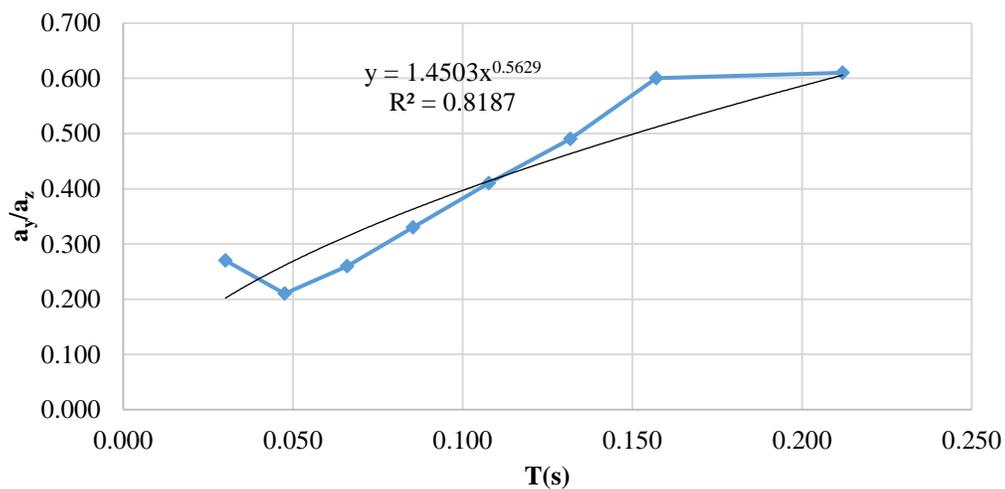


Figura 6.8 Cocientes de aceleraciones máximas de respuesta contra el periodo de la estructura

Ahí se puede observar que existe una tendencia reconocible entre dichos valores por lo que se ajusta la Ec. (6.5) para poder así aproximar numéricamente el valor de la aceleración

vertical de diseño en la estructura en función del periodo estructural y la aceleración horizontal de diseño.

El ajuste mencionado se da mediante la Ec. (6.5):

$$a_y(a') = 2a'(T_v)^{\left(\frac{2}{3}\right)} \quad (6.5)$$

En la Fig. (6.9) se muestran los factores de seguridad empleando la ecuación anteriormente propuesta, estos factores son en su mayoría mayores a la unidad, lo que quiere decir que la ecuación produce resultados que están en el intervalo de la seguridad estructural establecido en las normativas vigentes, además se presentan los resultados en el ANEXO V.

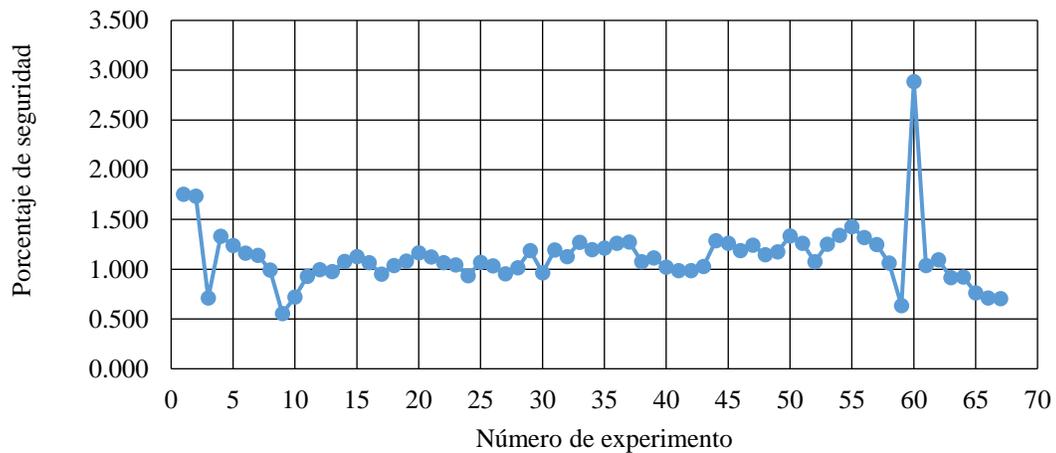


Figura 6.9 Factor de seguridad de los experimentos

Como se mencionó en la sección 1, el diseño por aceleraciones verticales es recomendado para cierto tipo de estructuras por lo que se establece la Ec. (1.1) para las aceleraciones espectrales verticales de diseño por [4].

Para observar el funcionamiento de la ecuación propuesta se presenta en esta sección el empleo de la misma en comparación de las normas vigentes y otra recomendación. Se supuso un caso ficticio en la ciudad de Puebla, en un tipo de suelo rocoso, con una $a_{0r}=116.87 \text{ cm/s}^2$ y $a'=0.195 \text{ g}$ y tipo de estructura industrial.

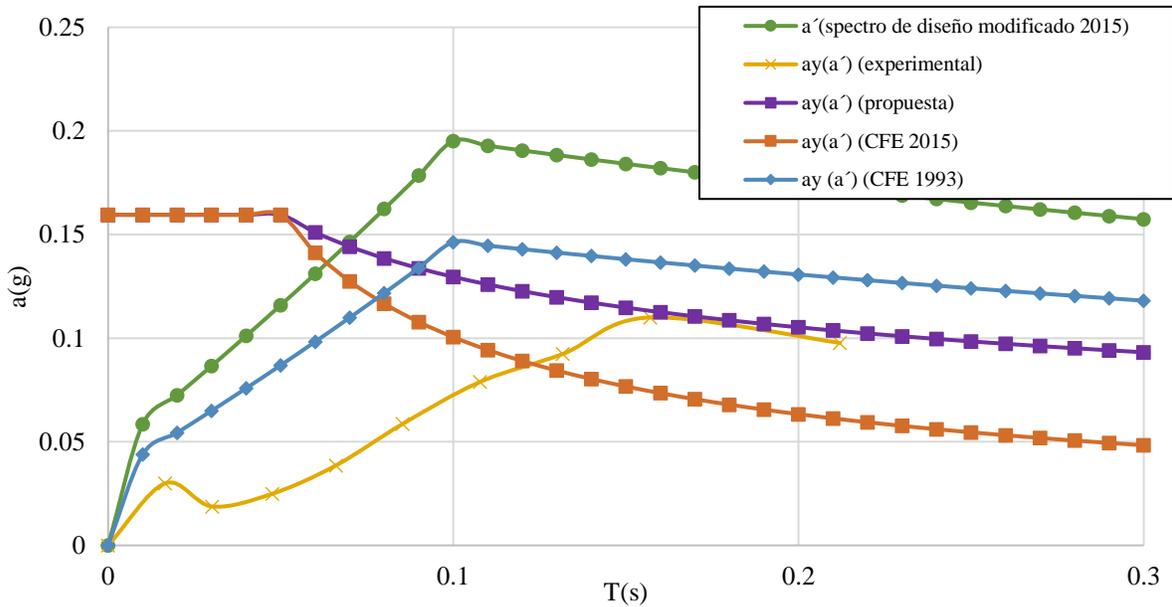


Figura 6.10 Comparación de los espectros verticales en un suelo rocoso de Puebla y datos obtenidos de modo experimental

En la Fig. (6.10) se observan las siguientes relaciones:

- La línea verde corresponde al espectro de aceleración diseño modificado del Manual CFE 2015 [18] que se obtuvo del programa PRODISIS, es decir (a').
- La línea azul representa los valores de aceleraciones verticales espectrales $a_y(a')$ según lo establecido en CFE 1993 [6].
- La línea naranja representa las aceleraciones verticales $a_y(a')$ calculadas a partir de lo establecido en el Manual de CFE [18] y con la Ec. (1.1).
- La línea amarilla son los datos obtenidos experimentalmente mostrados en la Fig. (6.8), con una transformación a aceleraciones espectrales basándose en una segunda hipótesis aquí propuesta, en la cual se propone que “*el comportamiento del espectro de diseño del suelo sigue la misma tendencia que el comportamiento de las aceleraciones de respuesta de la estructura*”; o en otras palabras, que las aceleraciones de excitación sean iguales a las aceleraciones de respuesta obtenidas experimentalmente, por lo que se hizo un reescalamiento de los datos obtenidos experimentalmente (a_{my}/a_{mz}) para la obtención de las aceleraciones verticales de diseño propuesta.

Así, en la Fig. (6.10) se observa que a partir del periodo vertical $T_v=0.12s$ las recomendaciones de CFE 2015 desprecia las aceleraciones obtenidas experimentalmente en la armadura por lo que se establece una segunda hipótesis:

En armaduras flexibles las aceleraciones verticales totales de diseño deberían estar determinadas por la sumatoria de las aceleraciones verticales de diseño inducidas por las aceleraciones verticales del suelo a_y (a_v) más las aceleraciones verticales en la estructura inducidas por las aceleraciones horizontales del suelo a_y (a').

Matemáticamente la segunda hipótesis propuesta se escribe como sigue:

$$a_{yT} = a_y(a_v) + a_y(a') \quad (6.6)$$

Adicionalmente se propone que el periodo donde empezará la rama descendente debe ser un valor menor al encontrado para asegurar que frecuencias cercanas están del lado de la seguridad. Con fundamento en Perea [4], se propone usar el mismo valor de T_v como parte aguas. El comportamiento de la ecuación propuesta se presenta en la Fig. (6.10) como la línea morada, la cual cubre todas las aceleraciones encontradas experimentalmente, por lo que se propone una simple modificación a la Ec. (1.1) y convertirse en la Ec. (6.7), útil para estimar las aceleraciones verticales de diseño para armaduras considerando la excitación tanto vertical como la horizontal:

$$a_{v(a',T_v)} = \begin{cases} 1.4 \cdot F_d \cdot a' & \text{si } T_v < 0.05, \\ 1.4 \cdot F_d \cdot a' \left(\frac{0.05}{T_v}\right)^{\frac{1}{3}} & \text{si } T_v \geq 0.05. \end{cases} \quad (6.7)$$

En próximas investigaciones, que se encuentran fuera del alcance del presente trabajo, se puede proponer el verificar la funcionalidad de la ecuación propuesta Ec. (6.7).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El sector industrial es una parte fundamental de la economía poblana; su principal estructuración son las naves con armaduras, debido a que ayudan a cubrir claros de gran longitud con un peso propio relativamente ligero. El hecho de que la industria se detenga a causa de daños provocados por los sismos, lo cual resulta en un desastre económico, convierte este problema en uno importante que debe ser estudiado con la finalidad de salvaguardar dichas estructuras durante este tipo de cataclismos para evitar colapsos en la economía local o nacional.

En esta investigación se estudiaron las aceleraciones verticales en armaduras tradicionales desplantadas en un suelo duro, se planteó el desarrollo, el análisis y el diseño de una armadura de longitud de 30 m, así como la construcción de la armadura de aluminio a escala de 1:0.094. El experimento consistió en proporcionar un golpe de ariete a la cimentación de la armadura escalada y registrar las aceleraciones en el centro del claro con las variables de longitud del claro, carga muerta e intensidad de excitación.

La armadura de aluminio escalada se instrumentó con un acelerómetro triaxial para el registro de aceleraciones; se analizaron los registros obtenidos experimentalmente para determinar el periodo estructural en las direcciones principales de la armadura en cada ensaye. Las frecuencias asociadas a tales periodos estructurales, que fueron de 22.5 Hz, se utilizaron para la calibración del modelo teórico en el programa para la longitud máxima de la armadura de aluminio, que corresponde a un periodo $T = 0.044$ s.

Del resultado de la presente investigación se concluye lo siguiente:

1. Se determinó en la Sección 5.6 el porcentaje de amortiguamiento del sistema, el cual se obtuvo a partir de la vibración libre experimental; el valor obtenido fue de $\zeta = 2.88$ %, que representa un valor cercano al de una armadura de acero real, por lo que el comportamiento dinámico se considera aceptable.

2. En esta investigación se propone como primera hipótesis y aportación importante del trabajo, que *“el comportamiento del espectro de diseño del suelo sigue la misma tendencia que el comportamiento de las aceleraciones de respuesta de la estructura”*.
3. Adicionalmente, como una segunda hipótesis y aportación original importante, se propone que *en armaduras flexibles las aceleraciones verticales totales de diseño deberían estar determinadas por la sumatoria de las aceleraciones verticales de diseño producidas por las aceleraciones verticales del suelo $a_y(a_v)$ más las aceleraciones verticales en la estructura producidas de las aceleraciones horizontales del suelo, esto es:*

$$a_{yT} = a_y(a_v) + a_y(a').$$

4. Basado en lo anterior se propone un ajuste sencillo a la ecuación establecida en el Manual de Obras Civiles de CFE diseño por sismo 2015, por lo que se obtuvo la siguiente ecuación para estimar las aceleraciones verticales de diseño para armaduras

$$a_{v(a',T_v)} = \begin{cases} 1.4 \cdot F_d \cdot a' & \text{si } T_v < 0.05, \\ 1.4 \cdot F_d \cdot a' \left(\frac{0.05}{T_v}\right)^{\frac{1}{3}} & \text{si } T_v \geq 0.05, \end{cases}$$

que es también una contribución importante resultado de la presente investigación.

Finalmente, por encontrarse fuera del alcance de esta tesis, como propuesta para trabajos posteriores y en complemento a los resultados obtenidos, se propone lo siguiente:

- Extender los estudios de la modelación y calibración para los demás casos de longitud del claro.
- Realizar el análisis paramétrico para otras características de las armaduras.
- La aplicación de la ecuación propuesta para casos reales de diseño de armaduras clásicas construidas con conexiones biarticuladas desplantadas sobre suelo duro con la finalidad de verificar la validez de la ecuación y su capacidad de predicción.

BIBLIOGRAFÍAS

- [1] D. Ruiz y A. Sarria, «Efectos de las diferentes componentes sísmicas de movimiento sobre las naves industriales de grandes luces,» *Revista de ingeniería*, pp. 46-54, 2002.
- [2] O. López, R. Bonilla, J. Hernández y A. Fernández, «Propiedades de las tres componentes principales del movimiento sísmico,» *Cielo*, pp. 25-35, 2004.
- [3] Bozorgnia, K. Campbell y M. Niazi, «Observed spectral characteristics of vertical ground motion recorded during worldwide earthquakes from 1957 to 1995,» *12WCEE 2000*, pp. 1-7, 2000.
- [4] T. Perea y L. Esteva, «Componente vertical de registros sísmicos en México y su efecto en la respuesta sísmica no lineal de edificios,» *Revista de Ingeniería sísmica*, pp. 2-36, 2004.
- [5] J. Ruiz, «Revisión de la componente vertical del movimiento del terreno durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 en la ciudad de México,» *Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica*, pp. 1-8, 2017.
- [6] CFE, Manual de Diseño de Obras Civiles, México: CFE, 1993.
- [7] RCMP, Reglamento de Construcción del Municipio de Puebla, Puebla: Gobierno de Puebla, 1999.
- [8] RCEG, Reglamento de construcción del estado de Guerrero, Guerrero: Estado de Guerrero, 1990.
- [9] MDOC, Manual de obras civiles diseño por sismo, México: CFE, 2015.
- [10] F. Didot, L'Exposition universelle, Paris: Harvard University, 1889.
- [11] J. McCormac y S. Csernak, Diseño de estructuras de acero, México: Alfaomega, 2013.
- [12] Y. Ortega, «Prueba de impacto: ensayo Charpy,» *REVISTA MEXICANA DE FÍSICA*, pp. 50-52, 2006.
- [13] E. Carreño, B. Bravo, A. Suárez y J. M. Tordesillas, «Registro y tratamiento de acelerogramas,» *Física de la tierra*, pp. 8-19, 1999.
- [14] A. Shibata, Dynamic analysis of earthquake resistant structures, Tohoku: Tohoku University Press, 2010.

- [15] P. Vinuesa, «Regresión lineal simple y polinomial: teoría y práctica,» *CCG-UNAM*, pp. 2-5, 2016.
- [16] H. Usla, «Puebla, el estado con mayor avance industrial en septiembre,» *El financiero*, pp. 1-2, 2018.
- [17] NTC, Normas Técnicas Complementarias de Diseño de elementos de Acero, Mexico: Gobierno de la ciudad de México, 2017.
- [18] J. Camargo, Interviewee, *Consulta academica*. [Entrevista]. 18 07 2019.
- [19] CFE, Manual de diseño de obras civiles diseño por sismo, México: CFE, 2015.
- [20] Firmin-Didot, L'Exposition universelle de 1889, Paris: Harvard University, 1889.
- [21] J. P. Hidalgo toxqui, Mesa vibratoria a escala, de un grado de libertad como intrumentación didáctica, Puebla: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 2006.
- [22] T. Perea y L. Maraboto, Introducción al estudio de la componente vertical del movimiento sísmico y su influencia en el comportamiento estructural, México, D.F.: UNAM, 2002.
- [23] J. De la Colina, J. Valdés y C. González, Dinámica de estructuras, México: Limusa, 2016.
- [24] E. Ander, Técnicas de investigación social, Buenos Aires: Lumen, 1992.

