



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**CARACTERIZACIÓN DE EQUIPOS Y PROCEDIMIENTOS PARA EL ENSAYO DINÁMICO DE
ESTRUCTURAS Y RECOMENDACIONES PARA EL MEDIO GUATEMALTECO**

Juan Carlos Canel Sequen

Asesorado por el Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz

Guatemala, marzo de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN DE EQUIPOS Y PROCEDIMIENTOS PARA EL ENSAYO DINÁMICO DE
ESTRUCTURAS Y RECOMENDACIONES PARA EL MEDIO GUATEMALTECO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JUAN CARLOS CANEL SEQUEN

ASESORADO POR EL ING. FRANCISCO JAVIER QUIÑONEZ DE LA CRUZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, MARZO DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

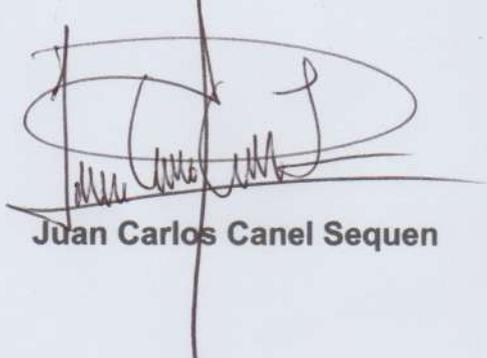
DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADORA	Inga. Karla Giovanna Judith Pérez Loarca.
EXAMINADOR	Ing. Andy William Alonzo Vasquez.
EXAMINADOR	Ing. Luis Estuardo Saravia Ramírez.
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CARACTERIZACIÓN DE EQUIPOS Y PROCEDIMIENTOS PARA EL ENSAYO DINÁMICO DE ESTRUCTURAS Y RECOMENDACIONES PARA EL MEDIO GUATEMALTECO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 30 de abril de 2018.



Juan Carlos Canel Sequen



Guatemala 22 de julio de 2020

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Jefe del Área de Materiales y Construcciones Civiles
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Montenegro:

Tengo el agrado de dirigirme a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación **"CARACTERIZACIÓN DE EQUIPOS Y PROCEDIMIENTOS PARA EL ENSAYO DINÁMICO DE ESTRUCTURAS Y RECOMENDACIONES PARA EL MEDIO GUATEMALTECO"**, desarrollado por el estudiante universitario **Juan Carlos Canel Sequen**, quien contó con mi asesoría.

Considero que el trabajo realizado por el estudiante Canel Sequen satisface los objetivos para los cuales fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,

Francisco Javier Quiñón de la Cruz
Ingeniero Civil Colegiado No. 1941



Guatemala, 25 agosto de 2020

Ingeniero
Pedro Antonio Aguilar Polanco
Director Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

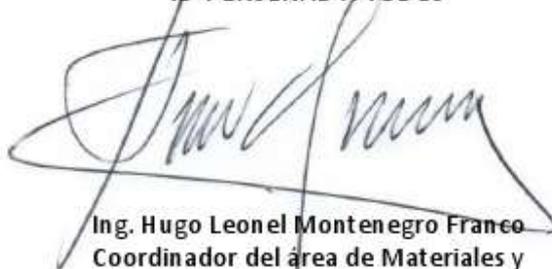
Estimado Ingeniero Aguilar,

Le informo que he revisado el trabajo de graduación "CARACTERIZACIÓN DE EQUIPOS Y PROCEDIMIENTOS PARA EL ENSAYO DINÁMICO DE ESTRUCTURAS Y RECOMENDACIONES PARA EL MEDIO GUATEMALTECO", desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Juan Carlos Canel Sequen, quién contó con la asesoría del Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo, doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco
Coordinador del área de Materiales y
Construcciones Civiles

FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC





El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz y del Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco al trabajo de graduación del estudiante Juan Carlos Canel Sequen **CARACTERIZACIÓN DE EQUIPOS Y PROCEDIMIENTOS PARA EL ENSAYO DINÁMICO DE ESTRUCTURAS Y RECOMENDACIONES PARA EL MEDIO GUATEMALTECO**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

Sin otro particular, le saludo muy atentamente.

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Armando Fuentes Roca
Director Escuela Ingeniería Civil

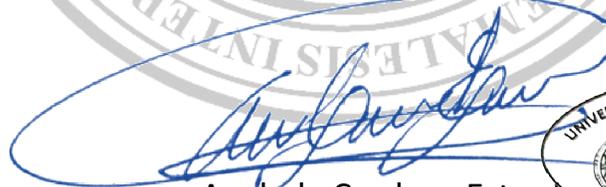
Guatemala, marzo 2021
/mrrm.



DTG. 090.2021.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **CARACTERIZACIÓN DE EQUIPOS Y PROCEDIMIENTOS PARA EL ENSAYO DINÁMICO DE ESTRUCTURAS Y RECOMENDACIONES PARA EL MEDIO GUATEMALTECO**, presentado por el estudiante universitario: **Juan Carlos Canel Sequen**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, marzo de 2021.

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por haberme permitido llegar hasta este punto de mi vida y darme salud física y mental para lograr mis objetivos en la vida, además de su infinita bondad y amor.
- Mi madre** María Omelia Sequen Canel. Por su luz infinita para jamás dejar de creer en mí y apoyarme incondicionalmente en cada paso de mi vida y en la universidad, tanto económica como moralmente, para yo poder llegar a ser un profesional de la patria.
- Mi padre** Juan Carlos Canel Orellana. Por permitirme continuar con mis estudios y apoyarme para yo ser un profesional de la patria.
- Mis hermanas** Jackelin Joana y Jennifer Fabiola Canel Sequen. Por ser una importante influencia en mi carrera y apoyarme incondicionalmente.
- Mis tíos** Lesbia Aracely, Mynor (q. e. p. d), Héctor David, Ana Patricia, Dominga Rosario, Lilian Lizet, todos Canel Orellana por su apoyo incondicional.

Abuela

Piedad Orellana (q. e. p. d). Por sus consejos y amor incondicional durante su hermosa estadía en la tierra.

Primos y hermano

Gabriela Abigail Martínez Canel, David Estuardo Gonzales Canel, Cristian Alexander Canel Orellana y Matías Andrée Canel Sequen, por ser mi inspiración en demostrar que con esfuerzo, trabajo y dedicación las metas y objetivos se pueden lograr.

Mis sobrinos

Por ser la alegría de mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala

Mi agradecimiento eterno a mi universidad. Después de años de esfuerzo, sacrificios, dedicación y grandes alegrías llegó el día en que miraría hacia atrás el camino recorrido por tus pasillos y aulas, y me detendría para agradecerte, ¡mi *Alma Máter!*

Facultad de ingeniería

Que en tus aulas, en tus pasillos, en tu campo lleno de alegría, entre amigos, entre grandes catedráticos, noches interminables, llantos y alegrías, finalizó tu meta de educarme profesionalmente en la carrera de Ingeniería Civil. Fue un gran honor ser parte de esta extraordinaria Facultad. ¡Muchas gracias!

Catedráticos

Mi más cordial reconocimiento y agradecimiento a todos y cada uno de los ingenieros de la Facultad, porque supieron brindarme su amplia experiencia profesional.

**Asesor Ing. Francisco
Javier Quiñónez de la
Cruz**

Mi total agradecimiento por su amistad, colaboración, orientación y noble paciencia en la realización del presente trabajo, ya que supo encaminarme por el camino correcto de la mejor manera con su amplio repertorio de conocimientos.

**Dr. Ing. Edgar Virgilio
Ayala Zapata**

Por el entusiasmo que siempre me ha contagiado, su colaboración y ayuda para tener un pensamiento crítico lógico y creativo.

**Mis amigos de la
facultad**

Agradezco a todos los que fueron mis amigos y compañeros de clase durante todos los años de Universidad, ya que gracias al compañerismo, amistad y apoyo moral e intelectual han aportado en un alto porcentaje a mis ganas de seguir adelante en mi profesión.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XVII
JUSTIFICACIÓN.....	XIX
METODOLOGIA DE INVESTIGACION	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
INTRODUCCIÓN	XXV
1. MARCO CONCEPTUAL.....	1
1.1. ¿Por qué es importante el estudio de la aplicación de cargas laterales en las estructuras?	1
2. MÉTODOS DE ENSAYO PARA LA APLICACIÓN DE CARGA LATERAL EN ESTRUCTURAS.....	3
2.1. Ensayo cuasi-estático.....	3
2.2. Ensayo falso-dinámico.....	3
2.3. Ensayo dinámico en mesa sísmica	4
3. MARCO DE CARGA	5
3.1. ¿Qué es un marco de carga?	5
3.2. ¿Para qué sirve?	5
3.3. ¿Cómo funciona?	5
3.4. ¿Cuáles son sus aplicaciones?	5
3.5. Partes que conforman un marco de carga o de reacción	6

3.5.1.	Columnas	6
3.5.2.	Travesaño o viga.....	6
3.5.3.	Travesaño inferior de cierre.....	7
3.6.	Descripción del equipo de aplicación de carga lateral que utiliza un marco de carga	8
3.6.1.	Sistema hidráulico	8
3.6.2.	Servo válvula.....	9
3.6.3.	Actuadores	9
3.6.4.	Computador.....	9
3.6.5.	Sistema de adquisición de datos.....	10
3.7.	Instrumentación básica utilizada en un marco de carga.....	10
3.7.1.	Célula de carga	10
3.7.2.	Transductor de deformación.....	11
3.7.3.	Transductor de desplazamiento	11
3.8.	Descripción de marcos de carga localizados en este trabajo...	11
3.8.1.	Marco de carga de la Pontificia Universidad Católica de Perú (PUCP).....	11
3.8.2.	Marcos de carga lateral de la Universidad San Carlos de Guatemala (USAC)	20
3.8.3.	Marcos de carga lateral de la Universidad de El Salvador (UES)	26
3.9.	Ventajas del marco de carga.....	36
3.10.	Desventajas del marco de carga.....	37
4.	MURO DE REACCIÓN	39
4.1.	¿Qué es un muro de reacción?	39
4.2.	¿Para qué sirve?	39
4.3.	¿Cómo funciona?	39
4.4.	¿Cuáles son sus aplicaciones?	40

4.5.	Partes que conforman un muro y losa de reacción	42
4.5.1.	Galerías horizontales	42
4.5.2.	Muro vertical de sostenimiento	42
4.5.3.	Losa de reacción	42
4.5.4.	Muro de reacción	43
4.5.5.	Galerías verticales	43
4.5.6.	Losas de trabajo	43
4.5.7.	Muro de cortante.....	43
4.5.8.	Tacón.....	44
4.6.	Descripción del equipo de aplicación de carga lateral en muro de reacción.....	44
4.6.1.	Sistema hidráulico	44
4.6.2.	Actuadores.....	44
4.6.3.	Servo válvula	45
4.6.4.	Computador	45
4.6.5.	Adquisición de datos.....	45
4.7.	Instrumentación básica utilizada en un muro de reacción	46
4.7.1.	Medidor de desplazamiento.....	46
4.7.2.	Transductor de fuerza.....	47
4.7.3.	Indicador de cuadrante	47
4.8.	Descripción de muros de reacción localizados en este trabajo.....	48
4.8.1.	Muro de reacción de la Universidad Nacional de Taiwán	48
4.8.2.	Muro de reacción de la Universidad de Coruña, España	50
4.8.3.	Muro de reacción de la Universidad de Lehigh, Estados Unidos de América.....	52

4.8.4.	Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA), El Salvador.....	55
4.9.	Ventajas del muro de reacción.....	57
4.10.	Desventajas del muro de reacción.....	58
5.	MESA SÍSMICA.....	59
5.1.	¿Qué es una mesa sísmica?.....	59
5.2.	¿Para qué sirve?.....	59
5.3.	¿Cómo funciona?.....	59
5.4.	¿Cuáles son sus aplicaciones?.....	59
5.5.	Partes que conforman una mesa sísmica.....	61
5.5.1.	Plataforma rígida del simulador.....	62
5.5.2.	Masa de reacción.....	62
5.5.3.	Sistema de soporte lineal.....	62
5.6.	Descripción del equipo de aplicación de carga lateral que utiliza una mesa sísmica.....	63
5.6.1.	Sistema hidráulico.....	63
5.6.2.	Actuador.....	63
5.6.3.	Servo válvula.....	63
5.6.4.	Computador.....	64
5.6.5.	Sistema de adquisición de datos.....	64
5.7.	Instrumentación básica utilizada en una mesa sísmica.....	64
5.7.1.	Acelerómetro.....	65
5.7.2.	Galga extensométrica.....	65
5.7.3.	Celdas de carga.....	65
5.7.4.	Sensor de movimiento o desplazamiento.....	65
5.8.	Mesas sísmicas localizadas durante este trabajo.....	65
5.8.1.	Mesa sísmica del Centro de Investigación de Ingeniería de Terremotos de Hyogo, Japón.....	66