Anexo I. Resumen de los datos recabados con su respectivo tratamiento, así como su espectro de Fourier y sus cocientes espectrales para cada caso

Aceleración Experimental para: 20C+0-5

Fecha: 02/11/2010

Hora: 11:55:00 a. m.

a_{mx} : 1.3548 g

a_{my} : 0.0815 g

a_{mz} : 0.2008 g

a_{mF} : 1.137 g

Cociente de aceleraciones máximas registradas

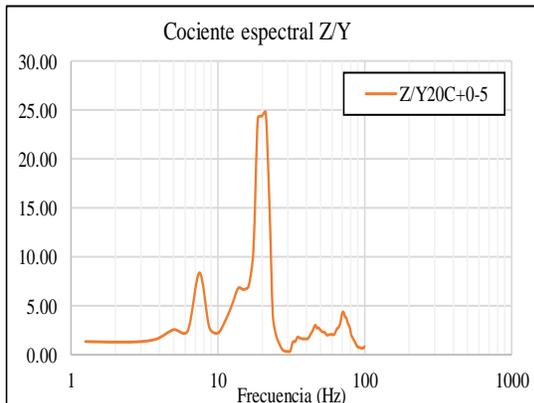
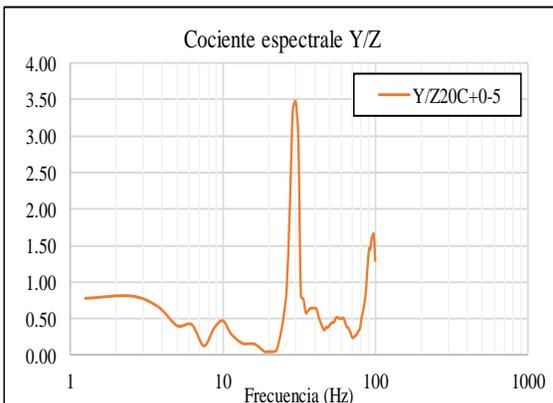
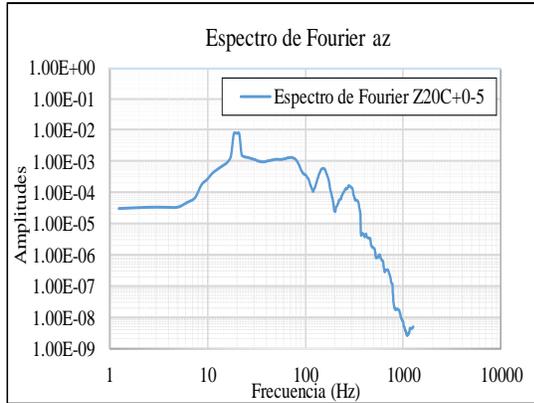
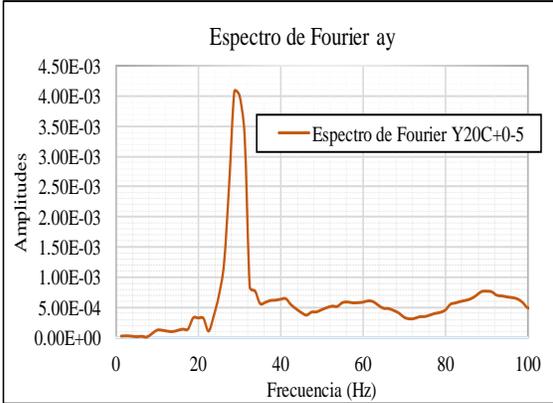
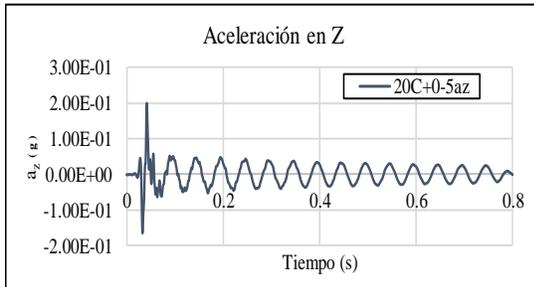
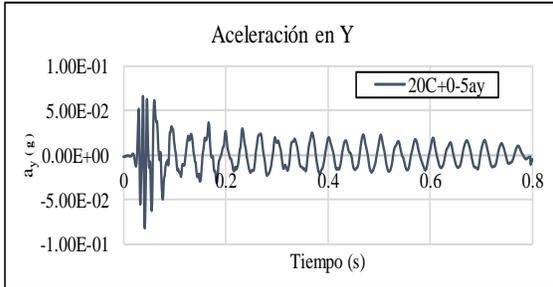
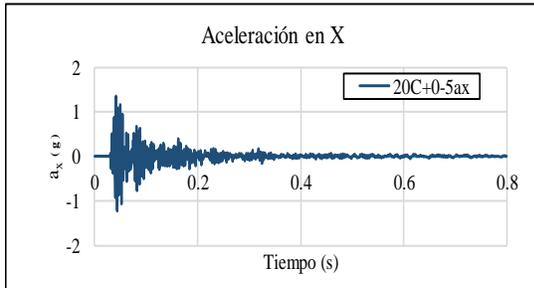
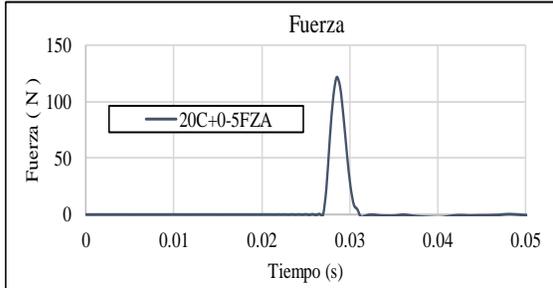
a_{my}/a_{mz} : 0.41

N. Crujias 20 C

M: + 0 grs

d_c : - 5 cm

L_c : 2.84 m



Aceleración Experimental para: 18C+0-5

Fecha: 02/11/2010

Hora: 11:55:00 a. m.

a_{mx} : 1.3548 g

a_{my} : 0.0815 g

a_{mz} : 0.2008 g

a_{mf} : 1.137 g

Cociente de aceleraciones máximas registradas

a_{my}/a_{mz} : 0.41

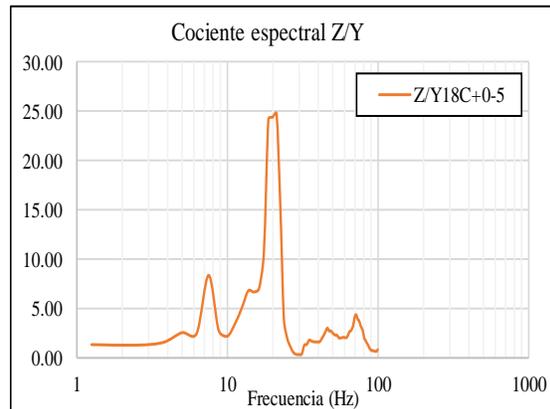
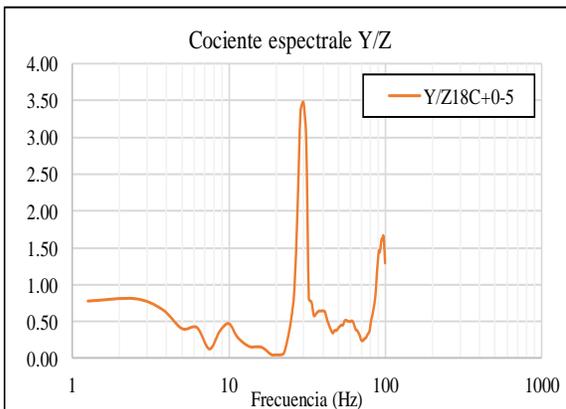
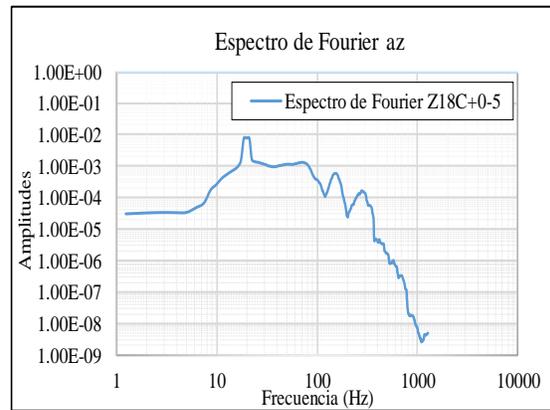
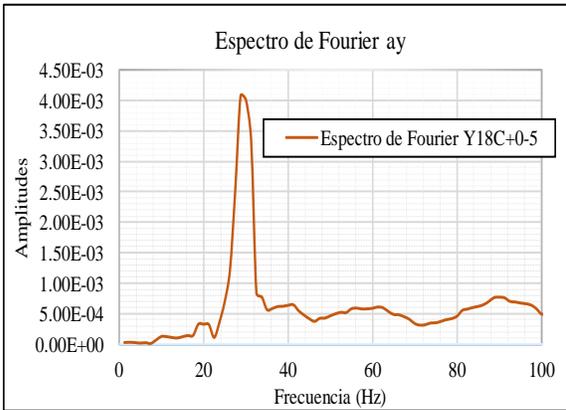
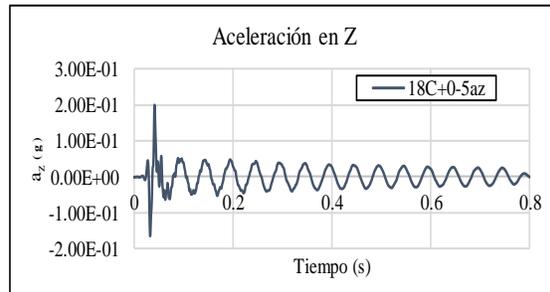
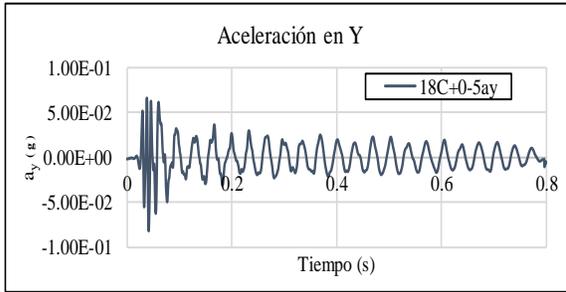
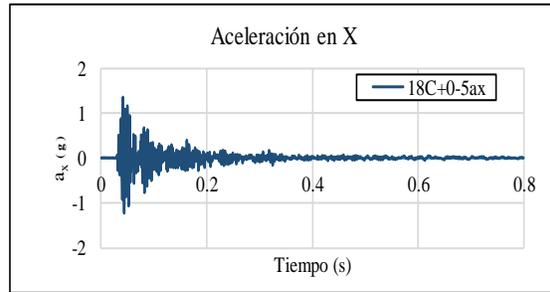
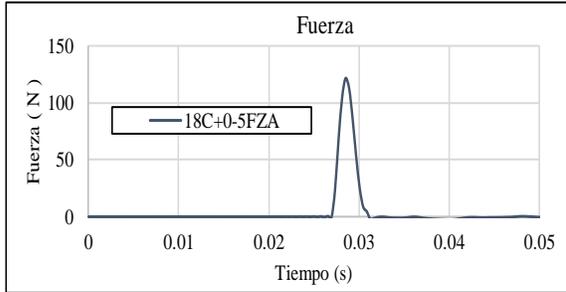
N. Crujias

18 C

M: + 0 grs

d_f: - 5 cm

L_R: 2.84 m



Aceleración Experimental para: 16C+0-3

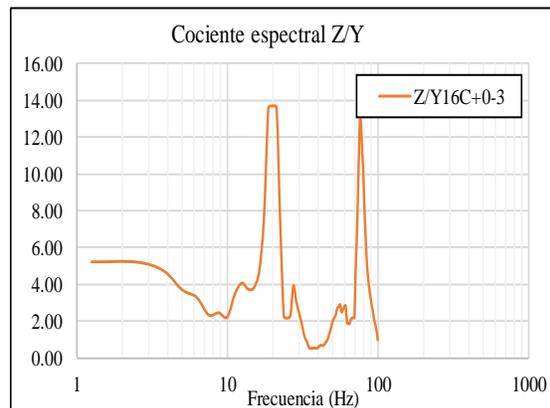
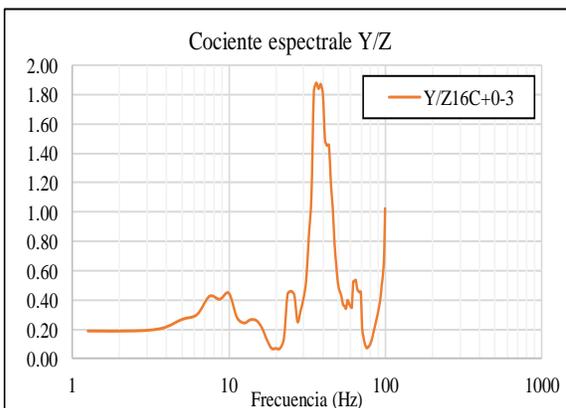
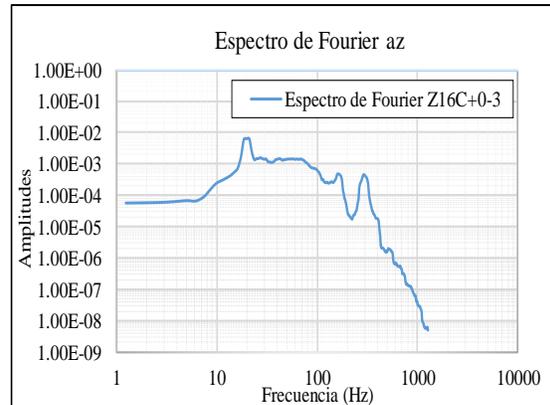
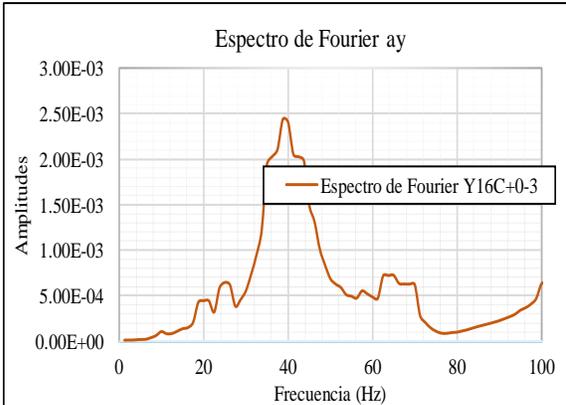
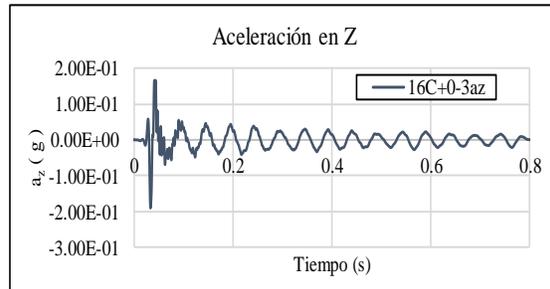
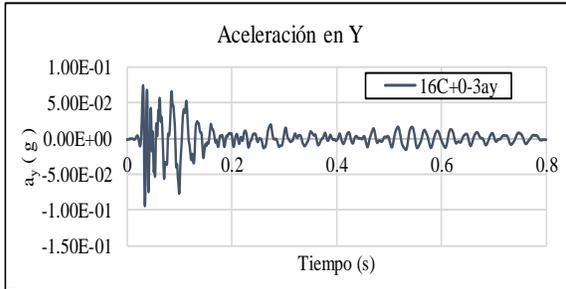
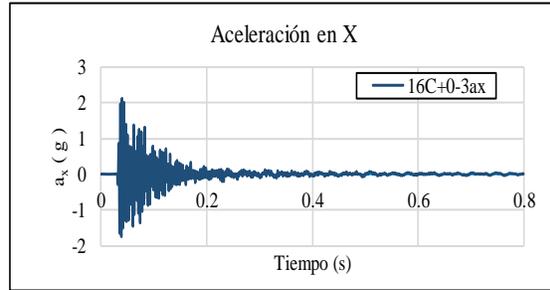
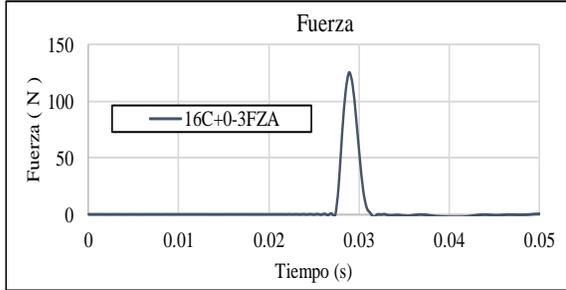
Fecha: 27/03/2019 Hora: 02:34:00 p. m.

a_{mx} : 2.1083 g
 a_{my} : 0.0945 g
 a_{mz} : 0.1895 g
 a_{mf} : 1.171 g

Cociente de aceleraciones máximas registradas

a_{my}/a_{mz} : 0.50

N. Crujias 16 C
 M: + 0 grs
 d_f: - 3 cm
 L_R: 2.27 m



Aceleración Experimental para: 14C+0-5

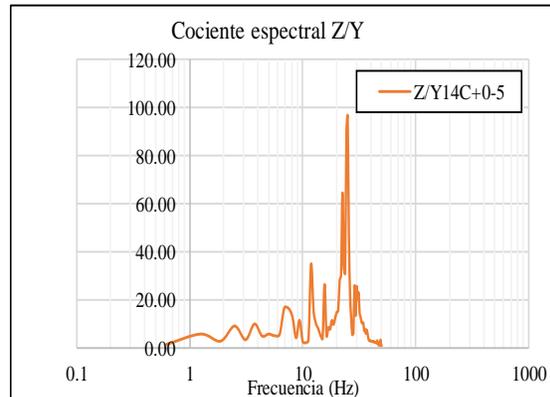
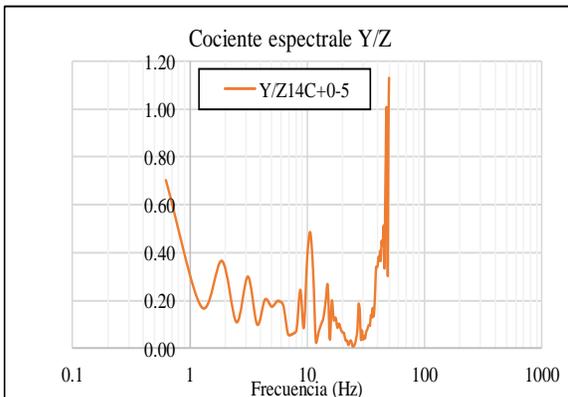
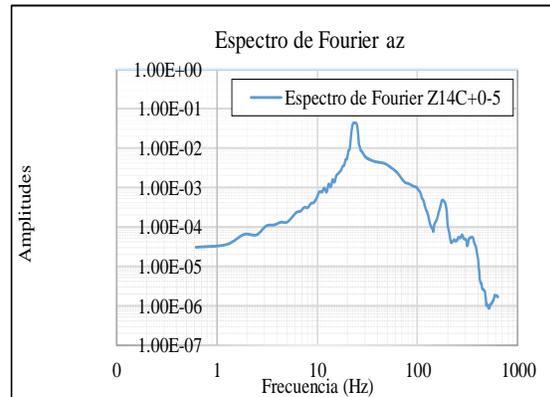
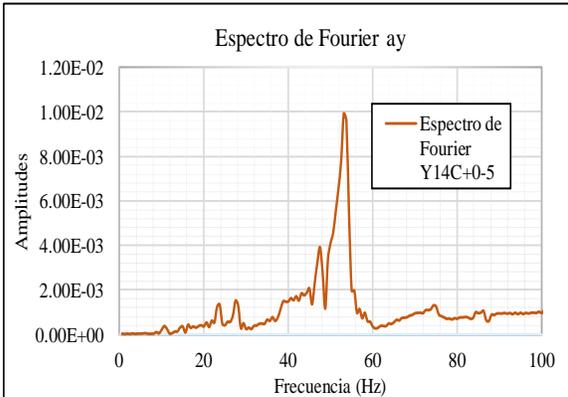
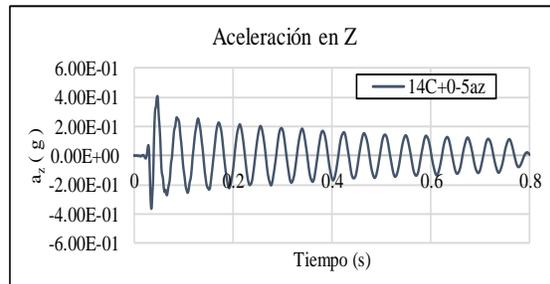
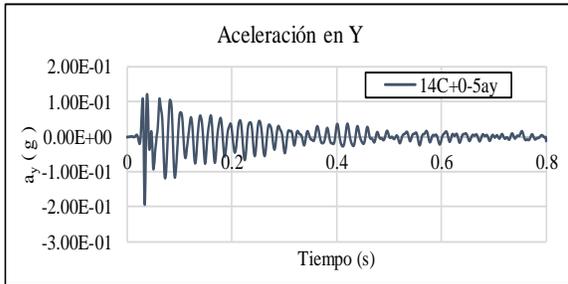
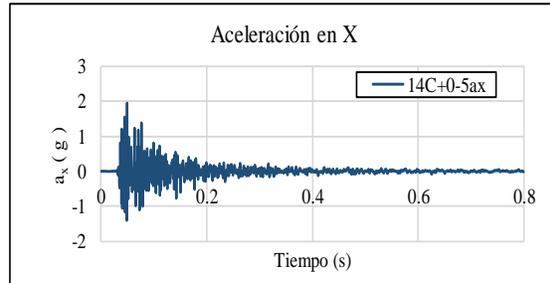
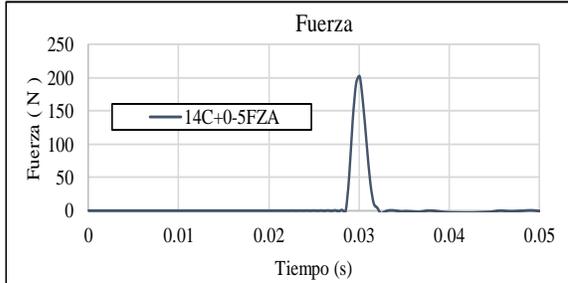
Fecha: 02/11/2010 Hora: 12:47:00 a. m.

a_{mx} : 1.9558 g
 a_{my} : 0.1938 g
 a_{mz} : 0.4089 g
 a_{mf} : 1.882 g

Cociente de aceleraciones máximas registradas

a_{my}/a_{mz} : 0.47

N. Crujias 14 C
 M: + 0 grs
 d_f : - 5 cm
 L_R : 1.89 m



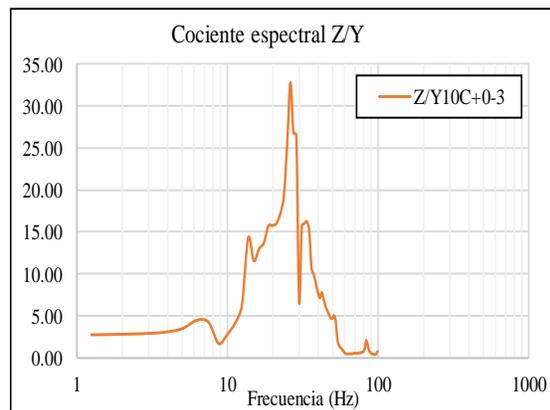
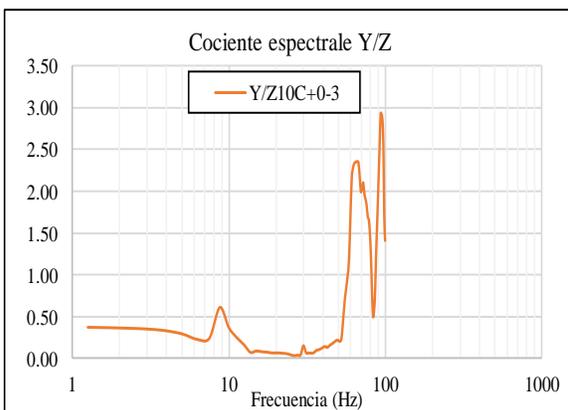
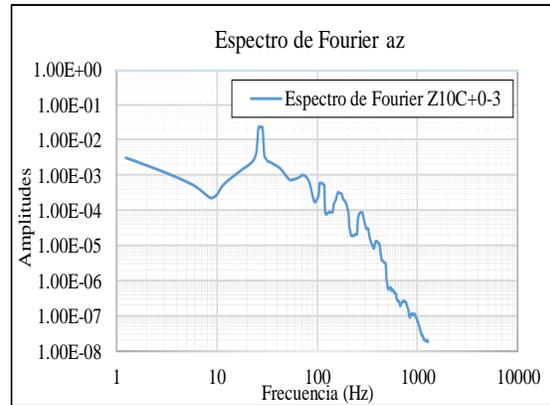
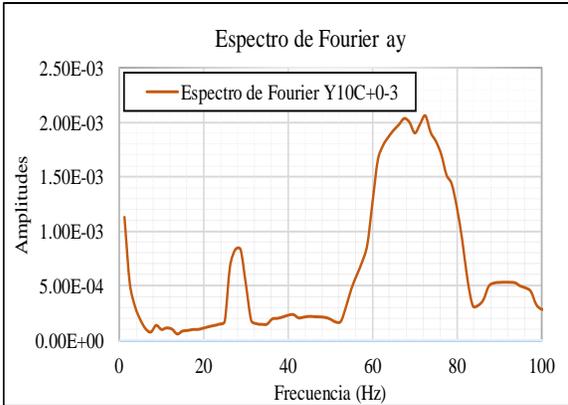
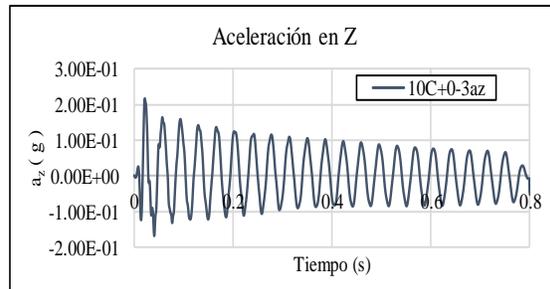
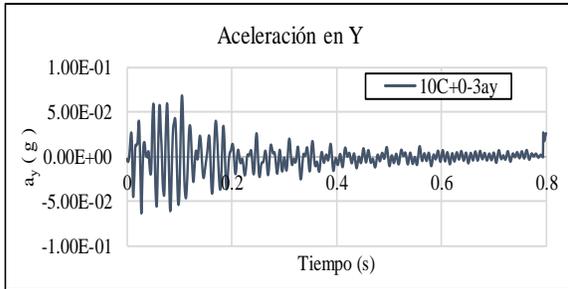
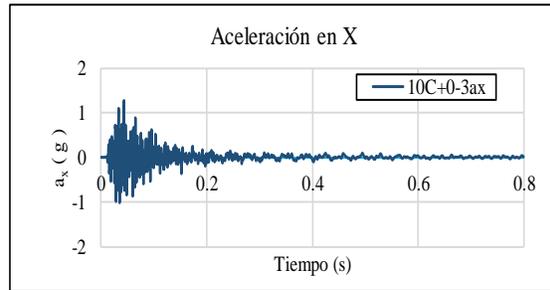
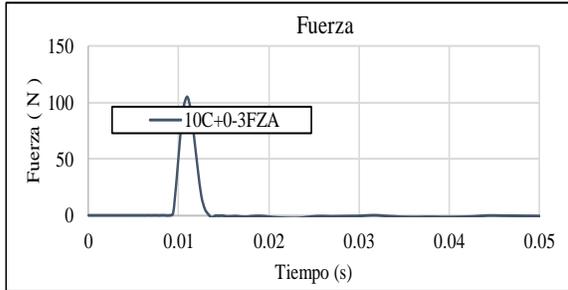
Aceleración Experimental para: 10C+0-3

Fecha: Hora:

a_{mx} : 1.2796 g
 a_{my} : 0.0686 g
 a_{mz} : 0.2159 g
 a_{mf} : 0.978 g

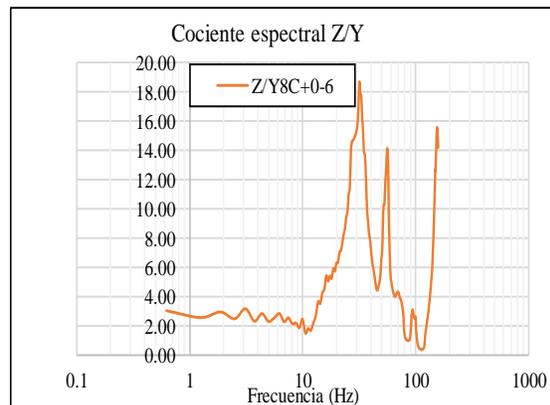
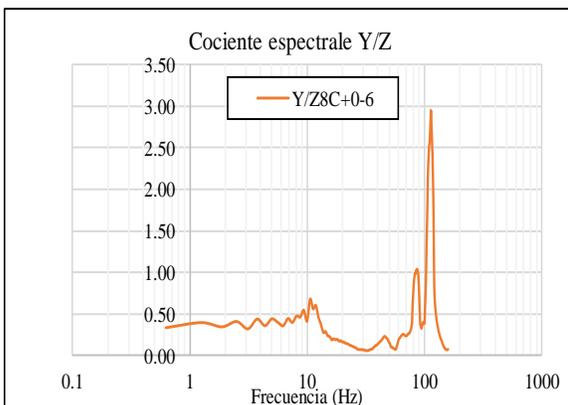
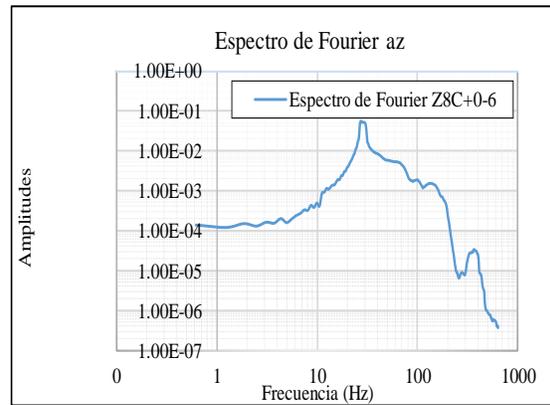
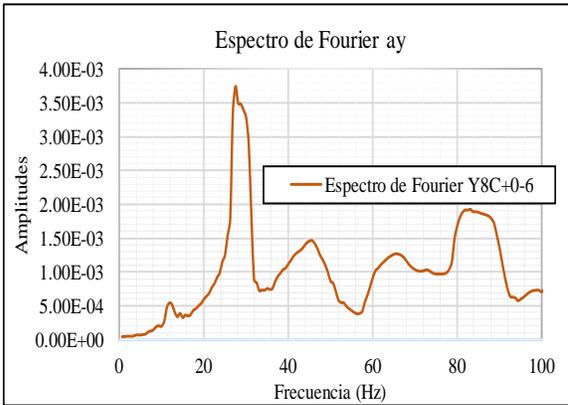
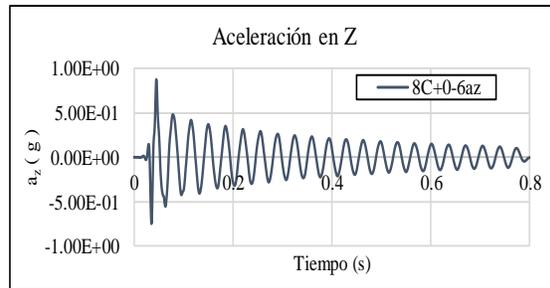
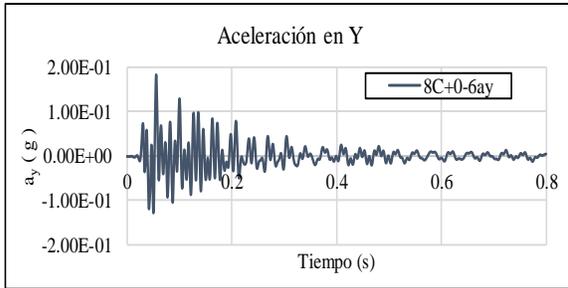
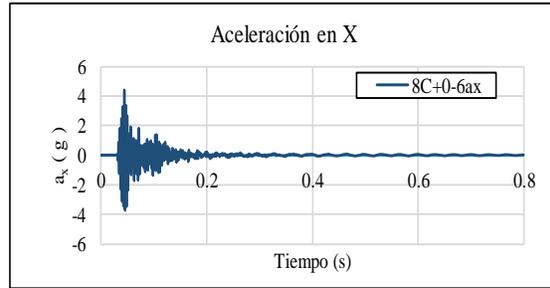
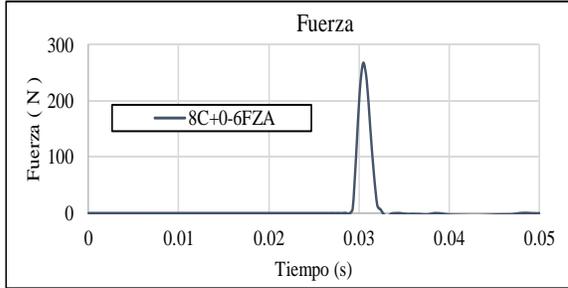
N. Crujias: 10 C
 M: + 0 grs
 d_f : - 3 cm
 L_R : 1.426 m

Cociente de aceleraciones máximas registradas: a_{my}/a_{mz} : 0.32



Aceleración Experimental para: 8C+0-6

Fecha:		Hora:		N. Crujias	8 C
a_{mx} :	4.3874 g	Cociente de aceleraciones máximas registradas	a_{my}/a_{mz} : 0.21	M:	+ 0 grs
a_{my} :	0.1830 g			d_i :	- 6 cm
a_{mz} :	0.8719 g			L_R :	1.14 m
a_{mf} :	2.485 g				