5.8.2.	Mesa sísmica de la Universidad Nacional de Costa Rica Lanamme UCR.....	69
5.8.3.	Laboratorio de Simulación Sísmica de la Universidad Mariano Gálvez de Guatemala	71
5.8.4.	Mesa sísmica del Laboratorio de Estructuras de la Universidad de El Salvador (UES).....	71
5.9.	Ventajas de la mesa sísmica	74
5.10.	Desventajas de la mesa sísmica	75
6.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	77
6.1.	Síntesis de los equipos de ensayos dinámicos estructurales ..	79
6.1.1.	Marco de carga o reacción	79
6.1.2.	Muro y losa de reacción.....	79
6.1.3.	Mesa sísmica.....	80
	CONCLUSIONES	83
	RECOMENDACIONES.....	85
	BIBLIOGRAFÍA.....	87

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ilustración de un marco de carga	7
2.	Marcos de carga de PUCP	13
3.	Actuadores de PUCP	14
4.	Ensayo de carga lateral con un marco de carga de PUCP	16
5.	Instrumentación utilizada en ensayo en marco de carga	19
6.	Estado de muros al finalizar ensayo en marco de carga.....	19
7.	Ensayo en marco de carga de USAC.....	23
8.	Esquema de aplicación de carga lateral en marco de carga.....	24
9.	Instrumentación utilizada en marco de carga de USAC	25
10.	Marco de carga y ensayo de paneles livianos en USAC.....	26
11.	Marco de carga de UES	28
12.	Actuadores de UES.....	29
13.	Decodificador de datos de UES	30
14.	Actuador vertical utilizado en marco de carga.....	32
15.	Gato hidráulico con celda de carga de 50 toneladas	32
16.	Ensamblaje completo de dispositivos en el marco de carga	33
17.	Transductores de desplazamiento	35
18.	Propuesta de ubicación de transductores	36
19.	Ilustración de un muro de reacción	40
20.	Componentes de un muro de reacción	41
21.	Muro y losa de reacción, Taiwán.....	49
22.	Muro y losa de reacción, CITEEC	51
23.	Muro y losa de reacción-Universidad de Lehigh	53

24.	Actuador utilizado en muro y losa de reacción de Lehigh.....	54
25.	Muro y losa de reacción de UCA	56
26.	Ilustración de una mesa sísmica unidireccional.....	60
27.	Resumen de mesa sísmica de INDE	67
28.	Experimento en mesa sísmica gigante de INDE.....	68
29.	Mesa sísmica portátil de Lanamme	70
30.	Mesa sísmica de UMG.....	72
31.	Mesa inclinable UES.....	73
32.	Ensayo de módulo en mesa inclinable de UES	74

TABLAS

I.	Componentes de un marco de carga.....	8
II.	Fases de ensayo en marco de carga.....	15
III.	Comportamiento de los muros ensayados en marco de carga.....	18
IV.	Descripción de componentes del marco de carga	34
V.	Cantidad y capacidad de transductores de desplazamiento.....	34
VI.	Componente de una mesa sísmica unidireccional.....	61

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
g	Gravedad
GPM	Galones por minuto
Hz	Hertz
Kg	Kilogramo
kN	Kilo newton
lpm	Litros por minuto
lpu	Litros por unidad
m	Metro
m/s	Metros por segundo
m³	Metros cúbicos
mm	Milímetros
mm/s	Milímetros por segundo
MN	Mega Newton
MN-m	Mega Newton metro
Mpa	Mega pascales
tm	Tonelada métrica
t	Tonelada

GLOSARIO

Aceleración	Magnitud vectorial que indica la variación de velocidad por unidad de tiempo.
Caracterización	Descripción de los atributos de un objeto.
Carga	Fuerza que actúa en un objeto o estructura.
Carrera	Distancia a través de la cual se mueve una pieza mecánica (actuador, entre otros).
Ciclo	Onda que se repite y que consta de un ciclo positivo y uno negativo.
Dinámica	Parte de la física que estudia la relación entre el movimiento y las causas que lo producen (fuerza).
<i>Encoder</i>	Sensor de movimiento giratorio.
Esfuerzo	Tensiones internas de un cuerpo debido a una o varias cargas.
Estática	Parte de la mecánica que estudia cómo la fuerza actúa en cuerpos en reposo o aceleración constante.

Falla	Cuando una estructura deja de cumplir con su función de una manera sutil o abrupta.
Frecuencia	Número de ciclos completados por segundo de una onda sinusoidal.
Fricción	Fuerza que se da a partir del contacto entre dos cuerpos.
Fuerza	Acción física que modifica el estado de movimiento de un cuerpo.
Fuerza de inercia	Fuerza que actúa sobre una masa cuando esta es sometida a una aceleración.
LVDT	Transformador diferencial de variación lineal.
Magnoestrictivo	Material que experimenta un cambio de dimensiones cuando es sometido a un campo magnético.
Marco conceptual	Herramienta analítica con varias variaciones y contextos. Se aplica en diferentes categorías de trabajo donde se necesita una imagen general.
MTS	Marca comercial registrada del sistema de corporación dentro de Estados Unidos.
Oleo hidráulico	Es la técnica aplicada a la transmisión de potencia mediante fluidos incompresibles confinados.

Onda Sinusoidal	Curva que describe una oscilación suave y repetitiva y que representa gráficamente la función seno.
Programa	Conjunto de instrucciones detalladas, paso a paso, que indica a la computadora como resolver un problema o realizar una tarea.
PSD	Ensayo a escala natural pseudodinámico.
Purgador	Aparato que elimina de una instalación un fluido que, por su presencia o exceso, dificulta el funcionamiento de esta.
Rigidez	Capacidad de un elemento a soportar esfuerzos sin perder su forma.
Reacción	Acción que resiste o se opone a otra acción, actuando en sentido contrario a ella.
SCRAMNet	Red que provee un ambiente de memoria compartida entre computadoras.
Servo	Pieza mecánica que facilita el manejo de otra pieza mecánica o electromecánica, regulándose por sí misma al detectar un error, diferenciando su propia actuación real y la deseada.

Sismo	Movimiento o sacudida de la tierra por causas internas, principalmente por el choque de placas tectónicas o desplazamientos de fallas corticales (corteza terrestre), liberando energía que la corteza reorganiza para volver a un estado de equilibrio.
Transductor	Dispositivo que recibe energía y suministra otro tipo de energía de características dependientes de la que recibió
Transformador	Dispositivo sensor de posición.
Virtual	Entorno generado mediante tecnología informática, con escenas u objetos de apariencia real

RESUMEN

Este documento presenta la descripción básica de los equipos y métodos de aplicación de carga lateral cuasi-estática y dinámica más utilizada en el medio de evaluación de materiales y comportamiento de estructuras.

Se presenta la descripción de: a) el equipo de aplicación de carga lateral con un marco de carga y el procedimiento de ensayo cuasi-estático; b) el equipo de aplicación de carga lateral con un muro de reacción y el procedimiento de ensayo falso-dinámico; c) el equipo de aplicación de carga lateral dinámica en mesa sísmica y su procedimiento llamado con el mismo nombre.

Incluye la descripción y funcionamiento de cada uno de los equipos de aplicación de carga lateral y las partes que lo conforman. Del mismo modo se describe el equipo que genera la carga lateral, así como la instrumentación utilizada para la medición de variables físicas como aceleración, fuerza, desplazamiento y deformación.

Se presentan ejemplos de universidades y centros de experimentación sísmica que cuentan con los equipos de ensayos más equipados, tanto en la región centroamericana y sudamericana como el continente asiático, europeo y Estados Unidos de Norteamérica, con el fin de conceptualizar de mejor manera un equipo de aplicación de carga lateral.

Por último, en este documento se realiza un análisis con base en la información documentada y se da recomendaciones para el equipo de aplicación de carga lateral sugerido para el medio guatemalteco.

JUSTIFICACIÓN

La investigación realizada es una respuesta a la búsqueda de satisfactores que, a manera de opciones de solución, contribuyan a aliviar la inquietud, en este caso, de conocer los equipos de ensayos estructurales y alternativas que existen para la investigación y experimentación de cargas laterales, tanto en Guatemala como en otros países. Mucho se ha investigado y escrito al respecto, dentro y fuera del país. De hecho, existe ya en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos dos equipos de aplicación de carga lateral (marcos de carga) que son utilizados en trabajos de investigación y de graduación, así como para la evaluación de sistemas, cuando se solicita a la Universidad.

Sin embargo, los diferentes equipos de ensayo estructural y documentos realizados en el área de experimentación de cargas en estructuras y materiales no han sido recopilados en el medio nacional, en un único documento.

Sin que se pretenda agotar el tema, este trabajo conlleva la intención de ofrecer a estudiantes y profesionales en la rama correspondiente, una síntesis de los principales equipos de aplicación de carga lateral en ensayos estructurales.

El alcance de este documento tiene una doble finalidad. En primer lugar, proporcionar información para tener una aproximación a los procedimientos y equipos de aplicación de cargas laterales en la ingeniería estructural, que puedan utilizarse para los cursos del programa de estudios de Ingeniería Civil de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en los cursos que tengan

relación con la experimentación del comportamiento estructural de un elemento o sistema estructural sujeto a carga lateral.

La información también puede ofrecer un apoyo a la Facultad de Ingeniería para que pueda ser utilizado como una guía introductoria a equipos de ensayo dinámicos de una posible modernización del laboratorio de estructuras de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

METODOLOGIA DE INVESTIGACION

Para la elaboración del presente documento, la metodología utilizada se resume de la siguiente forma:

Se recopiló información bibliográfica, en medios electrónicos y de campo (descripciones, fotografías, videos y libros digitales), acerca de los equipos y procedimientos de aplicación de carga lateral en ensayos estructurales, tanto dinámicos como cuasi-estáticos más utilizados a nivel mundial. Esto incluyó universidades y centros de investigaciones sísmicas, tanto nacionales como internacionales, que hacen uso de esos equipos para la evaluación de comportamiento bajo carga lateral de elementos o estructuras.

Se ordenó y clasificó la información de la descripción de qué es y cómo funciona cada equipo y los procedimientos existentes para la aplicación de cargas laterales. Del mismo modo se clasificó y ordenó las partes de las que están compuestos cada uno de los equipos de ensayo, así como el equipo necesario para la aplicación de cargas y la instrumentación básica utilizada para la medición de variables físicas como desplazamiento aceleración, deformación y fuerza.

Se clasificaron los laboratorios con los equipos de ensayo estructural de aplicación de carga lateral más completos, tanto en equipamiento como en instrumentación para colocarlos, a manera de ejemplo, en la conceptualización de un equipo de aplicación de carga lateral.

Por último, se discutió la información de la documentación recopilada sobre los procedimientos y equipos de ensayos estructurales, con el fin de determinar el equipo de ensayo dinámico estructural que se considera más adecuado para el medio guatemalteco con base en operación, rendimiento, demanda y mantenimiento.

OBJETIVOS

General

Caracterizar los procedimientos existentes actualmente para el ensayo dinámico de estructuras: el muro de reacción, el marco de carga, la mesa sísmica y hacer recomendaciones para el medio guatemalteco.

Específicos

1. Caracterizar el procedimiento para el ensayo dinámico de estructuras utilizando el marco de carga.
2. Caracterizar el procedimiento para el ensayo dinámico de estructuras utilizando el muro de reacción.
3. Caracterizar el procedimiento para el ensayo dinámico de estructuras utilizando la mesa sísmica.
4. Determinar las características del equipo más adecuado al medio guatemalteco con base en el uso, funcionamiento, ventajas, desventajas y aplicaciones.