Aceleración Experimental para: 2C+0-5

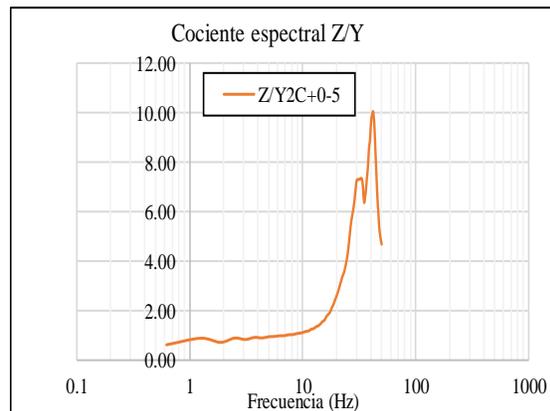
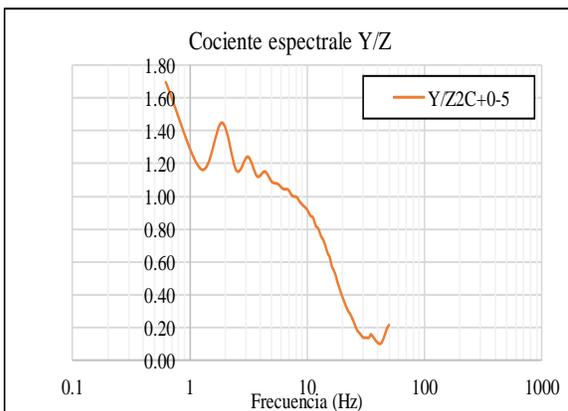
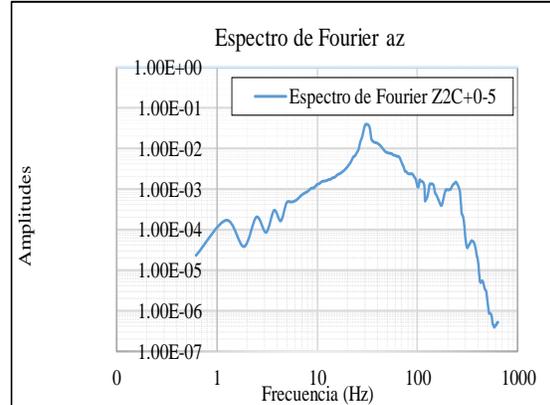
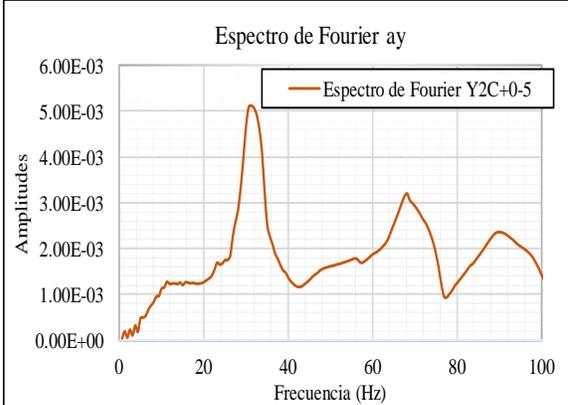
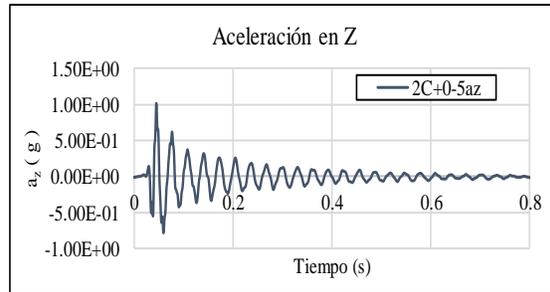
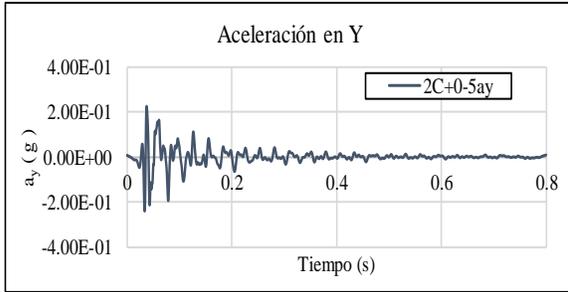
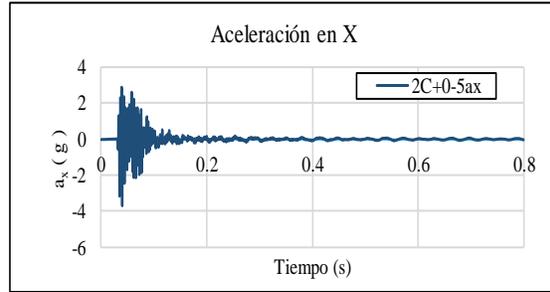
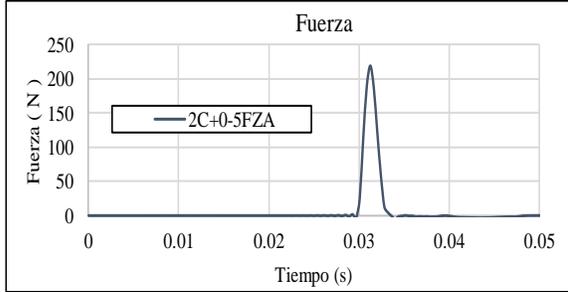
Fecha: [] Hora: []

a_{mx} : 3.6961 g N. Crujias: 2 C

a_{my} : 0.2403 g M: + 0 grs

a_{mz} : 1.0178 g Cociente de aceleraciones máximas registradas: d_f : - 5 cm

a_{nr} : 2.042 g a_{my}/a_{mz} : 0.24 L_R : 0.28 m



Anexo II. Resumen de periodos estructurales y cocientes de aceleraciones para cada caso.

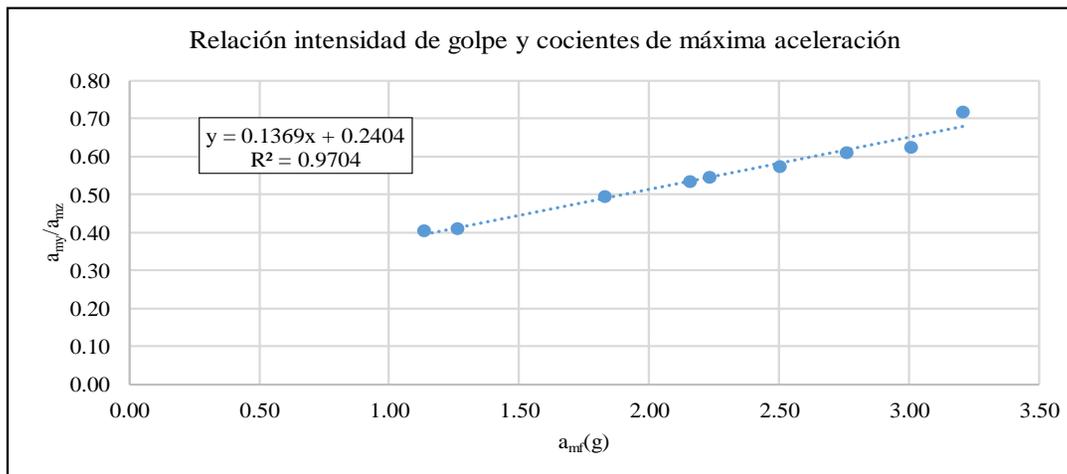
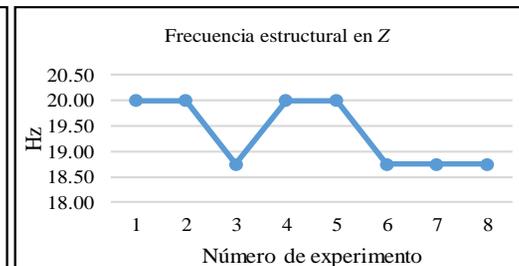
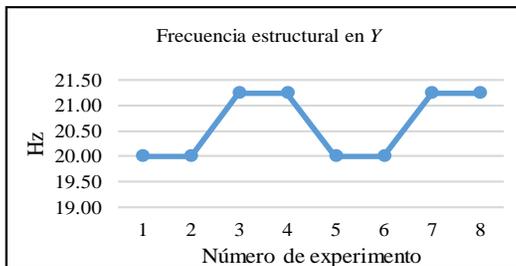
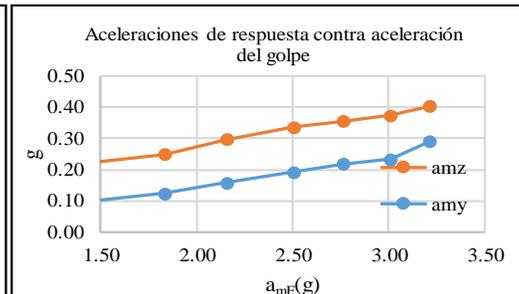
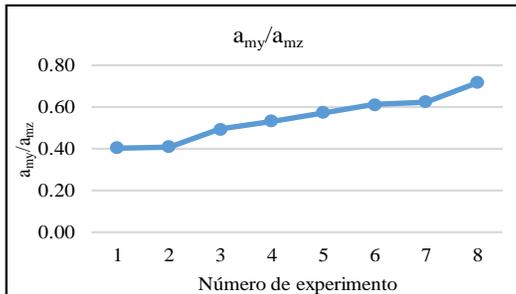
Resumen de pruebas de la respuesta dinámica de la armadura ante un golpe de ariete con una masa extra de cero gramos.

Frecuencia estructural en Z [Hz]	
20+0-5	20.00
20+0-6	20.00
20+0-7	18.75
20+0-8	20.00
20+0-9	20.00
20+0-10	18.75
20+0-11	18.75
20+0-12	18.75
Promedio	19.38

Frecuencia estructural en Y [Hz]	
20+0-5	20.00
20+0-6	20.00
20+0-7	21.25
20+0-8	21.25
20+0-9	20.00
20+0-10	20.00
20+0-11	21.25
20+0-12	21.25
Promedio	20.63

Caso	a_{my} [g]	a_{mz} [g]	a_{mF} [g]	a_{my}/a_{mz}
20+0-5	0.08	0.20	1.14	0.41
20+0-6	0.09	0.21	1.27	0.41
20+0-7	0.12	0.25	1.83	0.49
20+0-8	0.16	0.30	2.16	0.53
20+0-9	0.19	0.34	2.51	0.57
20+0-10	0.22	0.36	2.76	0.61
20+0-11	0.23	0.37	3.01	0.62
20+0-12	0.29	0.40	3.21	0.72
Promedio	0.17	0.30	2.23	0.55

5/9



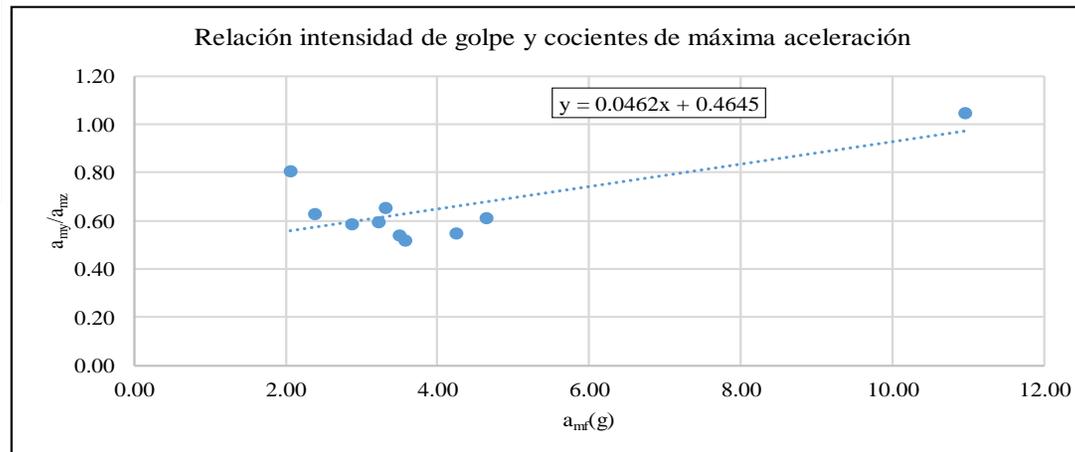
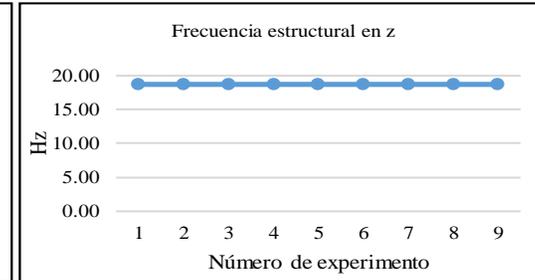
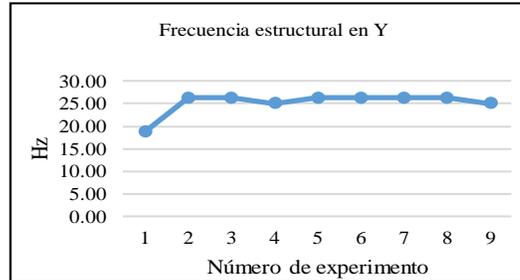
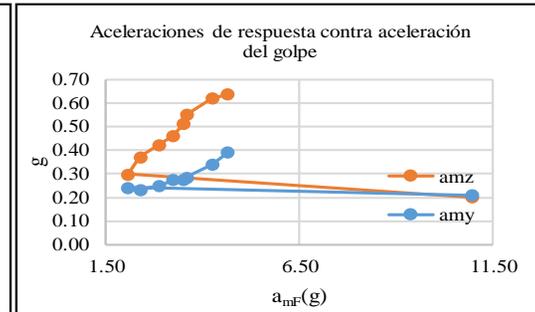
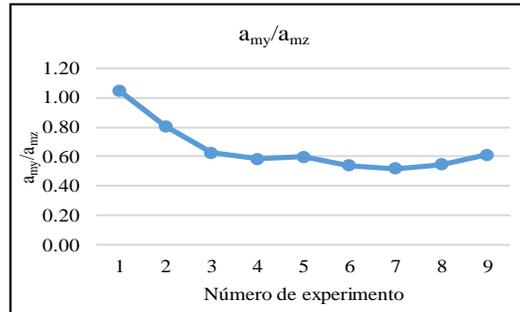
Resumen de pruebas de la respuesta dinámica de la armadura ante un golpe de ariete con una masa extra de cero gramos.

Frecuencia estructural en Z [Hz]	
18C+0-3	18.75
18C+0-5	18.75
18C+0-6	18.75
18C+0-7	18.75
18C+0-8	18.75
18C+0-9	18.75
18C+0-10	18.75
18C+0-11	18.75
18C+0-12	18.75
Promedio	18.75

Frecuencia estructural en Y [Hz]	
18C+0-3	18.75
18C+0-5	26.25
18C+0-6	26.25
18C+0-7	25.00
18C+0-8	26.25
18C+0-9	26.25
18C+0-10	26.25
18C+0-11	26.25
18C+0-12	25.00
Promedio	25.14

Caso	a_{my}	a_{mz}	a_{mF}	a_{my}/a_{mz}
	[g]	[g]	[g]	
18C+0-3	0.21	0.20	10.97	1.05
18C+0-5	0.24	0.30	2.07	0.81
18C+0-6	0.23	0.37	2.39	0.63
18C+0-7	0.25	0.42	2.88	0.59
18C+0-8	0.27	0.46	3.23	0.60
18C+0-9	0.28	0.51	3.50	0.54
18C+0-10	0.29	0.55	3.58	0.52
18C+0-11	0.34	0.62	4.25	0.55
18C+0-12	0.39	0.64	4.65	0.61
Promedio	0.29	0.48	3.32	0.65

2/3



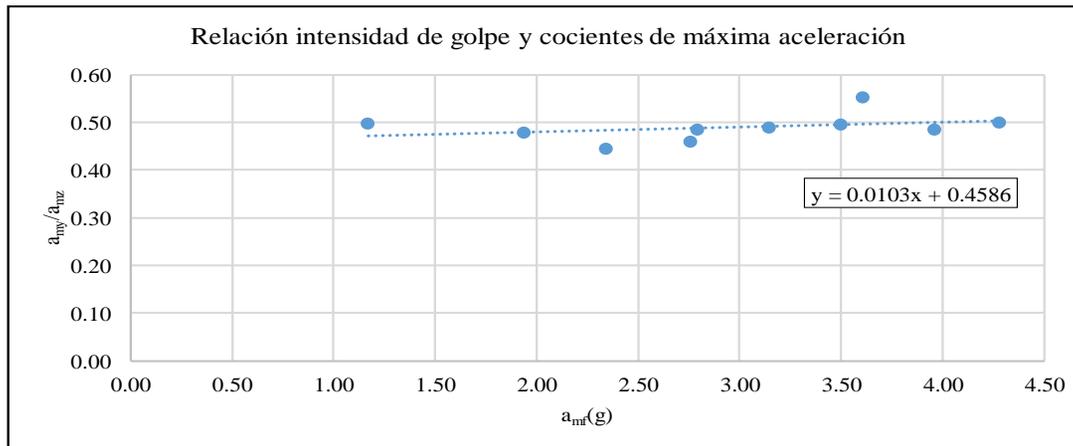
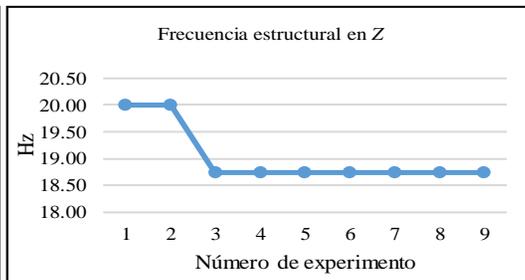
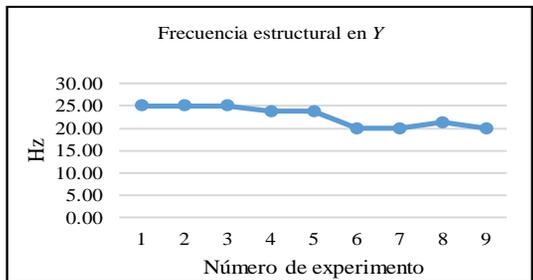
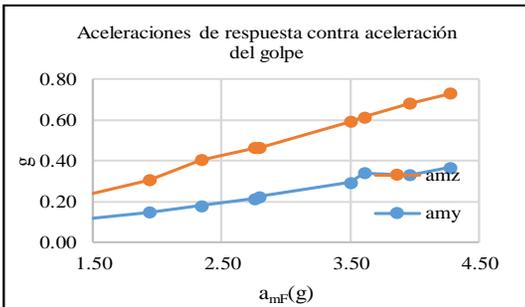
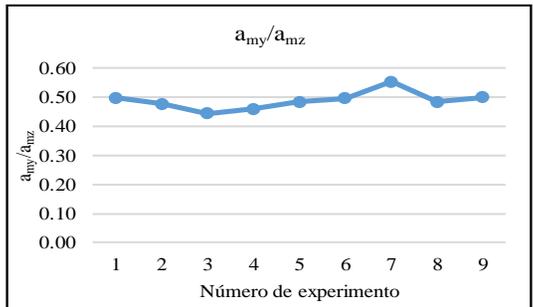
Resumen de pruebas de la respuesta dinámica de la armadura ante un golpe de ariete con una masa extra de cero gramos.

Frecuencia estructural en Z [Hz]	
16C+0-3	20.00
16C+0-5	20.00
16C+0-6	18.75
16C+0-7	18.75
16C+0-8	18.75
16C+0-9	18.75
16C+0-10	18.75
16C+0-11	18.75
16C+0-12	18.75
Promedio	19.03

Frecuencia estructural en Y [Hz]	
16C+0-3	25.00
16C+0-5	25.00
16C+0-6	25.00
16C+0-7	23.75
16C+0-8	23.75
16C+0-9	20.00
16C+0-10	20.00
16C+0-11	21.25
16C+0-12	20.00
Promedio	22.64

Caso	a_{my}	a_{mz}	a_{mF}	a_{my}/a_{mz}
	[g]	[g]	[g]	
16C+0-3	0.09	0.19	1.17	0.50
16C+0-5	0.15	0.31	1.94	0.48
16C+0-6	0.18	0.41	2.34	0.44
16C+0-7	0.21	0.46	2.76	0.46
16C+0-8	0.22	0.46	2.79	0.48
16C+0-9	0.29	0.59	3.50	0.50
16C+0-10	0.34	0.62	3.61	0.55
16C+0-11	0.33	0.68	3.96	0.48
16C+0-12	0.37	0.73	4.28	0.50
Promedio	0.26	0.53	3.15	0.49

1/2



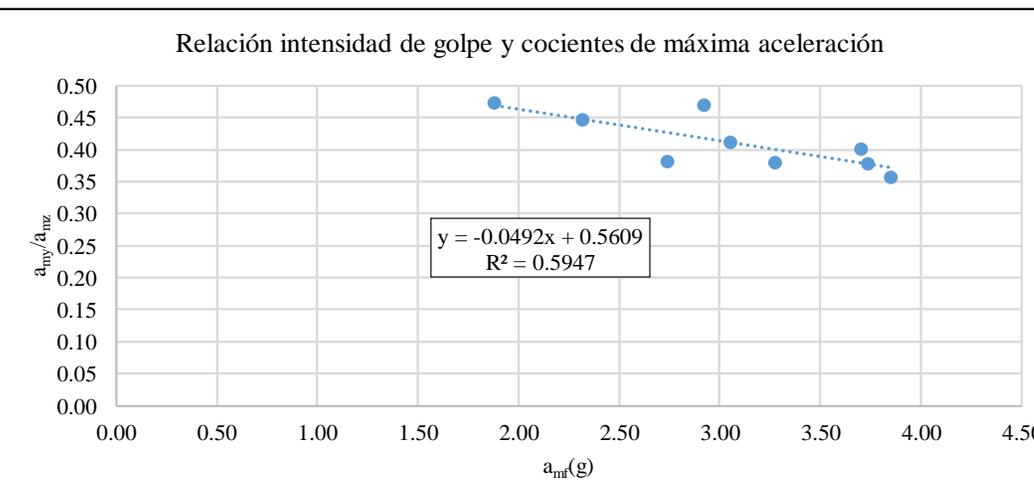
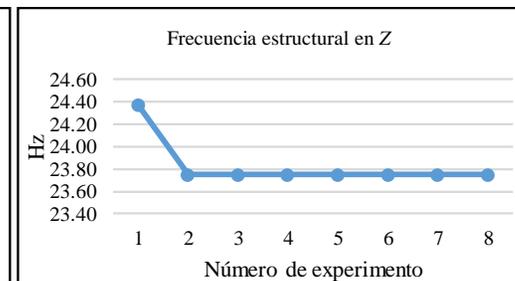
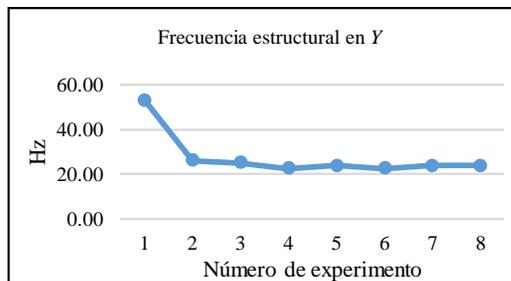
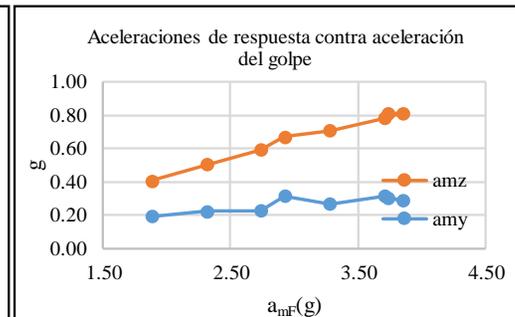
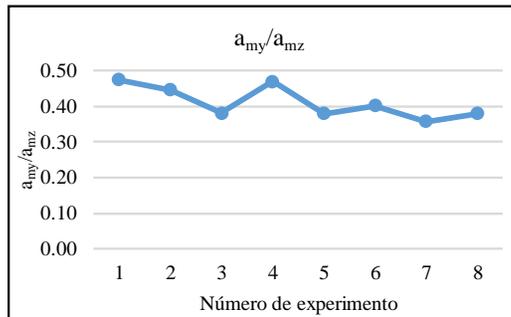
Resumen de pruebas de la respuesta dinámica de la armadura ante un golpe de ariete con una masa extra de cero gramos.

Frecuencia estructural en Z [Hz]	
14C+0-5	24.38
14C+0-6	23.75
14C+0-7	23.75
14C+0-8	23.75
14C+0-9	23.75
14C+0-10	23.75
14C+0-11	23.75
14C+0-12	23.75
Promedio	23.83

Frecuencia estructural en Y [Hz]	
14C+0-5	53.13
14C+0-6	26.00
14C+0-7	25.00
14C+0-8	22.50
14C+0-9	23.75
14C+0-10	22.50
14C+0-11	23.75
14C+0-12	23.75
Promedio	27.55

Caso	a_{my}	a_{mz}	a_{mF}	a_{my}/a_{mz}
	[g]	[g]	[g]	
14C+0-5	0.19	0.41	1.88	0.47
14C+0-6	0.23	0.50	2.32	0.45
14C+0-7	0.23	0.59	2.74	0.38
14C+0-8	0.32	0.67	2.93	0.47
14C+0-9	0.27	0.71	3.28	0.38
14C+0-10	0.31	0.78	3.71	0.40
14C+0-11	0.29	0.81	3.85	0.36
14C+0-12	0.31	0.81	3.74	0.38
Promedio	0.27	0.66	3.05	0.41

2/5



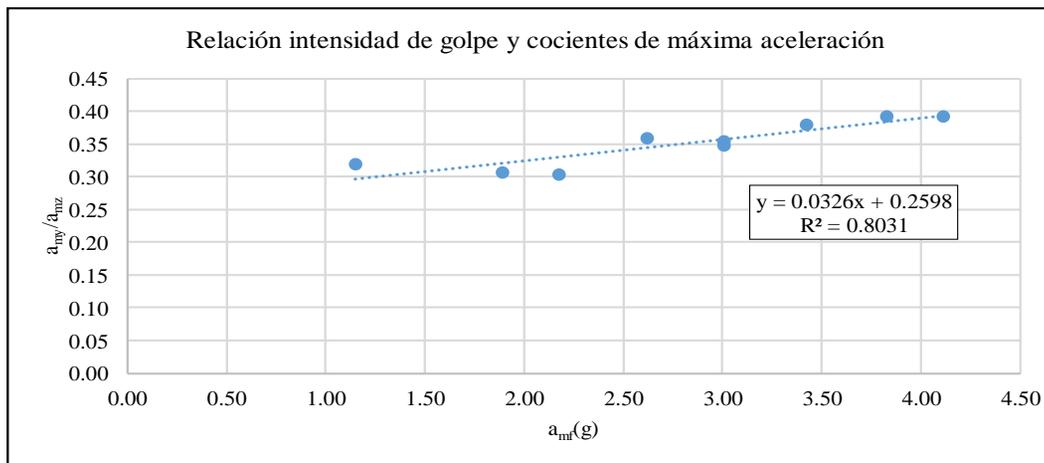
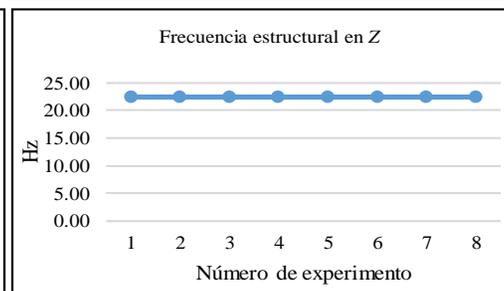
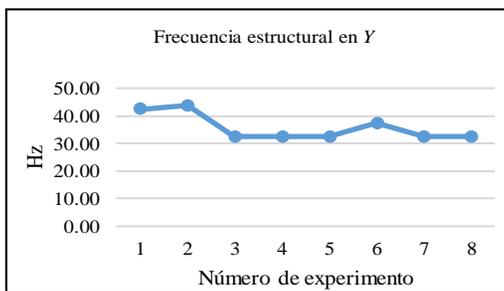
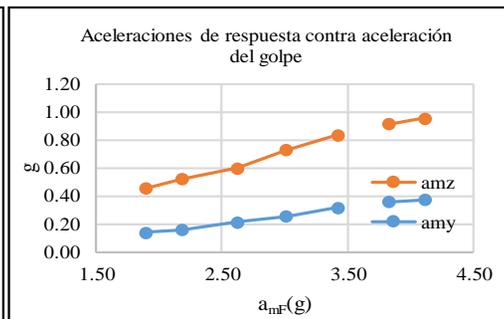
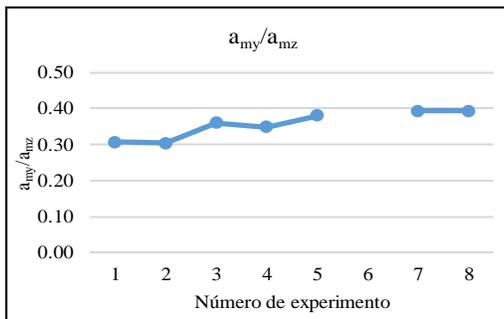
Resumen de pruebas de la respuesta dinámica de la armadura ante un golpe de ariete con una masa extra de cero gramos.

Frecuencia estructural en Z [Hz]	
12C+0-3	23.75
12C+0-5	22.50
12C+0-6	22.50
12C+0-7	22.50
12C+0-8	22.50
12C+0-9	22.50
12C+0-10	22.50
12C+0-11	22.50
12C+0-12	22.50
Promedio	22.50

Frecuencia estructural en Y [Hz]	
12C+0-3	46.25
12C+0-5	42.50
12C+0-6	43.75
12C+0-7	32.50
12C+0-8	32.50
12C+0-9	32.50
12C+0-10	37.44
12C+0-11	32.50
12C+0-12	32.50
Promedio	35.77

Caso	a_{my}	a_{mz}	a_{mF}	a_{my}/a_{mz}
	[g]	[g]	[g]	
12C+0-3	0.09	0.27	1.15	0.32
12C+0-5	0.14	0.45	1.89	0.31
12C+0-6	0.16	0.52	2.18	0.30
12C+0-7	0.22	0.60	2.62	0.36
12C+0-8	0.25	0.73	3.01	0.35
12C+0-9	0.32	0.84	3.43	0.38
12C+0-10				
12C+0-11	0.36	0.91	3.83	0.39
12C+0-12	0.37	0.95	4.11	0.39
Promedio	0.26	0.72	3.01	0.35

1/3



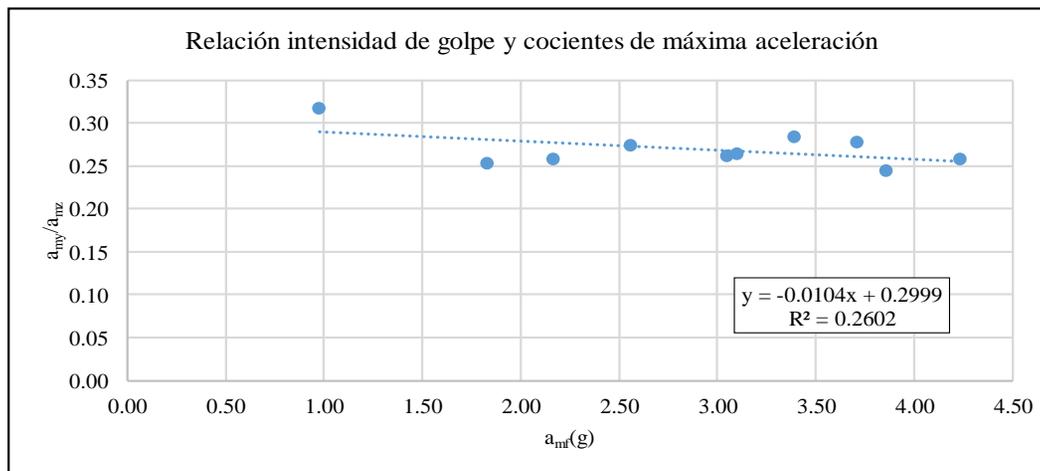
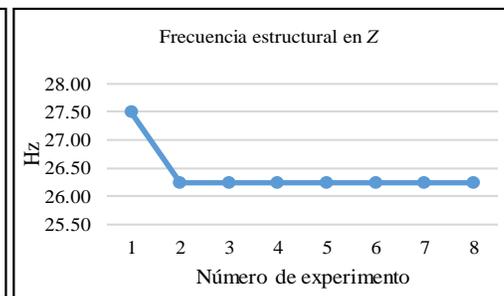
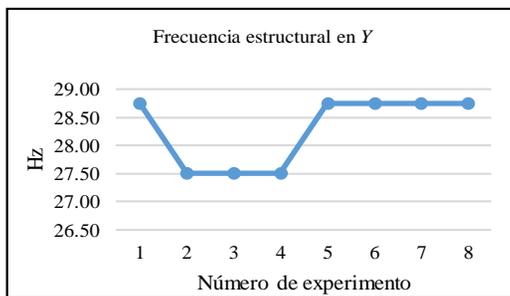
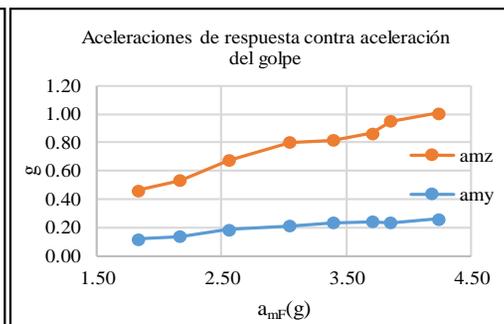
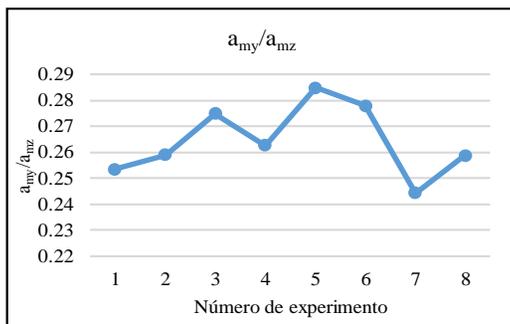
Resumen de pruebas de la respuesta dinámica de la armadura ante un golpe de ariete con una masa extra de cero gramos.