INTRODUCCIÓN

Uno de los fenómenos más comunes dentro de la ingeniería mecánica y civil son las fallas producidas por movimientos dinámicos, las cuales siempre están presentes en los diferentes tipos de estructuras y equipos. En estos movimientos, se consideran desde efectos ocasionados por fatiga perjudiciales para equipos mecánicos, hasta fenómenos naturales como los sismos perjudiciales para las estructuras.

Fenómenos naturales impredecibles y catastróficos como los sismos siempre están presentes a una muy baja escala, pero en ocasiones aumentan a niveles destructivos, tanto para las estructuras como para la vida humana. A estos fenómenos naturales se suman otros, como los efectos causados por las fuerzas que el viento ejerce sobre las estructuras o el empuje de suelos hacia la estructura o edificación. Estos producen deformaciones y rupturas en juntas, conexiones, marcos, vigas, columnas y sistemas estructurales. En ocasiones, el colapso y ruptura de estos suele ser catastrófico e impredecible, y causa grandes pérdidas económicas y, en ocasiones, de vidas humanas.

Otro fenómeno influyente dentro de la ingeniería civil y mecánica son las vibraciones mecánicas causadas por equipos en funcionamiento, las cuales poseen una energía destructiva que no solo afecta a los equipos sino en ocasiones, la estructura que los soporta o los protege del medio ambiente.

Así surge la necesidad de crear, analizar y utilizar, equipos de aplicación de carga dinámica y estructuras que soporten y amortigüen de la mejor manera estos posibles fenómenos, minimizando así las pérdidas humanas y materiales, mediante su aplicación en ensayos de laboratorio.

Motivados por estos fenómenos y efectos que generan movimientos dinámicos se han promovido las investigaciones, desde el estudio de los materiales, estructuras, equipos mecánicos, electrónicos o de comunicaciones, hasta la educación ciudadana.

Para el caso de los equipos de ensayo estructural, el campo es muy amplio y en este caso se han desarrollado tres equipos fundamentales para la aplicación de cargas dinámicas en laboratorio: a) La mesa sísmica; b) los muros de reacción y c) el marco de carga. Los expertos los utilizan en el análisis estructural y de materiales para un correcto desempeño de las estructuras ante cargas laterales como los sismos, viento o empujes.

Por lo dicho anteriormente, se ha considerado conveniente realizar el presente trabajo de graduación que tiene como finalidad adquirir conocimientos y nociones básicas acerca de los equipos de ensayos estructurales de aplicación de carga lateral, tanto dinámica como cuasi-estática. La información recopilada en este documento incluye los equipos de aplicación de carga lateral más utilizados a nivel mundial. Se encuentra en este documento la descripción de a) el marco de carga, b) el muro de reacción y c) la mesa sísmica. Esta recopilación de información de equipos de aplicación de carga lateral es guía para los futuros profesionales que quieran adentrarse en el conocimiento básico de estos equipos de aplicación de carga lateral, dentro en el ámbito de la ingeniería estructural y de materiales.

El resultado esperado, como se menciona, es orientar al estudiante de ingeniería civil para que obtenga el conocimiento básico sobre las características de estos equipos de ensayos estructurales, la capacidad, uso, funcionamiento, ventajas y desventajas, así como su exactitud en ensayos estructurales sujetos a cargas dinámicas o cuasi-estáticas.

Del mismo modo que se orienta al estudiante en la parte conceptual de los equipos y procedimientos de ensayos estructurales, el presente documento también proporciona una pequeña sugerencia sobre el equipo de aplicación de carga lateral de ensayos estructurales recomendado para el medio guatemalteco.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1. ¿Por qué es importante el estudio de la aplicación de cargas laterales en las estructuras?

El estudio del comportamiento de estructuras sujetas a cargas estáticas o dinámicas laterales es de gran importancia en la rama de la ingeniería estructural y de materiales, tanto para la seguridad y la evaluación de los elementos y sistemas estructurales, así como para la calibración, la predicción, deformación y movimiento de las estructuras. Estas cargas pueden ser las impuestas por los vientos, empujes y sismos.

La finalidad del estudio y experimentación con la aplicación de cargas laterales es lograr estructuras seguras, funcionales y económicas para la población, así como para el desarrollo de nuevas tecnologías de materiales y normas estructurales del país.

Para este propósito, la experimentación recurre a procedimientos y equipos de aplicación de carga que permitan observar y validar experimentalmente el desempeño de las estructuras frente a cargas de tipo sísmicas, de viento o empujes laterales.

Actualmente, el desempeño de las estructuras frente a cargas laterales es evaluado por equipos y procedimientos de ensayo de estructuras, tales como: a) un marco de reacción y un procedimiento de ensayo cuasi-estático; b) un muro de reacción y un procedimiento de ensayo falso-dinámico y c) un equipo y procedimiento de ensayo dinámico en mesa sísmica.

2. MÉTODOS DE ENSAYO PARA LA APLICACIÓN DE CARGA LATERAL EN ESTRUCTURAS

Como se menciona en el capítulo anterior, existen tres tipos de ensayo para evaluar el comportamiento de estructuras bajo cargas horizontales, los cuales son descritos a continuación.

2.1. Ensayo cuasi-estático

También llamado cíclico, es el tipo de ensayo de aplicación de carga lateral estructural en el que un elemento estructural se somete a un historial predefinido de desplazamientos y cargas con velocidad de aplicación sumamente baja.

Este ensayo es realizado a elementos estructurales de pequeña y mediana escala; no considera las acciones dinámicas propias de un evento sísmico. El equipo utilizado para la aplicación de carga cuasi-estática es un equipo llamado marco de carga.

2.2. Ensayo falso-dinámico

También llamado híbrido (actuadores y computador), es el tipo de ensayo en el que un modelo estructural se somete a un historial predefinido de desplazamientos y cargas laterales con velocidad de aplicación muy baja. Los movimientos y deformaciones observados en las muestras de prueba se utilizan para determinar las fuerzas de inercia a las que un modelo estructural habría estado expuesto durante un sismo real.

El concepto de prueba falso-dinámico es la aplicación de carga estática convertida a dinámica por medio de un computador, sin necesidad de sacudir el modelo estructural como con el procedimiento en mesa sísmica. Este ensayo es realizado a estructuras comúnmente de mediana y gran escala. El equipo utilizado para la aplicación de carga en un ensayo falso- dinámico es una estructura llamada muro de reacción en conjunto con un computador potente.

2.3. Ensayo dinámico en mesa sísmica

Ensayo dinámico estructural en el que un modelo estructural se somete a un historial sísmico establecido por el investigador con aceleraciones muy altas sacudiendo a la estructura como en un sismo real.

Este ensayo es realizado a estructuras de pequeña, mediana y gran escala. Este ensayo considera acciones dinámicas propias de un evento sísmico. El equipo utilizado para la aplicación de carga es un equipo llamado mesa sísmica.

3. MARCO DE CARGA

3.1. ¿Qué es un marco de carga?

Un marco de carga o marco de reacción es un equipo para el ensayo de evaluación estructural, generalmente con forma de pórtico.

3.2. ¿Para qué sirve?

Es un equipo de ensayo estructural que sirve para la aplicación de carga a elementos estructurales de pequeña y mediana escala como muros, losas, vigas, columnas y cualquier elemento estructural que se requiera investigar con el objetivo de determinar su comportamiento estructural ante carga cuasi-estática unidireccional, ya sea vertical u horizontal.

3.3. ¿Cómo funciona?

Funciona por medio un sistema hidráulico y actuadores mecánicos anclados al marco de reacción. Estos actuadores son los encargados de generar la carga y hacer colapsar los elementos estructurales que se quieran investigar.

3.4. ¿Cuáles son sus aplicaciones?

Sus aplicaciones típicas son los ensayos de los tipos de carga siguientes:

- Carga compresiva.
- Carga horizontal (simulación de Sismo o viento).
- Carga vertical (cargas de servicio, carga muerta, carga viva).

3.5. Partes que conforman un marco de carga o de reacción

Un marco de carga está conformado básicamente de tres elementos estructurales de acero de alta rigidez que consiste de 2 columnas, un travesaño móvil y una placa inferior de cierre que se utiliza de base para colocar los elementos estructurales que se desea ensayar, ver figura 1.

3.5.1. Columnas

Las columnas son elementos estructurales que dan forma al marco de carga y sirven de soporte para el montaje y movimiento de los actuadores. Por otro lado, estas columnas son las encargadas de transmitir las cargas generadas por los actuadores hacia la cimentación.

3.5.2. Travesaño o viga

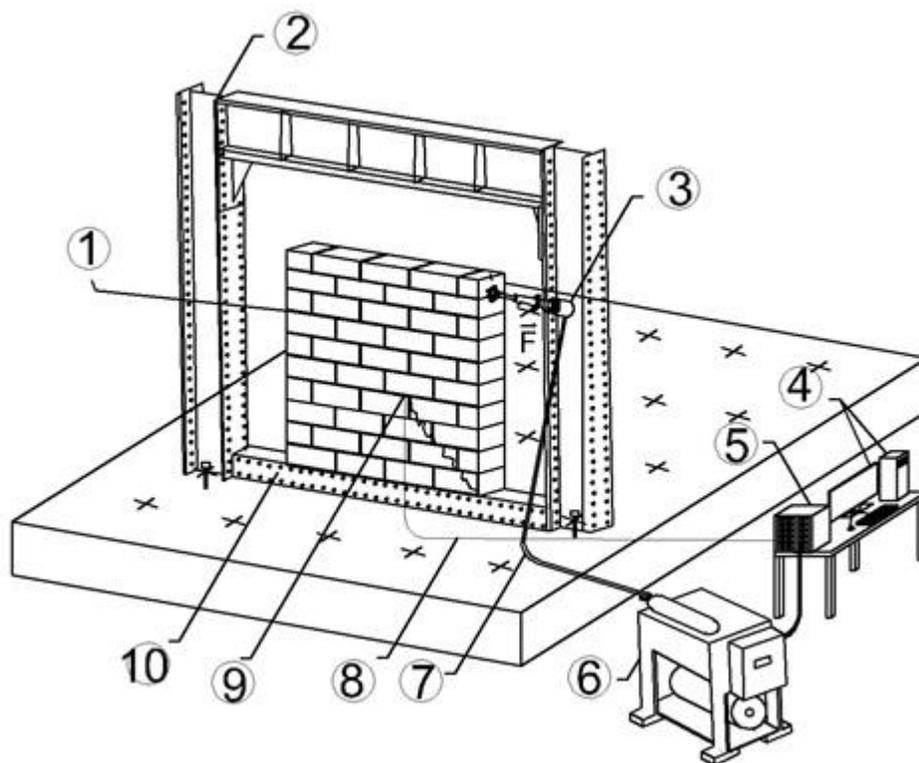
El travesaño o viga es el elemento estructural superior móvil, con desplazamiento a lo largo de las columnas. Permite el montaje de los actuadores en dirección vertical y el ajuste en altura de los elementos estructurales de ensayo.

Por otro lado, esta viga es la encargada de transmitir las cargas generadas por los actuadores hacia las columnas.

3.5.3. Travesaño inferior de cierre

El travesaño inferior de cierre es generalmente un perfil de acero que permite obtener una base de apoyo para los modelos estructurales que se quieran ensayar y sirve de cierre para el marco de carga. Otra alternativa a este cierre es la losa de reacción, la cual proporciona también una base de apoyo, el anclaje del marco de carga y de los elementos estructurales que se van a ensayar.

Figura 1. Ilustración de un marco de carga



Fuente: BLANDÓN, Carlos. *Ensayos cuasi estáticos cíclicos de muros delgados de concreto*.
<https://dial.uclouvain.be/Home/>. Consulta: 8 de octubre de 2019.

Tabla I. **Componentes de un marco de carga**

Número	Descripción
1	Modelo de ensayo
2	Marco de carga
3	Actuador
4	Computador
5	Adquisición de datos
6	Sistema Hidráulico
7	Servo válvula
8	Cable eléctrico
9	Instrumentación
10	Travesaño inferior de cierre

Fuente: BLANDÓN, Carlos. *Ensayos cuasi estáticos cíclicos de muros delgados de concreto*.
<https://dial.uclouvain.be/Home/>. Consulta: 15 de octubre de 2019.