Frecuencia estructural en Z [Hz]	
10C+0-3	27.50
10C+0-5	27.50
10C+0-6	26.25
10C+0-7	26.25
10C+0-8	26.25
10C+0-9	26.25
10C+0-10	26.25
10C+0-11	26.25
10C+0-12	26.25
Promedio	26.53

Frecuencia estructural en Y [Hz]	
10C+0-3	28.75
10C+0-5	28.75
10C+0-6	27.50
10C+0-7	27.50
10C+0-8	27.50
10C+0-9	28.75
10C+0-10	28.75
10C+0-11	28.75
10C+0-12	28.75
Promedio	28.33

Caso	a_{my}	a_{mz}	a_{mF}	a_{my}/a_{mz}
	[g]	[g]	[g]	
10C+0-3	0.07	0.22	0.98	0.32
10C+0-5	0.12	0.46	1.83	0.25
10C+0-6	0.14	0.53	2.17	0.26
10C+0-7	0.19	0.67	2.56	0.27
10C+0-8	0.21	0.80	3.05	0.26
10C+0-9	0.23	0.82	3.39	0.28
10C+0-10	0.24	0.87	3.71	0.28
10C+0-11	0.23	0.95	3.86	0.24
10C+0-12	0.26	1.01	4.24	0.26
Promedio	0.20	0.76	3.10	0.26

1/4

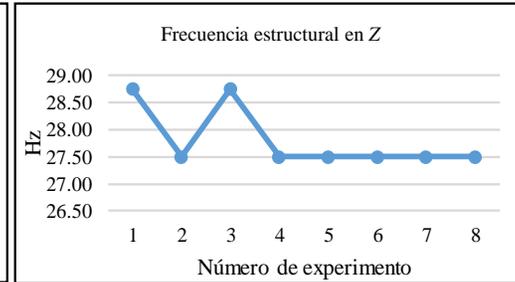
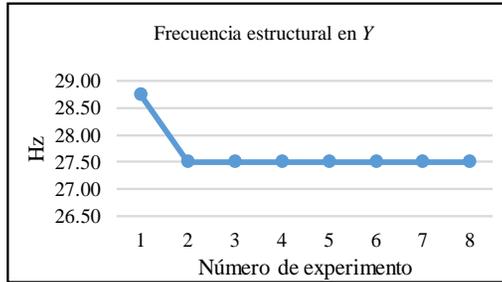
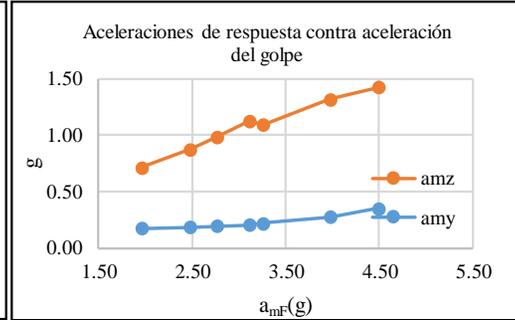
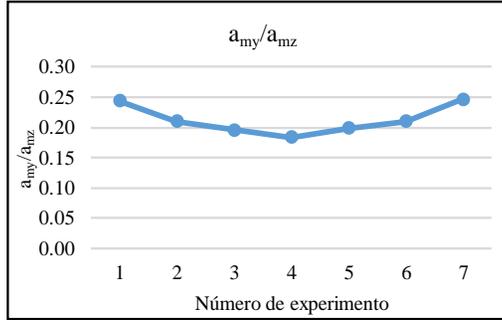


Resumen de pruebas de la respuesta dinámica de la armadura ante un golpe de ariete con una masa extra de cero gramos.

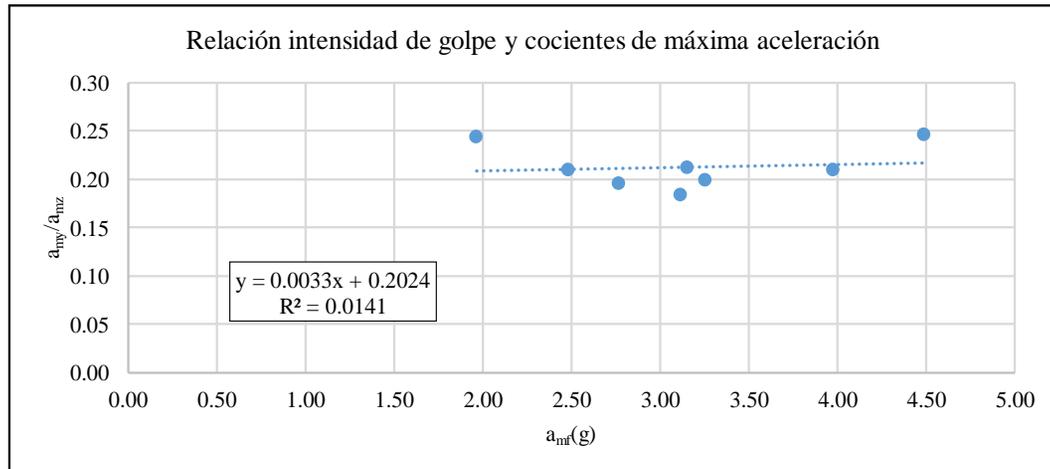
Frecuencia estructural en Z [Hz]	
8C+0-5	28.75
8C+0-6	27.50
8C+0-7	28.75
8C+0-8	27.50
8C+0-9	27.50
8C+0-10	27.50
8C+0-11	27.50
8C+0-12	27.50
Promedio	27.81

Frecuencia estructural en Y [Hz]	
8C+0-5	28.75
8C+0-6	27.50
8C+0-7	27.50
8C+0-8	27.50
8C+0-9	27.50
8C+0-10	27.50
8C+0-11	27.50
8C+0-12	27.50
Promedio	27.66

Caso	a_{my}	a_{mz}	a_{mF}	a_{my}/a_{mz}
	[g]	[g]	[g]	
8C+0-5	0.17	0.71	1.96	0.24
8C+0-6	0.18	0.87	2.48	0.21
8C+0-7	0.19	0.98	2.77	0.20
8C+0-8	0.21	1.12	3.12	0.18
8C+0-9	0.22	1.09	3.26	0.20
8C+0-11	0.28	1.32	3.98	0.21
8C+0-12	0.35	1.42	4.49	0.25
Promedio	0.23	1.07	3.15	0.21



1/5

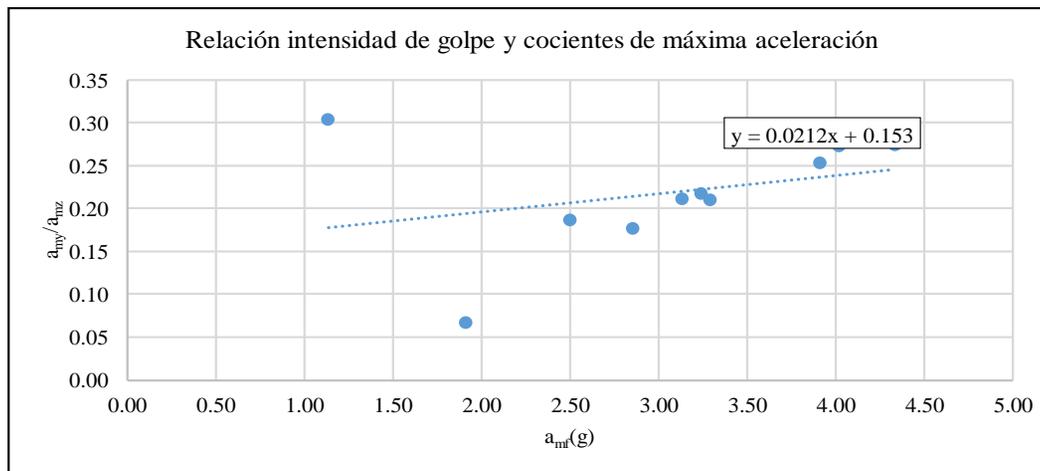
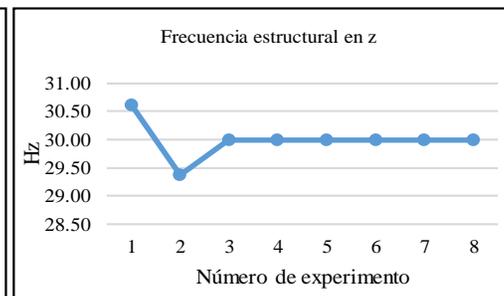
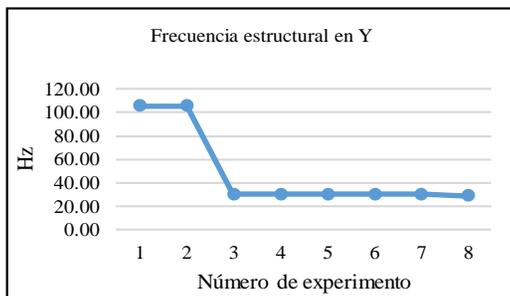
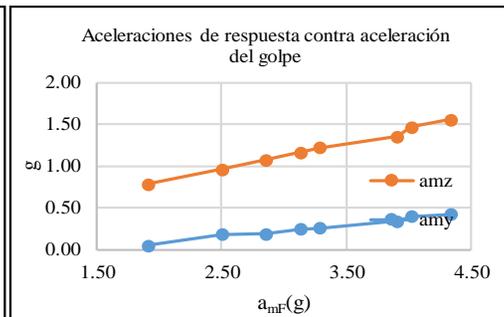
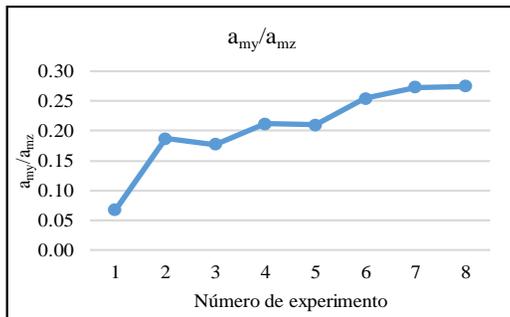


Resumen de pruebas de la respuesta dinámica de la armadura ante un golpe de ariete con una masa extra de cero gramos.

Frecuencia estructural en Z [Hz]	
6C+0-3	30.63
6C+0-5	30.63
6C+0-6	29.38
6C+0-7	30.00
6C+0-8	30.00
6C+0-9	30.00
6C+0-10	30.00
6C+0-11	30.00
6C+0-12	30.00
Promedio	30.00

Frecuencia estructural en Y [Hz]	
6C+0-3	105.63
6C+0-5	105.63
6C+0-6	105.63
6C+0-7	30.00
6C+0-8	30.00
6C+0-9	30.00
6C+0-10	30.00
6C+0-11	30.00
6C+0-12	28.75
Promedio	48.75

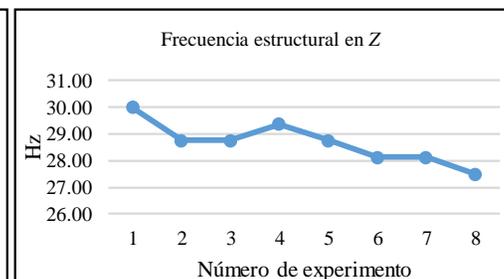
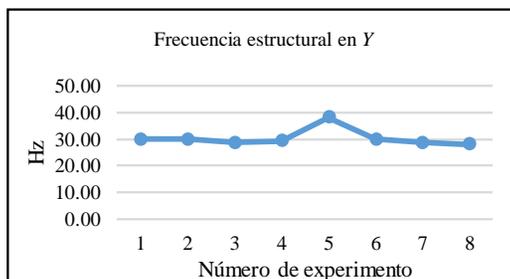
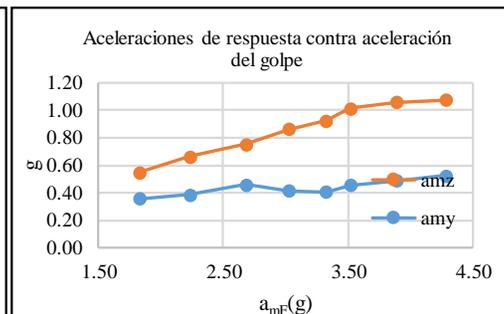
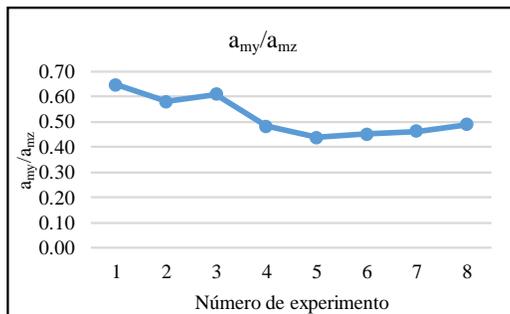
Caso	a_{my}	a_{mz}	a_{mF}	a_{my}/a_{mz}
	[g]	[g]	[g]	
6C+0-3	0.14	0.46	1.14	0.30
6C+0-5	0.05	0.78	1.91	0.07
6C+0-6	0.18	0.96	2.50	0.19
6C+0-7	0.19	1.07	2.86	0.18
6C+0-8	0.25	1.17	3.13	0.21
6C+0-9	0.26	1.22	3.29	0.21
6C+0-10	0.34	1.35	3.91	0.25
6C+0-11	0.40	1.47	4.02	0.27
6C+0-12	0.43	1.55	4.34	0.27
Promedio	0.26	1.20	3.25	0.22



Resumen de pruebas de la respuesta dinámica de la armadura ante un golpe de ariete con una masa extra de cero gramos.

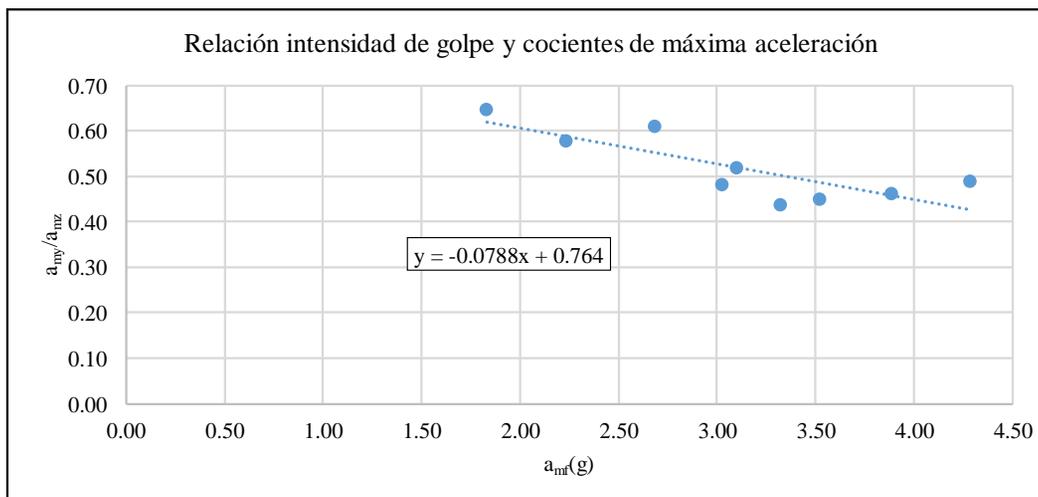
Frecuencia estructural en Z [Hz]	
4C+0-5	30.00
4C+0-6	28.75
4C+0-7	28.75
4C+0-8	29.38
4C+0-9	28.75
4C+0-10	28.13
4C+0-11	28.13
4C+0-12	27.50
Promedio	28.67

Frecuencia estructural en Y [Hz]	
4C+0-5	30.00
4C+0-6	30.00
4C+0-7	28.75
4C+0-8	29.38
4C+0-9	38.13
4C+0-10	30.00
4C+0-11	28.75
4C+0-12	28.13
Promedio	30.39



Caso	a_my	a_mz	a_mF	a_my/a_mz
	[g]	[g]	[g]	
4C+0-5	0.36	0.55	1.83	0.65
4C+0-6	0.38	0.66	2.23	0.58
4C+0-7	0.46	0.75	2.68	0.61
4C+0-8	0.42	0.86	3.03	0.48
4C+0-9	0.40	0.92	3.32	0.44
4C+0-10	0.46	1.01	3.52	0.45
4C+0-11	0.49	1.06	3.89	0.46
4C+0-12	0.52	1.07	4.28	0.49
Promedio	0.44	0.86	3.10	0.52