3.6. Descripción del equipo de aplicación de carga lateral que utiliza un marco de carga

El equipo para la aplicación de carga lateral e instrumentación hallado durante la búsqueda de información en este trabajo para un marco de carga, se describen a continuación.

3.6.1. Sistema hidráulico

El sistema general hidráulico está conformado por una bomba hidráulica, un depósito, una torre de refrigeración, filtros, acumuladores y válvulas.

La función principal del sistema hidráulico es proporcionar la presión y el caudal hidráulico necesario en el interior de los pistones de los actuadores para enseguida generar la carga, ya sea en sentido vertical u horizontal.

3.6.2. Servo válvula

La servo válvula o las mangueras hidráulicas son los elementos encargados de la regulación del movimiento del actuador. Regulan el caudal hidráulico, que entra y sale del cilindro interno del actuador.

3.6.3. Actuadores

Los actuadores son los dispositivos mecánicos que generan una fuerza a partir de líquidos, de energía eléctrica o gaseosa. Su control es determinado por medio de la conexión de la servo válvula, el sistema hidráulico y las señales de carga programadas por un computador. Este es utilizado para la aplicación de cargas verticales u horizontales, los actuadores son utilizados con el fin de deformar y hacer fallar los elementos estructurales que se investigan.

3.6.4. Computador

Para la carga sistemática, el procesamiento de datos y la verificación de seguridad, se hace uso de las computadoras, por lo general, dos. Una para el manejo de datos y otra para el control de las cargas de aplicación. Durante la prueba una computadora supervisa el movimiento de los actuadores para un control de comando preciso y para la verificación de seguridad. Mientras, la otra computadora en línea, con unidades de adquisición de datos, se utiliza para el procesamiento de datos.

3.6.5. Sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos consiste en la conexión de diferentes dispositivos, los cuales miden, transmiten, descodifican y finalmente muestran información fácil de entender.

De manera específica, los datos de carga medidos por la celda de carga, transductores de desplazamiento y medidores de deformación, son transmitidos a un descodificador de datos y después guardada y leída en una computadora para luego un programa especial es usado para leer en tiempo real, fuerzas, desplazamiento y deformaciones, y permite graficar resultados durante el ensayo.

3.7. Instrumentación básica utilizada en un marco de carga

Instrumentos de laboratorio es un término general aplicable a todos los medidores o herramientas que uno pueda imaginar para realizar síntesis y análisis en el ámbito de los diversos trabajos de laboratorio. En un laboratorio con un marco de carga se cuenta con medidores de magnitudes físicas como sensores de carga, deformación o desplazamiento. Estos sirven para analizar y determinar el comportamiento estructural de un elemento. Dentro de la instrumentación más utilizada se tiene:

3.7.1. Célula de carga

Instrumentación utilizada para la medición de la carga. Prácticamente es un sensor eléctrico montado en la estructura del actuador con el fin de determinar la carga a flexión, cizalladura, compresión, tensión, lateral, entre otros.

3.7.2. Transductor de deformación

Instrumentación utilizada para la medición de deformaciones. Generalmente se utilizan bandas extenso-métricas o sensores de deformación (deformímetros o deformómetros) digitales o análogos colocados directamente en el elemento estructural que se ensaya.

3.7.3. Transductor de desplazamiento

Instrumento utilizado para la medición de los desplazamientos. Este es un sensor, generalmente un transformador diferencial de variación lineal comúnmente conocido como LVDT, el cual es un instrumento confiable y de gran exactitud empleado para medir desplazamiento, posición o tolerancia dimensional. Este es colocado al ras del elemento estructural que se ensaya.

3.8. Descripción de marcos de carga localizados en este trabajo

A continuación, se presenta una descripción de los marcos de carga localizados durante el desarrollo de este trabajo.

3.8.1. Marco de carga de la Pontificia Universidad Católica de Perú (PUCP)

La Pontificia Universidad Católica del Perú es una universidad privada. Posee diversas áreas del conocimiento, entre ellas la Facultad de Ingeniería, en la cual se ubica el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas (LEDI) más desarrollado del país.

LEDI cuenta con marcos de carga (ver figura 2) que desarrolla ensayos de muros a escala natural sometidos a carga lateral cíclica con y sin carga vertical. En elementos de concreto armado se han realizado ensayos experimentales en muros de ductilidad limitada.

LEDI también cuenta con sofisticado equipo de aplicación de carga como los actuadores de simulación de sismos MTS 204.81 de 500 kN de capacidad y amplitud de desplazamiento de +/- 150 mm (ver figura 3).

Del mismo modo, LEDI cuenta con instrumentación como las celdas de carga de trabajo, de 5 kN, 50 kN, 200 kN, 500 kN, 1 MN y 2 MN y celdas de carga patrones de 20 kN, 200 kN, 1 MN y 2 MN en compresión, así como celdas de carga patrones de 5 kN y 500 kN en tracción y compresión. Sensores de desplazamiento tipo LVDT: ± 1 mm, ± 10 mm, ± 20 mm, ± 50 mm, ± 100 mm, ± 200 mm. tipo WA: 0 - 10 mm, 0 - 20 mm, 0 - 50 mm, 0 - 100 mm, 0 - 200 mm, 0 - 500 mm. Acelerómetros con aceleración de 200 m/s² con respuesta de 0 a 100 Hz y sistema de adquisición de datos Catman: amplificadores HBM serie KWS3073 y amplificadores MGCplus usados en los ensayos tanto estáticos como dinámicos. LabVIEW: Tarjetas PCI-6225 de National Instruments usado en los ensayos tanto estáticos como dinámicos.

A continuación, se ilustran los marcos de carga y actuadores utilizados en el laboratorio de estructuras de la universidad PUCP para el ensayo de estructuras sometidas a cargas horizontales.

Figura 2. **Marcos de carga de PUCP**



Fuente: Universidad Católica de Perú. *Laboratorio de Estructuras Antisísmicas*.
<https://departamento.pucp.edu.pe/ingenieria/> Consulta: 21 de junio de 2020.

Figura 3. **Actuadores de PUCP**



Fuente: Universidad Católica de Perú. *Laboratorio de Estructuras Antisísmicas*.
<https://departamento.pucp.edu.pe/ingenieria/>. Consulta: 21 de junio de 2020.

A continuación, se describe el proceso realizado en un marco de carga en la Pontificia Universidad Católica de Perú (PUCP):

A manera de resumen el ensayo realizado fue la investigación del comportamiento a fuerza cortante de muros delgados de concreto reforzados en su zona central con barras de acero, fibra de polipropileno y con fibra de acero. La investigación fue llevada a cabo por los ingenieros Ángel San Bartolomé y Rafael Ríos. Los muros delgados de concreto armado presentan el problema de congestión del refuerzo que, por lo general, conduce a la formación de ratoneras y segregación del concreto.

Para controlar el problema señalado, se pensó en la posibilidad de reemplazar en la zona central del muro a las barras de refuerzo por fibra de polipropileno y metálica. Para verificar la hipótesis planteada, se efectuaron ensayos de carga lateral cíclica en muros reforzados por corte con los tipos de refuerzos indicados, mientras que el refuerzo dúctil por flexión se mantuvo constante. El ensayo de carga lateral cíclica permite simular las cargas laterales que se generan en un sismo (V) y estudia el comportamiento de una estructura determinada ante diferentes fuerzas y desplazamiento aplicados (D). Durante el ensayo, la estructura se desplaza lateralmente en ambos sentidos muy lentamente, de acuerdo a desplazamientos prefijados (fases del ensayo). El ensayo de los muros se realiza a una velocidad de un ciclo en 4 minutos, aplicando un número determinado de ciclos hasta alcanzar la estabilización de los lazos histeréticos V-D. En la tabla II se indican las fases del ensayo y la cantidad de ciclos aplicados, debiéndose indicar que los muros con fibra MFP y MFA sólo soportaron hasta la fase 5. La deriva fue obtenida dividiendo al desplazamiento lateral entre la altura del muro ($h = 120$ cm).

Tabla II. **Fases de ensayo en marco de carga**

Fase	1	2	3	4	5	6	7
Desplazamiento (mm)	0,5	1,0	2,0	4,0	6,5	9,0	11,5
Deriva	0,0004	0,0008 3	0,001 7	0,0033 3	0,005 4	0,007 5	0,0095 8
No. Ciclos	2,0	2,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Observación	Se aplicó en muros MAC, MFP y MFA Aplicadas en MAC					Aplicadas en MAC	

Fuente: RIOS, Rafael. *Comportamiento a fuerza cortante de muros delgados de concreto reforzados en su zona central con barras de acero, fibra de polipropileno y con fibra de acero.*

<http://www.scielo.org.mx/scielo.php>. Consulta: 26 de junio de 2020.

Las características de los muros ensayados fueron las siguientes.

Los tres muros analizados fueron de forma cuadrada, de 1,2 m de lado y 8 cm de espesor. Se varió sólo el refuerzo localizado en la zona central:

- Muro MAC: reforzado con malla de acero convencional dúctil.
- Muro MFP: reforzado con fibra de polipropileno TUF-STRAND SF.
- Muro MFA: reforzado con fibra de acero Dramix.

A continuación, se ilustra en la figura 4 el proceso de ensayo de carga lateral cíclica y el sistema de adquisición de datos utilizados en un equipo de aplicación de carga lateral utilizando un marco de carga.

Figura 4. **Ensayo de carga lateral con un marco de carga de PUCP**



Fuente: RIOS, Rafael. *Comportamiento a fuerza cortante de muros delgados de concreto reforzados en su zona central con barras de acero, fibra de polipropileno y con fibra de acero.*

<http://www.scielo.org.mx/scielo.php>. Consulta: 27 de junio de 2020.

La instrumentación utilizada para registrar los desplazamientos relativos entre distintos puntos de los muros, fue la instalación de 10 sensores LVDT, cada uno ubicados en zonas estratégicas, ver figura 5, y en la que las funciones de los LVDT fueron:

- D1: controlar los desplazamientos laterales.
- D2 y D3: medir deformaciones diagonales.
- D4: detectar un posible deslizamiento entre el muro y la cimentación.
- D5 y D6: medir deformaciones verticales en los talones del muro.
- D7: detectar un posible deslizamiento entre el muro y la viga solera.
- D8 y D9: medir deformaciones axiales en los extremos del muro.
- D10: Medir el grosor de las grietas acumuladas en la zona central del muro.

En la tabla III se muestra un resumen del comportamiento de los tres muros en cada una de las fases del ensayo y en la figura 6 el estado de los muros al finalizar el ensayo de carga lateral utilizando el marco de carga.

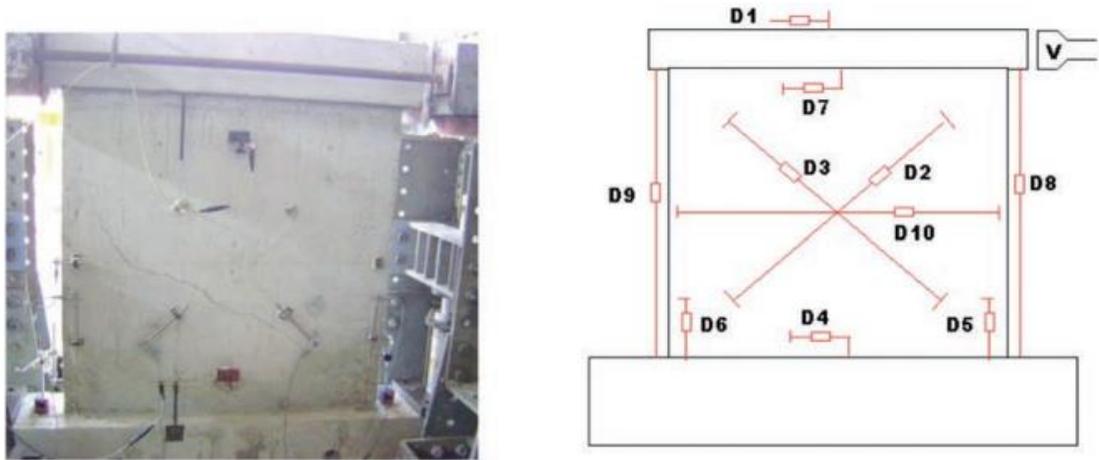
Tabla III. **Comportamiento de los muros ensayados en marco de carga**

Muro	MAC	MFP	MFA
Fase 1	Sin fisuras (comportamiento elástico)		
Fase 2	Primera grieta de tracción por flexión localizada en la parte baja del muro		
Fase 3	Agrietamiento diagonal del concreto, inicio de la falla por corte		
Fase 4	Aparición de nuevas grietas. Sin cambio sustancial.	Ancho de la grieta diagonal se mantiene en 2 mm, aparición de nuevas grietas.	Inicio de la trituración del talón derecho. Ancho de la grieta diagonal 2,5 mm
Fase 5	Ancho de la grieta diagonal 1,5 mm.	<ul style="list-style-type: none"> • Trituración de los talones, pérdida sustancial de resistencia. • Ancho de grieta 8 mm en MFP y 10 mm en MFA. Fin del ensayo. 	
Fase 6	Trituración de los talones, inicio de pérdida de resistencia. Ancho de la grieta diagonal 3 mm.	--	--
Fase 7	Falla por alabeo. Fin del ensayo.	--	

Fuente: RIOS, Rafael. *Comportamiento a fuerza cortante de muros delgados de concreto reforzados en su zona central con barras de acero, fibra de polipropileno y con fibra de acero.*

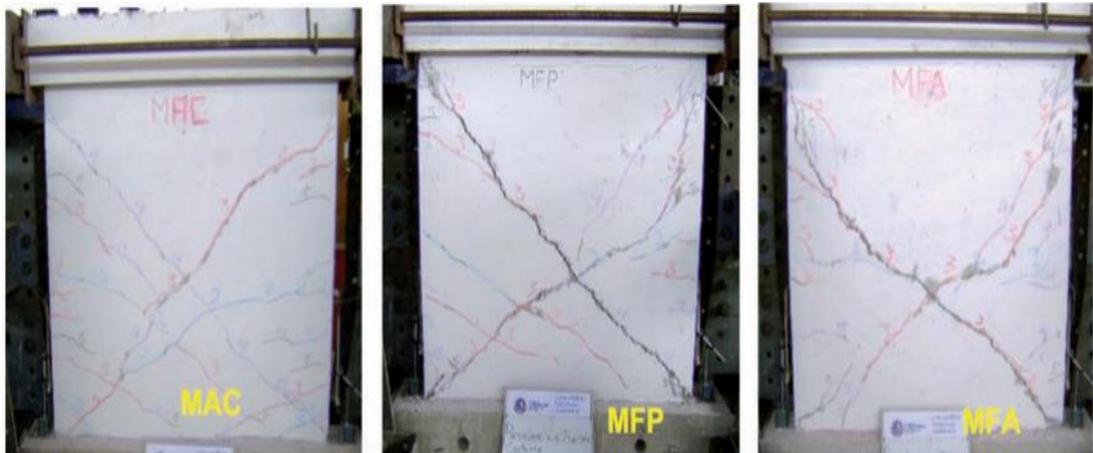
<http://www.scielo.org.mx/scielo.php>. Consulta: 29 de junio de 2020.

Figura 5. Instrumentación utilizada en ensayo en marco de carga



Fuente: RIOS, Rafael. *Comportamiento a fuerza cortante de muros delgados de concreto reforzados en su zona central con barras de acero, fibra de polipropileno y con fibra de acero.* <http://www.scielo.org.mx/scielo.php>. Consulta: 28 de junio de 2020.

Figura 6. Estado de muros al finalizar ensayo en marco de carga



Fuente: RIOS, Rafael. *Comportamiento a fuerza cortante de muros delgados de concreto reforzados en su zona central con barras de acero, fibra de polipropileno y con fibra de acero.* <http://www.scielo.org.mx/scielo.php>. Consulta: 30 de junio de 2020.

3.8.2. Marcos de carga lateral de la Universidad San Carlos de Guatemala (USAC)

La Universidad de San Carlos de Guatemala, USAC, es la universidad más grande y antigua de Guatemala. Establecida en el Reino de Guatemala durante la colonia española desde 1676 posee 19 unidades académicas con distintas carreras en el campus central de Guatemala y otras en el Centro Universitario Metropolitano CUM y el Paraninfo Universitario. Cada una de las unidades tiene diferentes especializaciones que se dividen en 10 facultades y 9 escuelas no facultativas. Dentro de estas facultades se encuentra la Facultad de Ingeniería, la cual se dedica a la formación de profesionales de prestigio, cuyos conocimientos contribuyen al progreso científico y tecnológico de Guatemala. Es en esta unidad académica de ingeniería que se desempeñan seis escuelas facultativas de pregrado que disponen de doce carreras, una escuela de postgrado con carácter regional centroamericano; además del Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII), de manera que su proyección es amplia hacia diversas actividades económicas y sociales del país. La infraestructura del Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII) es muy amplia y variada, como la Sección de Estructuras, entre otras.

Dentro de esta se encuentran dos marcos de carga, como el mostrado en el ejemplo descrito a continuación, el cual permite el estudio de materiales y elementos estructurales sujetos a cargas laterales.

A continuación, se describe el proceso realizado en un marco de carga en la Universidad San Carlos De Guatemala (USAC):

A manera de resumen el ensayo realizado en este caso fue llevado a cabo por un estudiante de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad San Carlos de Guatemala, correspondiente a la investigación del diseño, construcción y evaluación de un elemento constructivo para vivienda utilizando cañas de maíz. La investigación fue llevada a cabo por el ingeniero Werner Josué Chic Camey

La parte experimental de la investigación se realizó en la Sección de Ecomateriales del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Se hizo una caracterización física y se estudió el comportamiento bajo esfuerzo de compresión de las cañas de maíz; se realizaron ensayos previos a concebir el diseño final del elemento constructivo y del sistema de cerramiento que lo integra; se construyó una sección de pared típica de acuerdo al diseño y se evaluó el comportamiento y capacidad de resistencia cuando fue sometido a carga lateral.

Se llevó a cabo el ensayo de carga lateral, se aplicó una fuerza unidireccional en la parte superior del muro en dos ciclos. El procedimiento de ensayo se describe a continuación:

- Primer ciclo de carga: se utilizó un gato hidráulico código RC53 de 5 toneladas de capacidad.
- Se inició el ensayo.
- Se aplicó fuerza en una esquina superior del muro en intervalos de carga.

- Se tomó lectura de los 4 deformómetros y la carga en manómetro para cada intervalo.
- Se marcaron las fisuras que fueron apareciendo. Se tomó un conjunto de 10 lecturas.
- Se inició la descarga y se tomó lectura de deformómetros y carga en cada intervalo.
- Se tomó 7 lecturas de desplazamiento en cada disminución de carga y 2 minutos después de la descarga se volvió a tomar lectura de deformómetros.
- Segundo ciclo de carga: gato hidráulico código RC102 de 10 toneladas.
- Se inició el ensayo.
- Se aplicó fuerza en intervalos de carga.
- Se tomó lectura de los 5 deformómetros y de la carga en manómetro, para cada intervalo.
- Se marcó las fisuras que fueron apareciendo. Se tomó un conjunto de 8 lecturas.
- Se descargó completamente y se tomó lectura de deformómetros

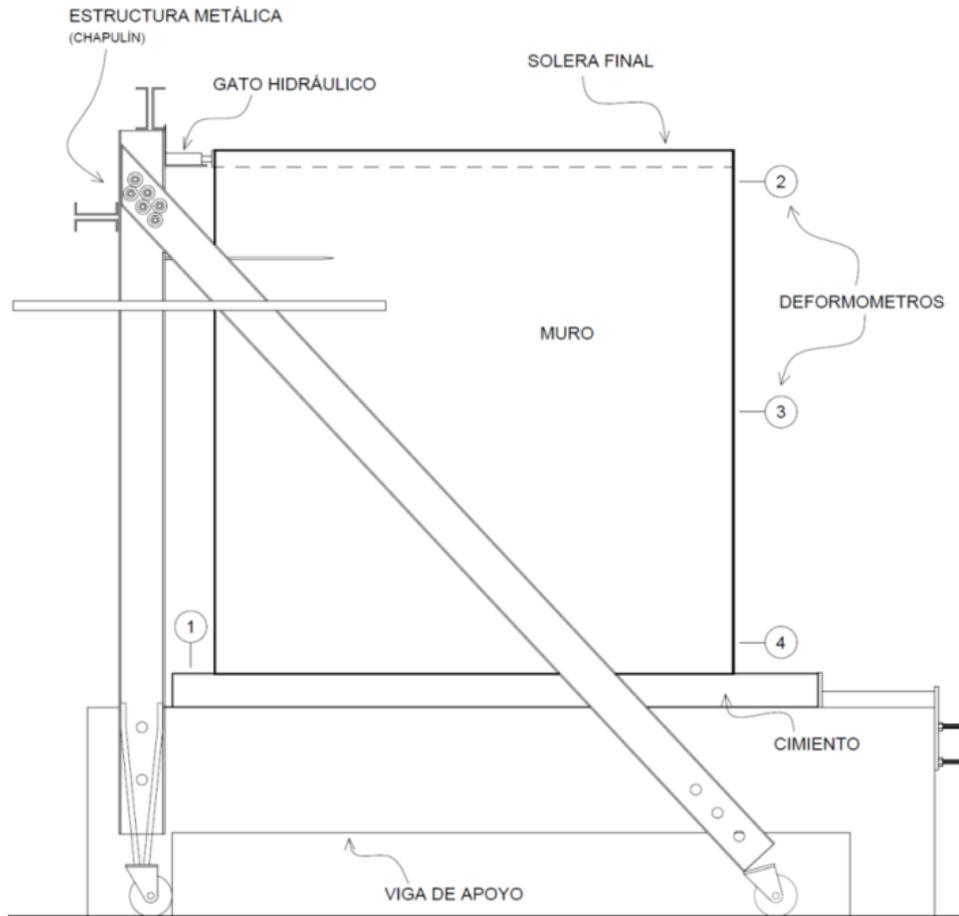
Figura 7. **Ensayo en marco de carga de USAC**



Fuente: CHIC, Werner. *Diseño, construcción y evaluación de un elemento constructivo para vivienda utilizando cañas de maíz*. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/>. Consulta: 30 de junio de 2020.

A continuación se observa el esquema de la instrumentación y la estructura utilizada para ensayos de carga lateral en el laboratorio del centro de investigaciones de la facultad de ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 8. Esquema de aplicación de carga lateral en marco de carga



Fuente: CHIC, Werner. *Diseño, construcción y evaluación de un elemento constructivo para vivienda utilizando cañas de maíz*. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/>. Consulta: 30 de junio de 2020.

En la figura 9 se ilustra la calibración de los deformómetros y la colocación del actuador en el marco de carga, esto para el inicio de la aplicación de carga lateral en los laboratorios de la Universidad de San Carlos.

Figura 9. Instrumentación utilizada en marco de carga de USAC



Fuente: CHIC, Werner. *Diseño, construcción y evaluación de un elemento constructivo para vivienda utilizando cañas de maíz*. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/>. Consulta: 10 de julio de 2020.

Otro ejemplo de marco y ensayo de carga lateral en los laboratorios del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se muestra en la figura 10, en donde se puede observar el proceso de ensayo de un sistema de paneles livianos.

Figura 10. Marco de carga y ensayo de paneles livianos en USAC



Fuente: QUIÑONEZ, Fráncico. *Ensayo de paneles livianos. Sección de Eco materiales. CII. USAC.*

3.8.3. Marcos de carga lateral de la Universidad de El Salvador (UES)

La Universidad de El Salvador (UES) es la única universidad pública de El Salvador. Su población estudiantil, según los datos basados en el número de estudiantes matriculados en 2013, promedia 56 000 alumnos. Es la universidad más grande del país y la primera en ser fundada. El Campus Central posee la mayor población estudiantil universitaria de todo el país.

En la universidad de San Salvador funcionan nueve facultades, dentro de estas, la carrera de ingeniería civil, que cuenta con diversas áreas de laboratorio.