1/2

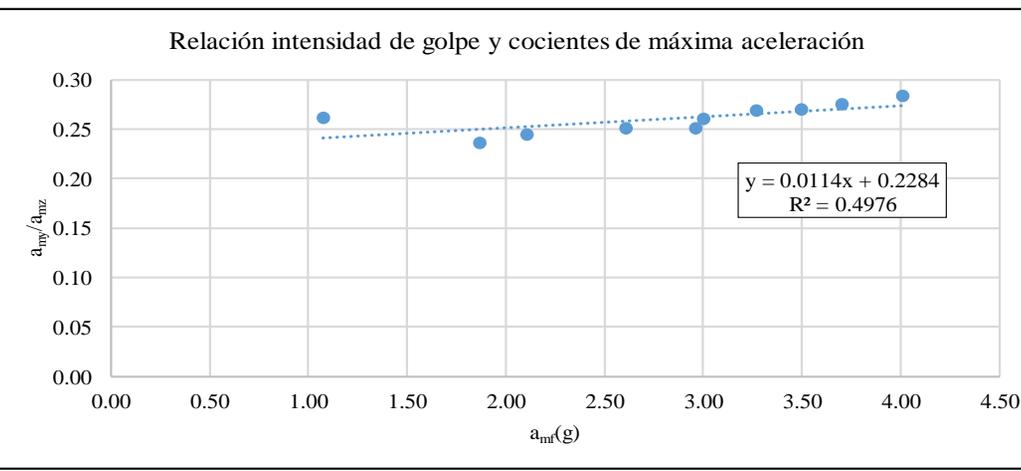
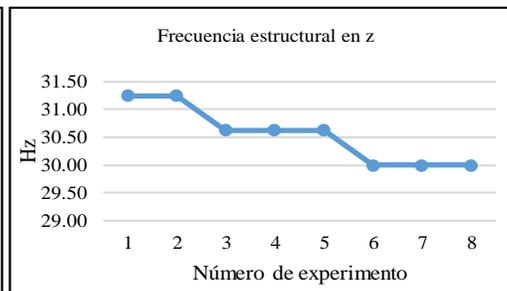
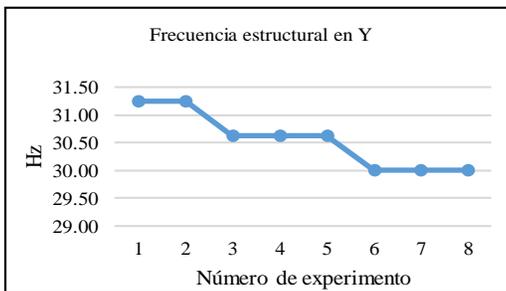
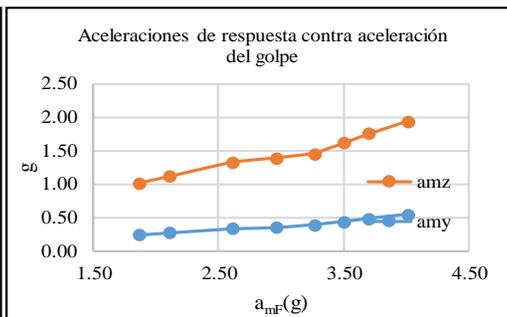
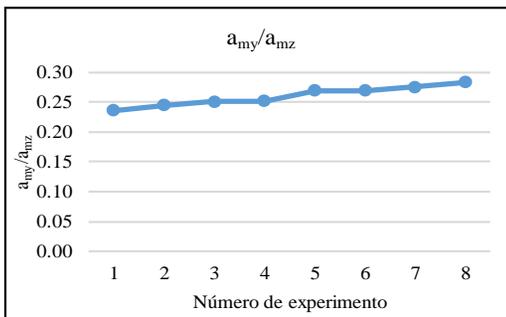


Resumen de pruebas de la respuesta dinámica de la armadura ante un golpe de ariete con una masa extra de cero gramos.

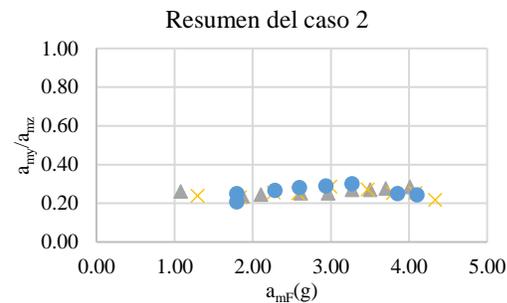
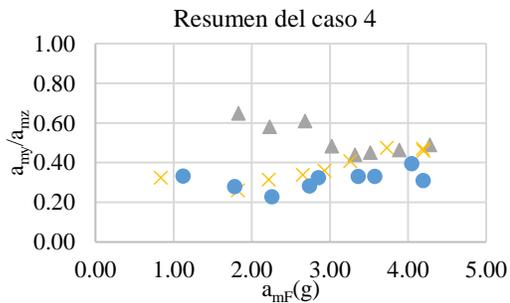
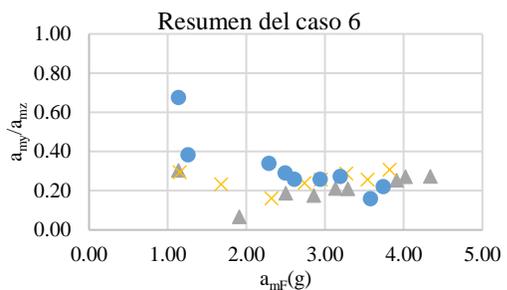
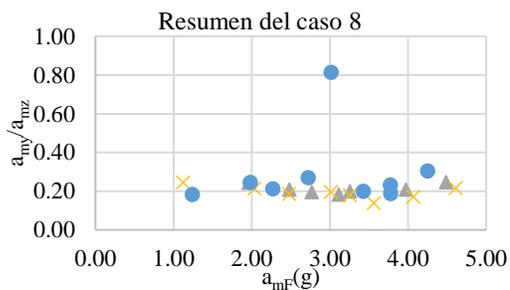
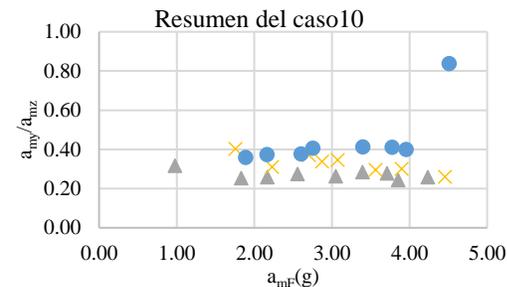
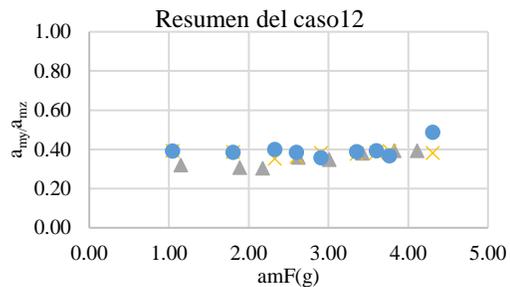
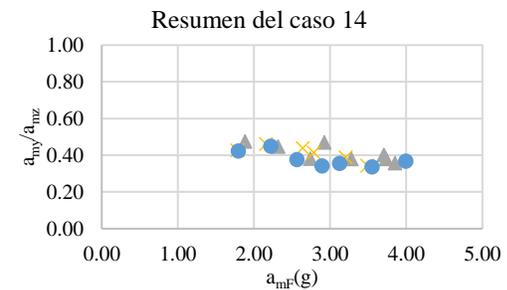
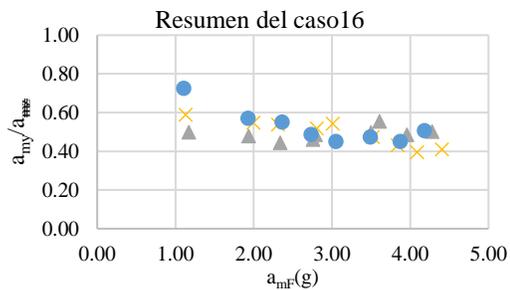
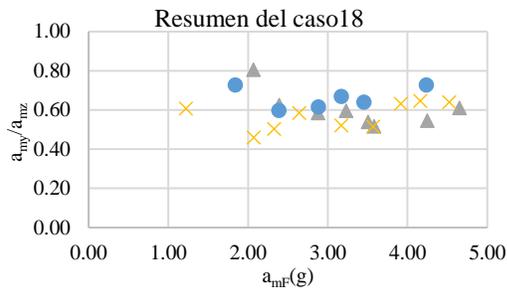
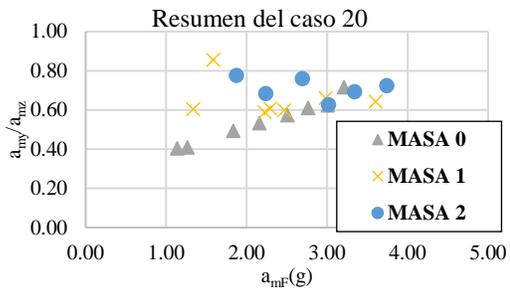
Frecuencia estructural en Z [Hz]	
2C+0-3	32.50
2C+0-5	31.25
2C+0-6	31.25
2C+0-7	30.63
2C+0-8	30.63
2C+0-9	30.63
2C+0-10	30.00
2C+0-11	30.00
2C+0-12	30.00
Promedio	30.76

Frecuencia estructural en Y [Hz]	
2C+0-3	31.25
2C+0-5	31.25
2C+0-6	31.25
2C+0-7	30.63
2C+0-8	30.63
2C+0-9	30.63
2C+0-10	30.00
2C+0-11	30.00
2C+0-12	30.00
Promedio	30.63

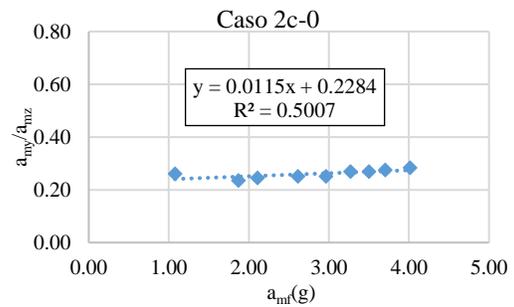
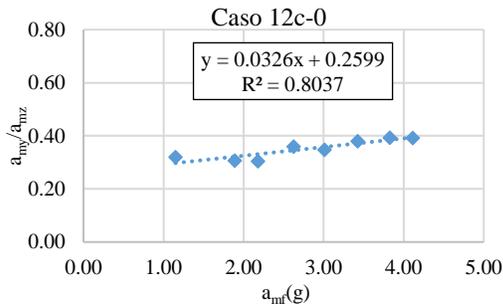
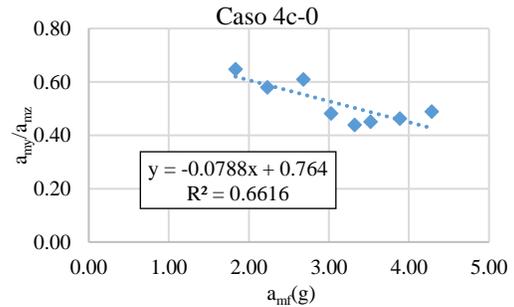
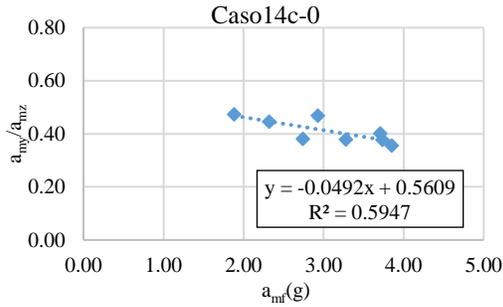
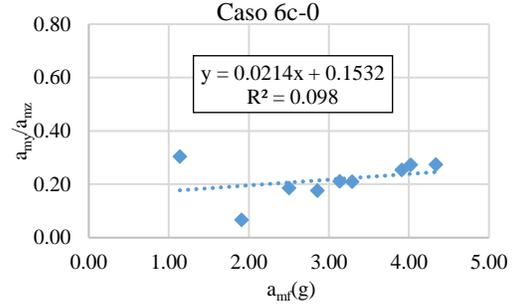
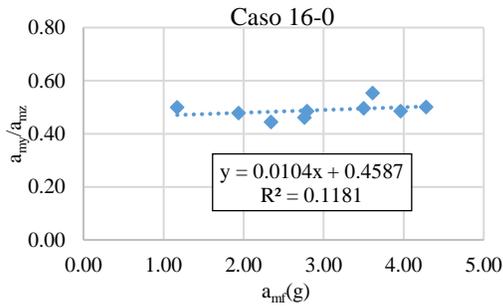
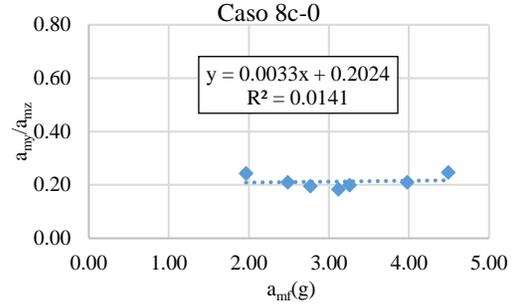
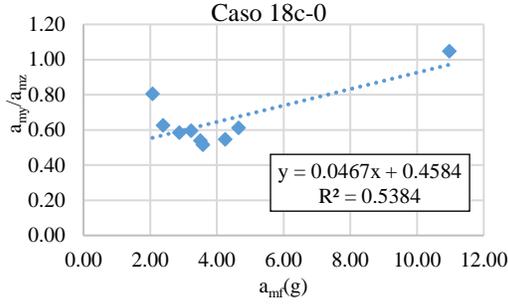
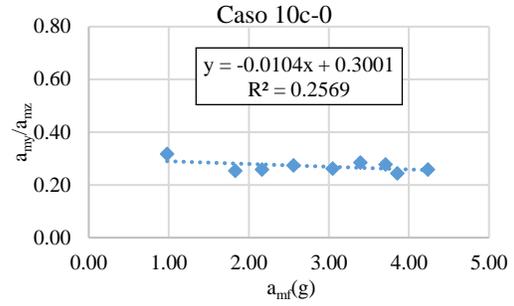
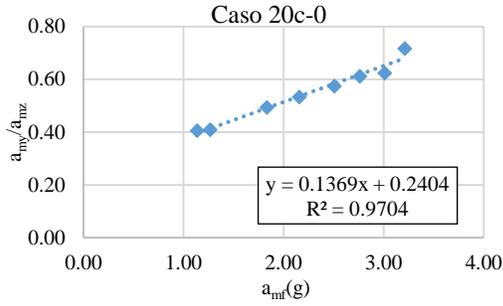
Caso	a_{my}	a_{mz}	a_{mF}	a_{my}/a_{mz}
	[g]	[g]	[g]	
2C+0-3	0.18	0.67	1.08	0.26
2C+0-5	0.24	1.02	1.87	0.24
2C+0-6	0.27	1.12	2.11	0.25
2C+0-7	0.33	1.32	2.61	0.25
2C+0-8	0.35	1.39	2.96	0.25
2C+0-9	0.39	1.45	3.27	0.27
2C+0-10	0.44	1.62	3.50	0.27
2C+0-11	0.48	1.76	3.70	0.28
2C+0-12	0.55	1.93	4.01	0.28
Promedio	0.38	1.45	3.01	0.26