El laboratorio de la Escuela de Ingeniería Civil está dividido en cuatro áreas de especialización:

- Laboratorio de suelos y materiales.
- Laboratorio de topografía.
- Laboratorio de mezclas asfálticas.
- Laboratorio de estructuras

El laboratorio de Estructuras de la UES es un centro de actividades con recursos para desarrollar pruebas en construcciones a escala natural (mesa inclinable); componentes estructurales de concreto reforzado, mampostería y otros (marco de carga, figura 11); sistemas de aplicación de carga (actuadores, figura 12) y modernos sistemas de adquisición de datos o decodificador de datos, figura 13.

Las investigaciones experimentales en la UES tienen como objeto verificar y desarrollar sistemas constructivos resilientes e innovar en alternativas de reforzamiento y reparación de estructuras dañadas por sismo.

A continuación, se presentan una serie de imágenes correspondientes a la tecnología implementada por UES para los ensayos estructurales con cargas sísmicas laterales.

Figura 11. Marco de carga de UES



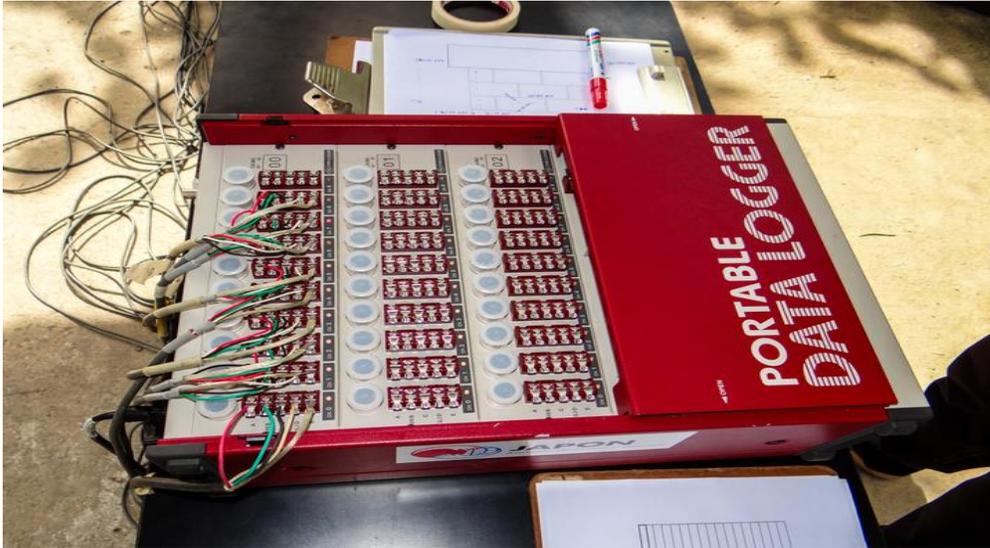
Fuente: Universidad Nacional de San Salvador. *Laboratorio de Estructuras*.
<http://www.fia.ues.edu.sv/taishin/index.html>. Consulta: 10 de junio de 2020.

Figura 12. Actuadores de UES



Fuente: Universidad Nacional de San Salvador. *Laboratorio de Estructuras*.
<http://www.fia.ues.edu.sv/taishin/index.html>. Consulta: 24 de junio de 2020.

Figura 13. Decodificador de datos de UES



Fuente: Universidad Nacional de San Salvador. *Laboratorio de Estructuras*.
<http://www.fia.ues.edu.sv/taishin/index.html>. Consulta: 26 de junio de 2020.

A continuación, se describe el proceso realizado en un marco de carga en el laboratorio de estructuras de la Universidad del Salvador (UES):

A manera de resumen la investigación realizada fue enfocada en conocer el comportamiento estructural en el plano de un sistema de bloque de concreto con refuerzo integral en edificaciones para uso habitacional tipo condominios; Para llevar a cabo el experimento el sistema fue sometido a cargas simuladas sísmicas y de servicio, tomando como punto de partida la falla por esfuerzo cortante, en el cual la carga axial aplicada es controlada significativamente por los tipos de falla y la correspondiente capacidad de resistencia del sistema constructivo . Se construyeron especímenes pequeños y el ensayo se denominó “En Voladizo”, el cual es una modalidad de ensayo que consiste en someter al espécimen, en este caso, a una carga lateral cíclica en su extremo superior sin restringir las deformaciones en los extremos.

La instrumentación utilizada y la forma de aplicar cargas a los especímenes es por medio de marco de carga. Para esta investigación se utilizó un marco de carga con una capacidad resistente de 25 toneladas, a los que fueron acoplados por medio de placas y pines especialmente diseñados otros instrumentos, como gatos hidráulicos, que son los encargados de aplicar las cargas en este estudio; cargas de servicio (verticales) y cargas sísmicas (horizontales), ver figura 14.

La medición de las cargas fue realizada con celdas de cargas con capacidades adecuadas al sistema de gatos hidráulicos utilizado para la aplicación de las mismas. Estas celdas se enroscaron en los gatos hidráulicos y consistieron en un cilindro de acero de alta resistencia con circuitos independientes. Para la investigación se contó con 2 celdas con capacidad de 50 toneladas para la carga horizontal y 2 con capacidad de 5 toneladas para la carga vertical; en la figura 15 se puede observar la celda con capacidad de 50 toneladas ensamblada con el gato hidráulico.

Figura 14. **Actuador vertical utilizado en marco de carga**



Fuente: ANTILLON, Ayala. *Estudio experimental del comportamiento estructural en el plano de la mampostería de bloque de concreto con refuerzo integral, bajo diferentes condiciones de servicio.* <http://ri.ues.edu.sv/>. Consulta: 28 de junio de 2020.

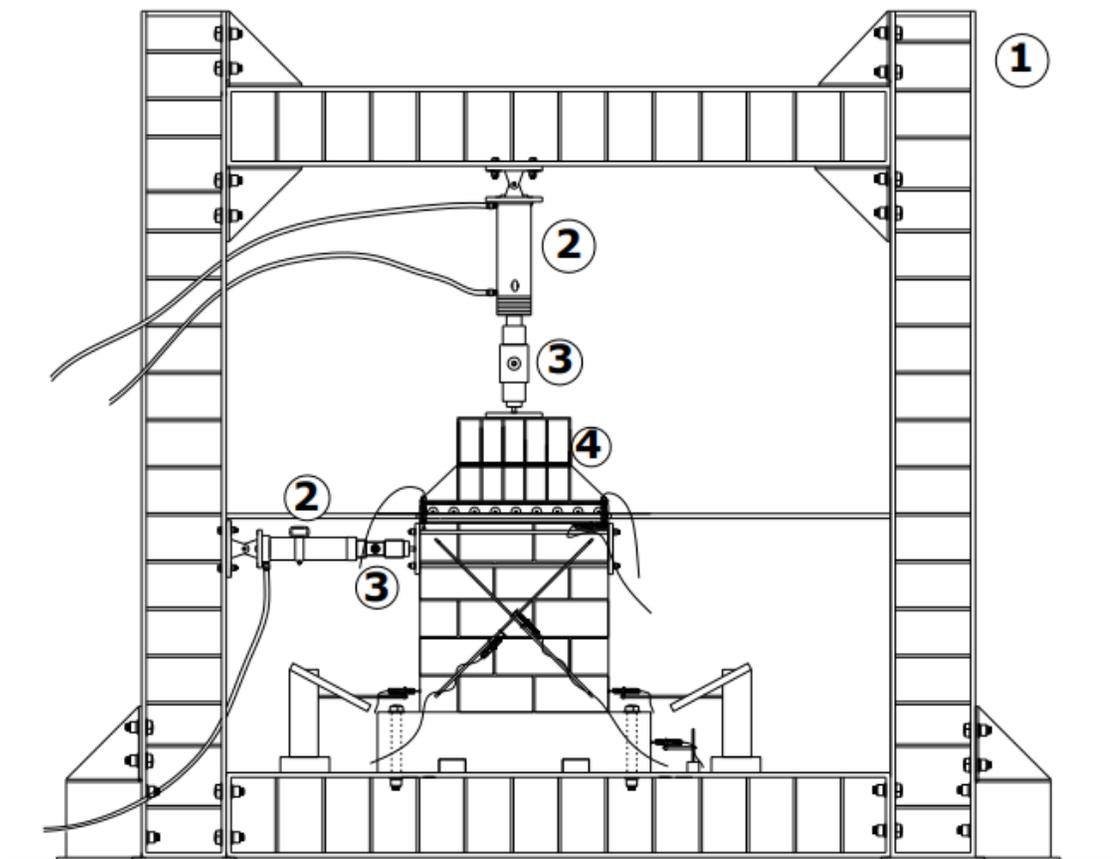
Figura 15. **Gato hidráulico con celda de carga de 50 toneladas**



Fuente: ANTILLON, Ayala. *Estudio experimental del comportamiento estructural en el plano de la mampostería de bloque de concreto con refuerzo integral, bajo diferentes condiciones de servicio.* <http://ri.ues.edu.sv/>. Consulta: 28 de junio de 2020.

En cuanto al ensamble en vertical y horizontal anterior, este termina con el acople de una superficie que distribuye uniformemente la fuerza vertical que se aplicará durante los ensayos; mientras que, para la fuerza horizontal, una placa cuadrada será la encargada de transmitir la fuerza en cuestión (ver figura 16 y los componentes utilizados en la tabla IV).

Figura 16. **Ensamblaje completo de dispositivos en el marco de carga**



Fuente: ANTILLON, Ayala. *Estudio experimental del comportamiento estructural en el plano de la mampostería de bloque de concreto con refuerzo integral, bajo diferentes condiciones de servicio.* <http://ri.ues.edu.sv/>. Consulta: 29 de junio de 2020.

Tabla IV. **Descripción de componentes del marco de carga**

Numero	Descripción
1	Marco de carga con capacidad de 25 toneladas
2	Gatos hidráulicos de doble acción
3	Celda de medición de carga con capacidades de 50 y 5 toneladas
4	Placas de transmisión de carga

Fuente: ANTILLON, Ayala. *Estudio experimental del comportamiento estructural en el plano de la mampostería de bloque de concreto con refuerzo integral, bajo diferentes condiciones de servicio.* <http://ri.ues.edu.sv/>. Consulta: 30 de junio de 2020.

A continuación se muestra la cantidad, capacidad y descripción de los transductores de desplazamiento utilizados y colocados en el presente ensayo descrito.

Tabla V. **Cantidad y capacidad de transductores de desplazamiento**

Cantidad	Capacidad(mm)	Descripción
8	50	4 horizontales, 2 verticales, 2 diagonales

Fuente: ANTILLON, Ayala. *Estudio experimental del comportamiento estructural en el plano de la mampostería de bloque de concreto con refuerzo integral, bajo diferentes condiciones de servicio.* <http://ri.ues.edu.sv/>. Consulta: 30 de junio de 2020.

Para la medición de los desplazamientos de cada uno de los modelos se utilizó transductores de desplazamiento, figura 17, colocados estratégicamente en los especímenes para la medición de efectos de alargamiento, acortamiento o deformación diagonal del sistema. El número y la ubicación se detallan en la figura 18 y en la tabla V.

Figura 17. **Transductores de desplazamiento**



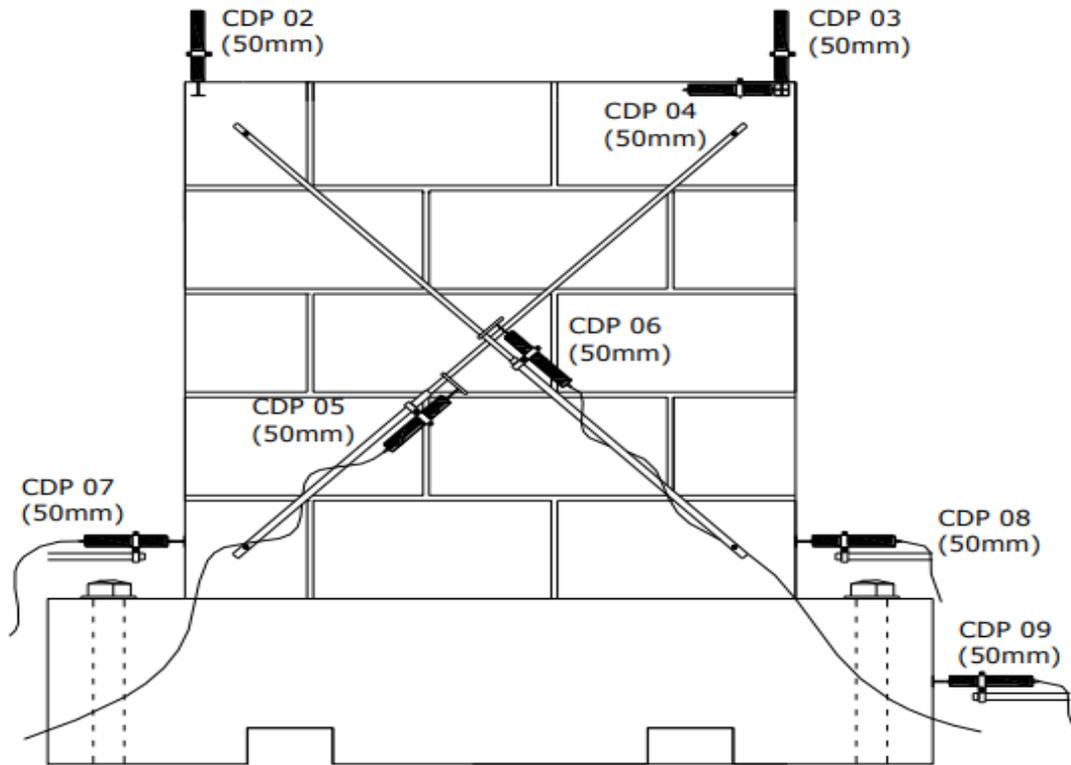
Fuente: ANTILLON, Ayala. *Estudio experimental del comportamiento estructural en el plano de la mampostería de bloque de concreto con refuerzo integral, bajo diferentes condiciones de servicio.* <http://ri.ues.edu.sv/>. Consulta: 1 de julio de 2020.

Para la adquisición de datos se utilizó un sistema de interconexión de diferentes dispositivos, los cuales midieron, transmitieron, decodificaron y finalmente mostraron información comprensible.

Estos dispositivos en este caso los transductores de desplazamiento se muestran en la figura 18; todos los datos que se obtienen de la instrumentación son transmitidos a un decodificador, figura 13, para luego ser guardados y leídos en una computadora. Con un programa especial se pudo leer en tiempo real, fuerzas, desplazamientos y deformaciones, para graficar los resultados de la prueba.

La propuesta de la ubicación de transductores en la aplicación de cargas utilizando un marco de carga se muestra en la figura 18.

Figura 18. Propuesta de ubicación de transductores



Fuente: ANTILLON, Ayala. *Estudio experimental del comportamiento estructural en el plano de la mampostería de bloque de concreto con refuerzo integral, bajo diferentes condiciones de servicio*. Recuperado de <http://ri.ues.edu.sv/>. Consulta: 2 de junio de 2020.

3.9. Ventajas del marco de carga

Las ventajas para el equipo de aplicación de carga lateral, marco de carga, halladas durante la búsqueda de información en este trabajo, se describen a continuación.

- Equipo versátil que puede equiparse con multitud de dispositivos de aplicación de carga para realizar diversos ensayos a carga axial.

- Con este tipo de pórticos pueden alcanzarse grandes cargas como se desee.
- Equipo de ensayo que puede ser mecánico o automatizado.
- Si el marco de carga cuenta con un equipo automatizado (actuadores, computadora y un adquisidor de datos) se puede programar tanto la carga como la velocidad de la misma ofreciendo precisión en los ensayos.
- Tienen la gran ventaja de ser una estructura abierta que facilita mucho el posicionamiento de los elementos estructurales que se van a ensayar.

3.10. Desventajas del marco de carga

Las desventajas para el equipo de aplicación de carga lateral, marco de carga, halladas durante la búsqueda de información en este trabajo, se describen a continuación.

- Determina el comportamiento únicamente de elementos estructurales.
- Su geometría solo permite la aplicación de carga unidireccional.
- No simula cargas dinámicas como las impuestas por sismos.

4. MURO DE REACCIÓN

4.1. ¿Qué es un muro de reacción?

Es un equipo de ensayo de aplicación de carga lateral con forma de prisma rectangular. Puede estar capacitado para la aplicación de cargas a edificios, viviendas o elementos estructurales.

4.2. ¿Para qué sirve?

Es un equipo de ensayo estructural que sirve para la aplicación de carga lateral a estructuras o elementos estructurales de mediana y gran escala como viviendas, edificios y cualquier estructura o elemento estructural que se requiera investigar con el objetivo de determinar su comportamiento ante cargas laterales.

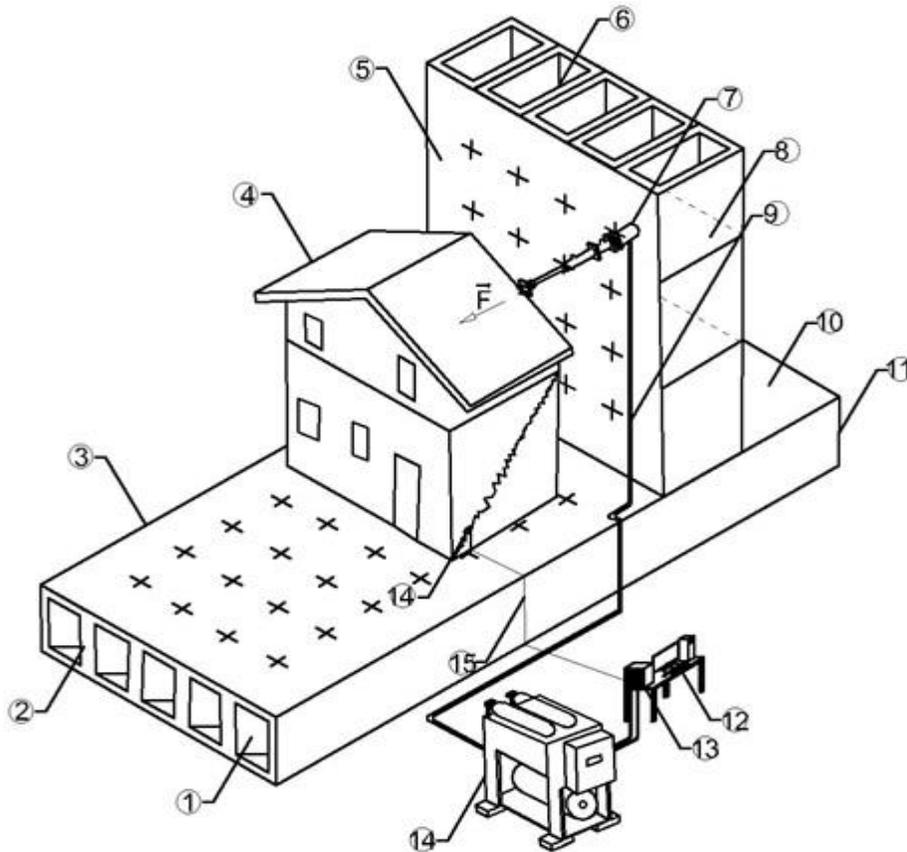
4.3. ¿Cómo funciona?

Funciona por medio un sistema hidráulico y actuadores mecánicos anclados al muro. Estos actuadores mecánicos son los encargados de generar la carga unidireccional y hacer colapsar los elementos estructurales o estructuras que se quiera investigar.

4.4. ¿Cuáles son sus aplicaciones?

Su aplicación típica es la prueba de carga dinámica lateral. Este muro permite evaluar la vulnerabilidad sísmica, vientos y empujes en edificios y viviendas de mediana o gran escala.

Figura 19. Ilustración de un muro de reacción



Fuente: UGALDE, Carlos. *Diseño Arquitectónico del Laboratorio de Estructuras y Diseño Estructural del muro de reacción de la Facultad De Ingeniería U.A.Q. Querétaro México.* <http://ri-ng.uaq.mx/>. Consulta: 21 de noviembre de 2019.

Figura 20. **Componentes de un muro de reacción**

Símbolo	Descripción
1	Galería de inspección horizontal
2	Muro vertical de sostenimiento
3	Losa de Reacción
4	Estructura de ensayo
5	Muro de reacción
6	Galería de inspección Vertical
7	Actuador horizontal
8	Losa de trabajo
9	Servo válvula
10	Tacón de sostenimiento
11	Muro cortante
12	Sensor
13	Cable eléctrico
14	Computador
15	Sistema de adquisición de datos
16	Sistema hidráulico

Fuente: UGALDE, Carlos. *Diseño Arquitectónico del Laboratorio de Estructuras y Diseño Estructural del muro de reacción de la Facultad De Ingeniería U.A.Q. Querétaro México.* <http://ri-ng.uaq.mx/>. Consulta: 21 de noviembre de 2019.

4.5. Partes que conforman un muro y losa de reacción

El muro y losa de reacción está conformado básicamente por varios elementos estructurales rígidos de concreto reforzado que permiten absorber las cargas generadas por los actuadores, entre ellos, un muro y losa de reacción, un muro vertical de sostenimiento, un muro cortante, losas de trabajo, un tacón de sostenimiento y galerías horizontales y verticales.

4.5.1. Galerías horizontales

No son tomadas en cuenta como elementos estructurales, sin embargo, su función es permitir el acceso de los analistas de supervisión para los anclajes en el sentido horizontal de la losa de reacción. Permiten la colocación de la instrumentación de modelos estructurales y la colocación de cables eléctricos por los agujeros pasantes de la losa de reacción.

4.5.2. Muro vertical de sostenimiento

Son los muros verticales que cargan la losa de reacción, al mismo tiempo que proporcionan galerías horizontales (túneles) de inspección que sirven para la sujeción por debajo de los elementos estructurales que se van a ensayar.

4.5.3. Losa de reacción

Es un elemento importante en conjunto con el muro de reacción. Prácticamente es una losa de concreto armado con la particularidad de poseer agujeros pasantes en toda su superficie para el anclaje de las estructuras que se van a ensayar, o el anclaje de los actuadores en sentido vertical.

4.5.4. Muro de reacción

Elemento principal para la ejecución de los ensayos falsos-dinámicos. Prácticamente es un muro de concreto reforzado con forma cuadrada o rectangular que posee agujeros pasantes en su superficie para la colocación de los modelos estructurales que se van a ensayar, o los actuadores en sentido lateral.

4.5.5. Galerías verticales

No son tomadas en cuenta como elementos estructurales, sin embargo, su función es permitir el acceso de los analistas de supervisión para los anclajes en el sentido vertical del muro de reacción. Permiten la colocación de la instrumentación de modelos estructurales y la colocación de cables eléctricos por los agujeros pasantes de la losa de reacción.

4.5.6. Losas de trabajo

Son elementos horizontales (entrepisos) incluidos dentro del muro de reacción. Se encuentran ubicadas en la parte superior del mismo con el objetivo que el analista técnico suba, revise y haga los ajustes previos, durante y después del ensayo.

4.5.7. Muro de cortante

Base vertical trasera de apoyo para el muro de reacción. Soporta la transmisión de cargas del mismo.

4.5.8. Tacón

Elemento estructural ubicado en la parte trasera del muro de reacción que tiene como objetivo evitar el volteo de dicho muro debido a las cargas verticales provocadas por los actuadores en la losa de reacción.

4.6. Descripción del equipo de aplicación de carga lateral en muro de reacción

El equipo para la aplicación de carga lateral e instrumentación localizada durante la búsqueda de información en este trabajo para un muro de reacción, se describen a continuación.

4.6.1. Sistema hidráulico

El sistema general hidráulico está conformado por una bomba hidráulica, un depósito, una torre de refrigeración, filtros, acumuladores y válvulas. La función principal de este elemento es proporcionar la presión y el caudal hidráulico necesario en el interior de los pistones de los actuadores para enseguida generar la carga unidireccional en sentido horizontal.

4.6.2. Actuadores

Son gatos hidráulicos de gran tamaño controlados por computadora que permiten someter a las estructuras de ensayo a cargas laterales de tipo falso-dinámico. Estos actuadores son los encargados de controlar los movimientos programados en una computadora.