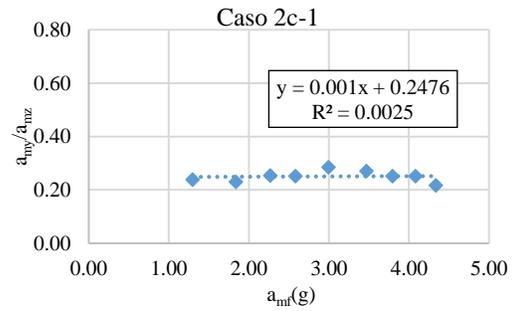
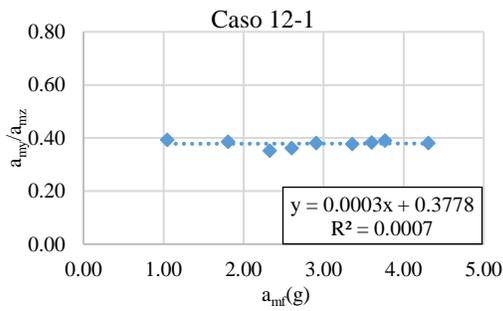
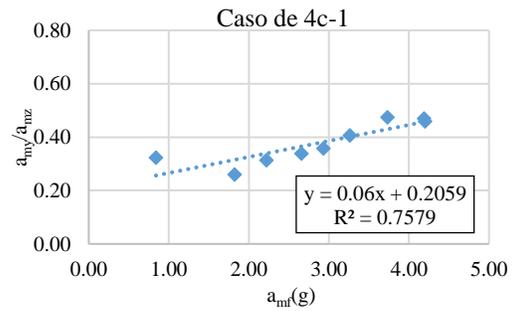
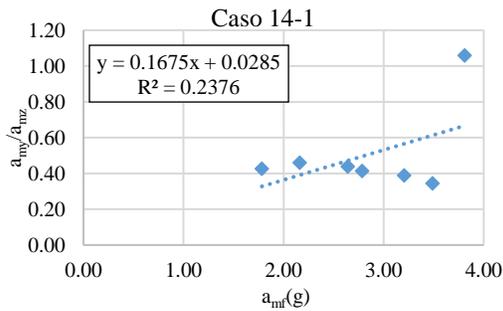
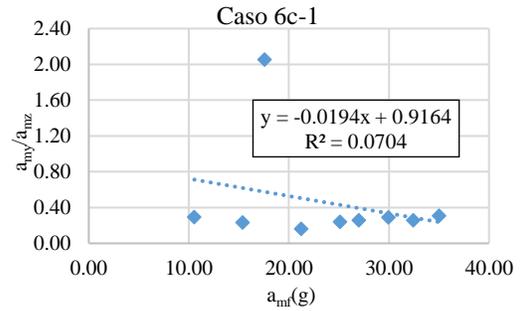
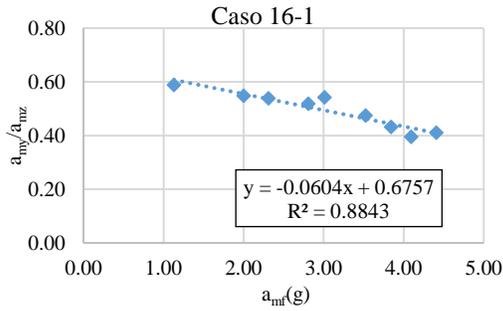
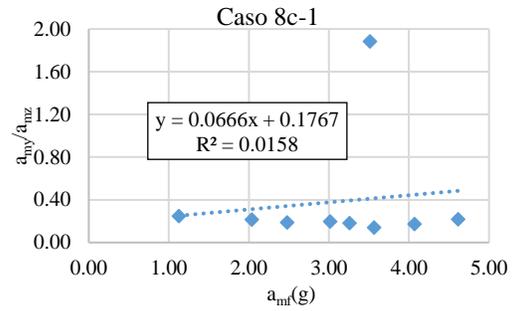
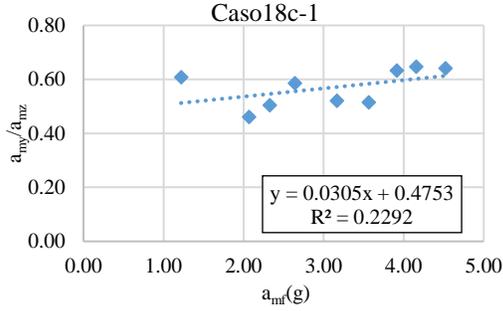
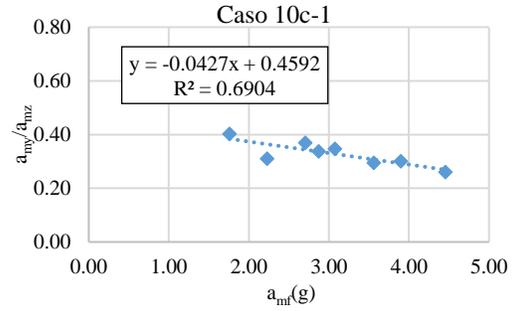
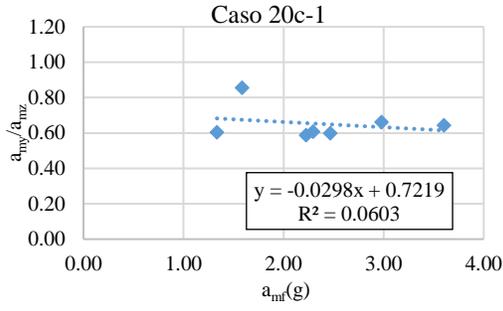


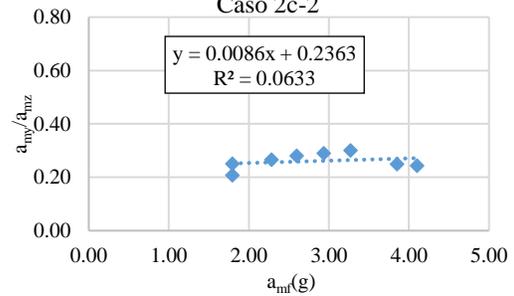
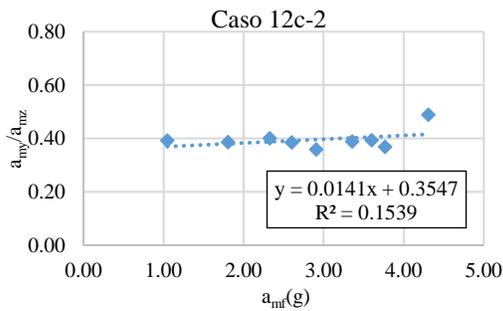
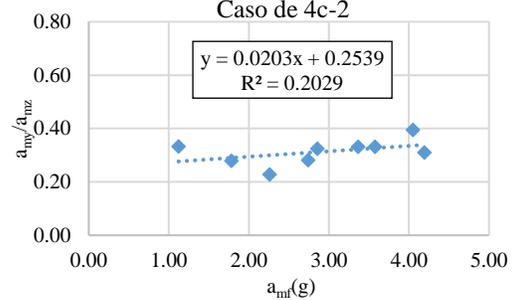
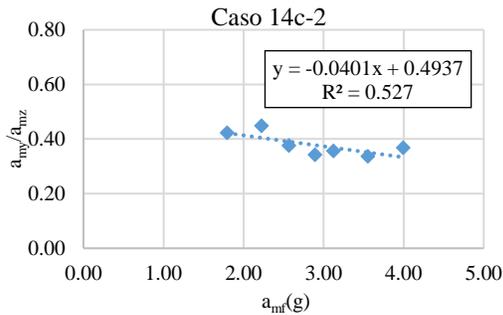
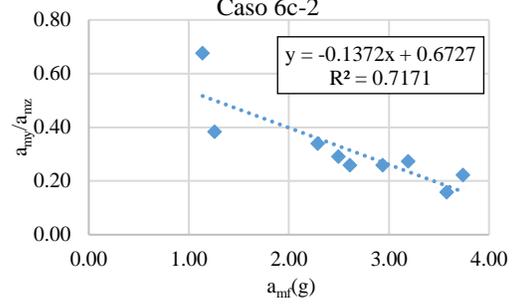
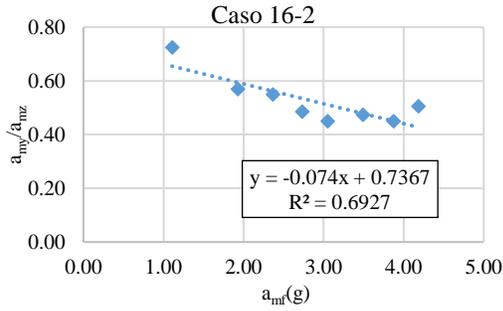
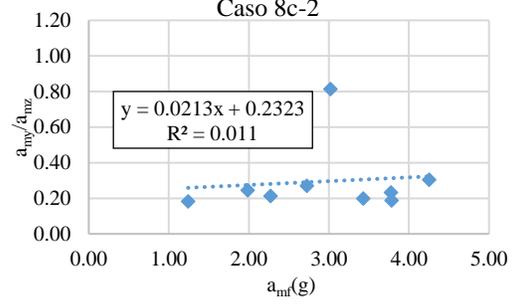
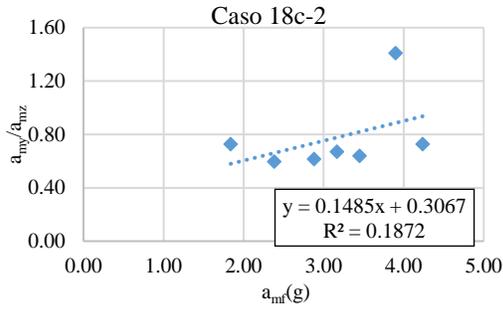
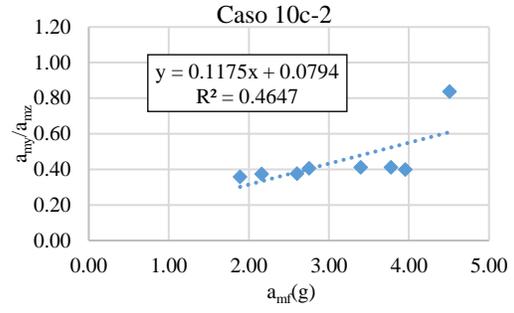
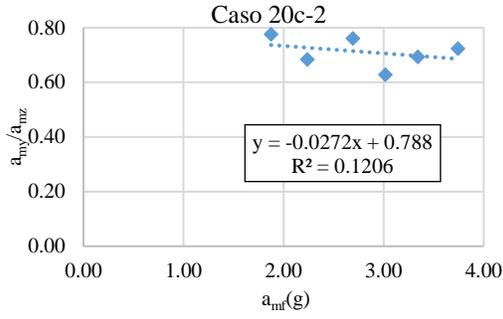
**Anexo III. Resumen de los cocientes de
aceleraciones de respuesta contra la aceleración
del impacto para cada caso.**



Anexo IV. Ajuste lineal a la tendencia de las relaciones de las aceleraciones de cada caso.







Anexo V. Factores de seguridad de la Ec. (6.5)

a_{yr}	a_{yCl}	Fs	a_{yr}	a_{yCl}	Fs
0.081	0.092	1.134	0.086	0.074	0.854
0.087	0.097	1.122	0.140	0.124	0.889
0.249	0.115	0.460	0.158	0.142	0.898
0.159	0.137	0.862	0.216	0.164	0.759
0.193	0.155	0.801	0.254	0.200	0.785
0.217	0.163	0.752	0.317	0.228	0.719
0.234	0.172	0.737	0.359	0.250	0.694
0.290	0.186	0.642	0.374	0.260	0.696
0.210	0.082	0.391	0.069	0.050	0.724
0.241	0.123	0.509	0.117	0.106	0.908
0.233	0.153	0.655	0.137	0.122	0.888
0.248	0.174	0.701	0.185	0.155	0.837
0.274	0.189	0.688	0.211	0.185	0.876
0.276	0.210	0.761	0.233	0.188	0.808
0.285	0.226	0.793	0.240	0.199	0.828
0.339	0.254	0.750	0.232	0.219	0.941
0.390	0.261	0.670	0.261	0.232	0.889
0.094	0.069	0.732	0.174	0.132	0.758
0.147	0.112	0.763	0.183	0.161	0.881
0.180	0.148	0.821	0.193	0.182	0.945
0.214	0.169	0.792	0.206	0.208	1.006
0.225	0.169	0.752	0.217	0.201	0.928
0.294	0.217	0.736	0.277	0.243	0.880
0.341	0.225	0.659	0.351	0.263	0.749
0.330	0.249	0.753	0.141	0.063	0.448
0.367	0.267	0.729	0.053	0.107	2.032
0.194	0.130	0.673	0.180	0.131	0.731
0.225	0.161	0.715	0.190	0.146	0.771
0.227	0.190	0.837	0.246	0.159	0.646
0.315	0.214	0.680	0.256	0.166	0.650
0.268	0.225	0.842	0.343	0.185	0.537
0.314	0.250	0.795	0.400	0.200	0.500
0.290	0.259	0.895	0.426	0.175	0.786

Anexo VI. Fotografías del proceso constructivo.



Figura 11 Construcción de la armadura en la fase 2.



Figura 12 Agregados de concreto para el muerto.

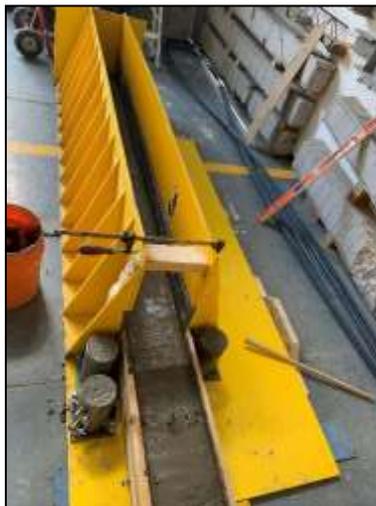


Figura 13 Colado del muerto.



Figura 14 Excavación y colocación del muerto.

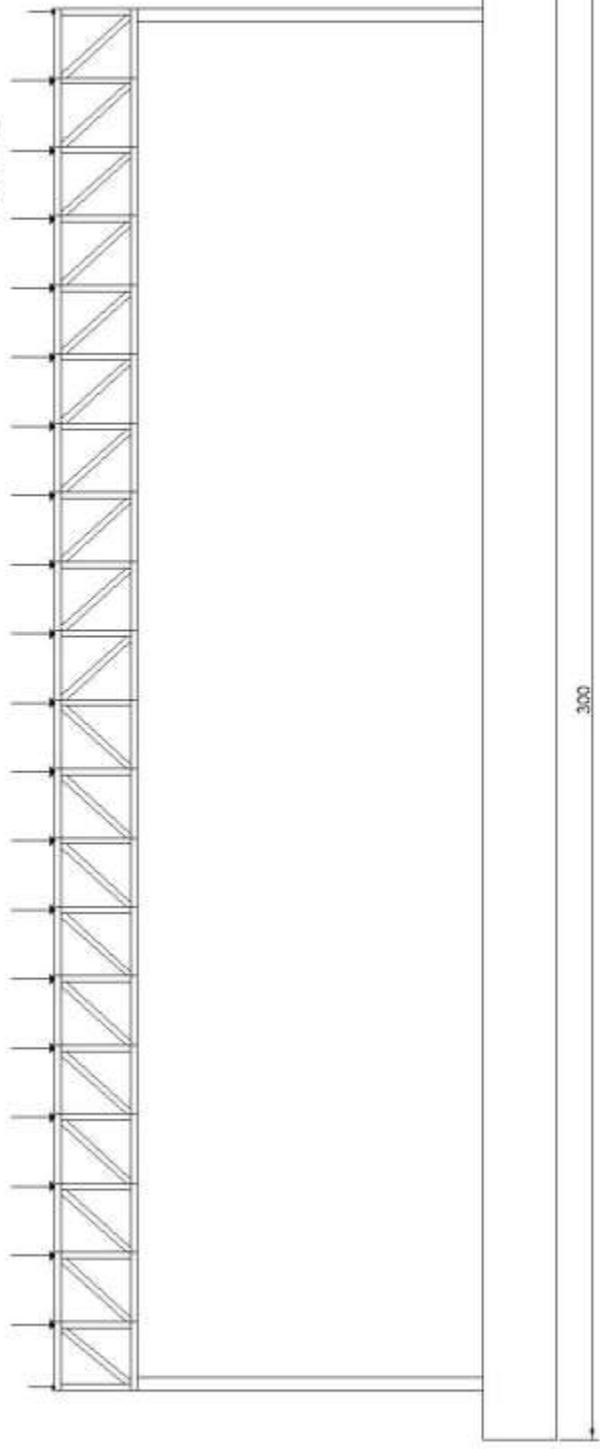
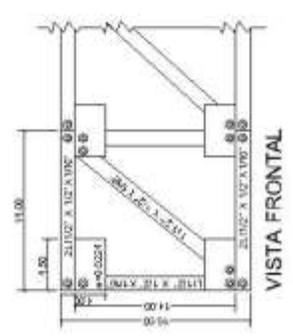
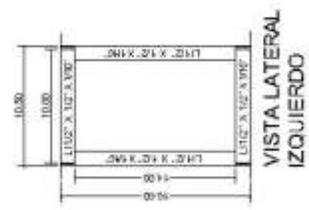
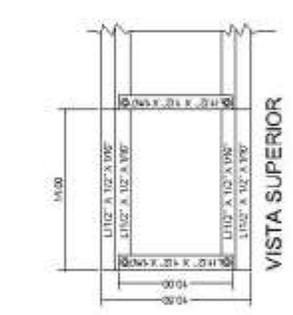
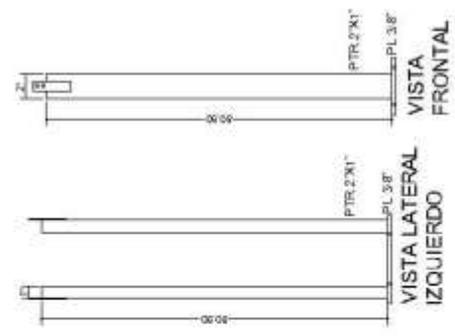
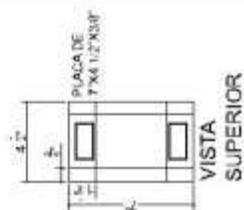


Figura 15 Ubicación del péndulo de Charpy.



Figura 16 Empotramiento de columnas.

Anexo VII. Planos



SIMBOLOGIA	<p>↓ CARGA APLICADA</p> <p>L L 1/2" X 1/2" X 1/8"</p>
DIBUJANTE:	FLDRES IBLAS VIVIANA
PLANO:	ARMADURA DE ALUMINIO
ESCALA:	1:950
ACOTACION:	CIM
FECHA:	12/19
NO. PLANO:	E1