En el caso de del muro de reacción y la losa de reacción son diseñados para resistir las fuerzas impuestas por los actuadores, típicamente de varios mega newton, que son necesarios para deformar y dañar seriamente los modelos de prueba sujetas a carga lateral. Las dimensiones de los actuadores generalmente son de gran tamaño, sin embargo, depende de la carga para lo que son requeridos.

4.6.3. Servo válvula

La servo válvula o las mangueras hidráulicas son los elementos encargados de la regulación del movimiento del actuador. Regulan el caudal hidráulico que entra y sale del cilindro interno del actuador.

4.6.4. Computador

Para la carga sistemática, el procesamiento de datos y la verificación de seguridad, se hace uso de las computadoras, por lo general, dos. Una para el manejo de datos y otra para el control de las cargas de aplicación. Durante la prueba una computadora supervisa el movimiento de los actuadores para un control de comando de carga preciso y para la verificación de seguridad. Mientras, la otra computadora se utiliza para la adquisición y el procesamiento de datos.

4.6.5. Adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos consiste en la conexión de diferentes dispositivos, los cuales miden, transmiten, decodifican y finalmente muestran información fácil de entender.

El sistema de adquisición de datos consiste en la conexión de diferentes dispositivos, los cuales miden, transmiten, decodifican y finalmente muestran información fácil de entender.

De manera específica, los datos de carga medidos por la celda de carga, transductores de desplazamiento y medidores de deformación, son transmitidos a un decodificador de datos y después guardada y leída en una computadora. Un programa especial es usado para leer en tiempo real, fuerzas, desplazamiento y deformaciones, permitiendo graficar resultados durante el ensayo. Este sistema de adquisición de datos especial es fabricado por la institución que posee el muro de reacción, o por una empresa privada.

4.7. Instrumentación básica utilizada en un muro de reacción

Instrumentos de laboratorio es un término general aplicable a todos los medidores, recipientes y otras herramientas para realizar síntesis y análisis en el ámbito de los diversos trabajos de laboratorio. En un laboratorio con un muro y losa de reacción se cuentan con la instrumentación mínima descritos a continuación.

4.7.1. Medidor de desplazamiento

Para la medición del desplazamiento se utilizan dos tipos de transductores de desplazamiento. Entre los más comunes están los LVDT (Transformador diferencial de variación lineal) de tipo analógico (con contacto) o digital (laser).

4.7.2. Transductor de fuerza

Un transductor de fuerza, célula de fuerza o sensor de fuerza es un dispositivo capaz de transformar o convertir una determinada manifestación de energía de entrada, en otra diferente a la salida, pero de valores muy pequeños en términos relativos con respecto a un generador.

Este transductor es utilizado y colocado en las estructuras o equipo de ensayo para la medición de las fuerzas generadas en el mismo.

4.7.3. Indicador de cuadrante

El indicador de cuadrante es un instrumento que mide la desviación en grados en el que un eje o acoplamiento se desvía de la rotación circular real. Se utiliza para medir el desplazamiento entre dos piezas y el ángulo que han rotado. Este es utilizado y colocado en el muro de reacción para medir los desplazamientos entre conexiones viga-columna, columna-cimentación, losa-viga entre otros.

4.8. Descripción de muros de reacción localizados en este trabajo

Los muros de reacción localizados durante la búsqueda de información en este trabajo, se describen a continuación.

4.8.1. Muro de reacción de la Universidad Nacional de Taiwán

El Centro Nacional de Investigación en Ingeniería de Terremotos, NCREE por sus siglas en inglés, ubicado en el campus de la Universidad Nacional de Taiwán, establecido en octubre de 1990, vincula a investigadores y profesionales en ejercicio para el desarrollo del conocimiento y experiencia en campos relacionados con sismos. NCREE utiliza una variedad de instalaciones computacionales y experimentales en campos relacionados con sismos. Como, por ejemplo, el equipo de ensayo estructural a gran escala encontrado que se describe a continuación.

- Descripción del muro y losa de reacción: este muro y losa de reacción (ver figura 21), es utilizado para proporcionar pruebas estáticas tradicionales como las pruebas cuasi-estáticas, pruebas de carga repetidas, y pruebas falso-dinámicas a estructuras a gran escala.
- El muro de reacción cuenta con una geometría en forma de L y con una disposición de alturas escalonada de bloques modulares de 15 m, 12 m, 9 m y 6 m, los anchos modificables corresponden a 15,5 m y 12 m.
- El muro principalmente se utiliza para fijar el actuador hidráulico y proporcionar una fuerza de reacción cuando el actuador hidráulico ejerce una fuerza contraria.

- En cuanto a la losa de reacción NCREE también cuenta con un sistema de piso de reacción con una longitud de 60 m por un ancho de 29 m y un espesor de 1,2 m correspondientes.
- La losa de reacción se utiliza principalmente para fijar la muestra de ensayo y evitar que esta se mueva o gire.

A continuación se muestra una imagen del estudio experimental de marcos reforzados de baja ductilidad nuevos y existentes en el muro y losa de reacción de la universidad nacional de Taiwán. Desafortunadamente fue la única información que se pudo obtener de este ensayo.

Figura 21. **Muro y losa de reacción, Taiwán**



Fuente: Universidad Nacional de Taiwán. *Centro Nacional de Investigación de Ingeniería Sísmica*. <https://www.ncree.narl.org.tw/>. Consulta: 2 de septiembre de 2019.

4.8.2. Muro de reacción de la Universidad de Coruña, España

El Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil (CITEEC), vinculado directamente con la Universidad de La Coruña (España), se creó en el año 2000 con el objetivo de mejorar la investigación y estudio en el ámbito de la construcción, en su vertiente de edificación y de ingeniería civil.

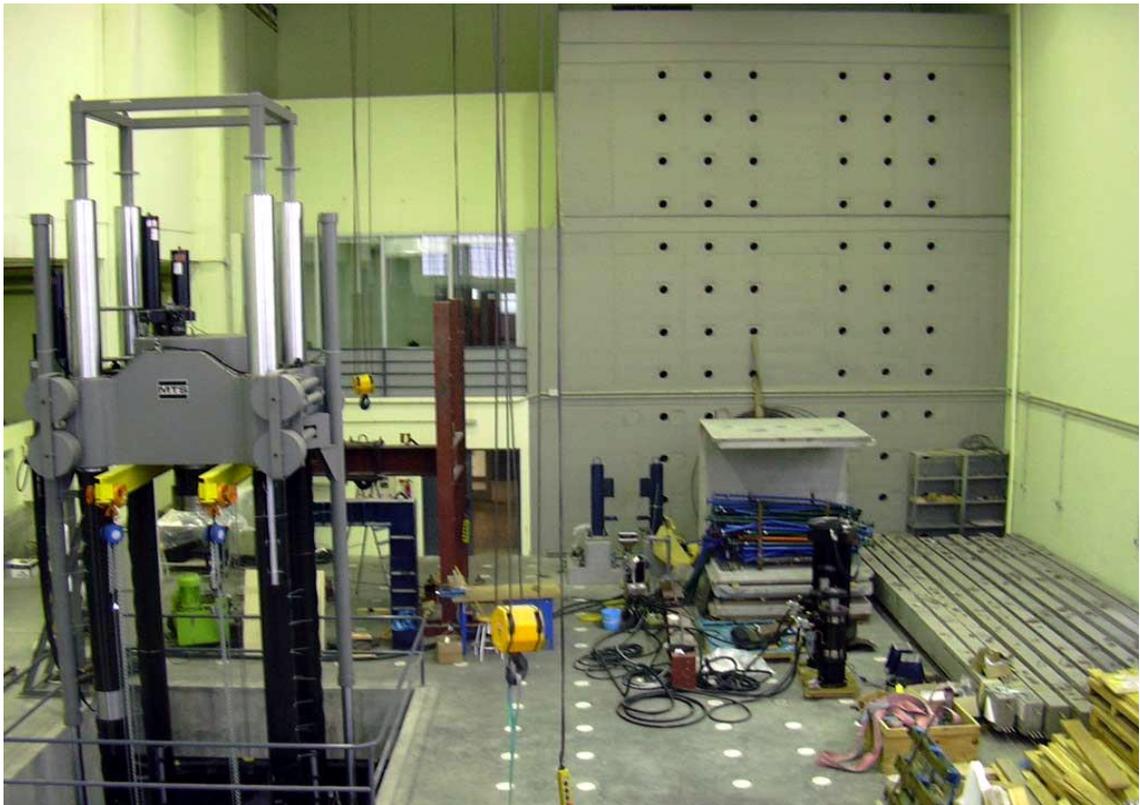
Desde la óptica del análisis experimental, el CITEEC posee infraestructuras capaces de abordar ensayos de gran envergadura a nivel de los centros más avanzados de la Unión Europea, como, por ejemplo, el laboratorio de construcción hidráulica de puertos, costas, ingeniería sanitaria, aéreo elástica de puentes y el más llamativo de todas sus instalaciones, el laboratorio del área estructural o de construcción.

Este último laboratorio cuenta con la siguiente infraestructura de ensayos estructurales a gran escala mediante el muro y losa de reacción.

- Descripción del muro y losa de reacción: la losa de reacción del CITEEC cuenta con un área de ensayo de 346 m², es decir, 15 x 23 m en planta y su estructura es la de una sección de cajón de 4 m de altura.
- La losa de reacción se encuentra perforada regularmente en toda su superficie mediante agujeros de 0,15 m de diámetro separados 0,8 m en ambas direcciones. La misión de tales huecos es la de alojar posibles anclajes que puedan precisarse en el ensayo de grandes estructuras. Para facilitar su uso, el cajón de la sección de la losa de reacción, posee una altura libre de 2,2 m que permite circular bajo ella libremente para la colocación de los anclajes a los prototipos de ensayo.

- Por otra parte, el muro de reacción (ver figura 22), es una estructura rectangular de 8 m de ancho por 10 m de altura.
- El muro de reacción al igual que la losa de reacción, está dotado de numerosos anclajes que soportan cada uno de estos hasta 800 kN de reacción en el muro.

Figura 22. **Muro y losa de reacción, CITEEC**



Fuente: Universidad de Coruña. *Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil*. <https://www.udc.es/citeec/construccion.html>. Consulta: 9 de diciembre de 2019.

4.8.3. Muro de reacción de la Universidad de Lehigh, Estados Unidos de América

La Infraestructura de Investigación de Ingeniería de Riesgos Naturales (NHERI por sus siglas en inglés) es una instalación nacional en los Estados Unidos de América con utilización multiusuario en distintas universidades del país, que proporciona a la comunidad de ingeniería de riesgos naturales una infraestructura de investigación de última generación. Financiado por la Fundación Nacional de Ciencia (NSF por sus siglas en inglés), NHERI permite a los investigadores explorar y probar conceptos innovadores para proteger los hogares, las empresas y las líneas de vida de la infraestructura de los impactos de los sismos, el viento y los peligros del agua. Esto permite innovaciones para ayudar a evitar que los peligros naturales se conviertan desastres sociales.

En relación a la infraestructura de investigación, NHERI incluye instalaciones experimentales de ingeniería eólica, cibernética y sísmica; esta última cuenta con un muro y losa de reacción de gran tamaño (ver figura 23). La gran fuerza de este laboratorio es la simulación precisa a gran escala de múltiples grados de libertad y multidireccionales de los efectos de los eventos de peligro natural en los sistemas de infraestructura civil, es decir, los edificios.

- Descripción del muro y losa de reacción: el centro experimental NHERI cuenta en el campus de la Universidad de Lehigh con una losa de reacción que mide 31 x 15 m en planta, es decir, 472 m² de superficie; muros de reacción de hasta 15,2 m de altura, puntos de anclaje para la colocación de los enormes actuadores, ver figura 24, espaciados en una cuadrícula de 1,5 m a lo largo del piso y las paredes y en el que cada punto de anclaje resiste una fuerza de tensión de 1,33 MN y una fuerza de corte de 2,22 MN. Se utiliza una estructura de acero adicional en

combinación con la losa de reacción y los muros de reacción para crear una amplia variedad de configuraciones de prueba. El área de ensayo de muro y losa de reacción cuenta con un equipo de grúa aérea de 178 kN de capacidad que presta el servicio al área de prueba y al área de fabricación adyacente. Grúas más pequeñas adicionales con capacidades de 45 kN y 27 kN también sirven a esta área. El sistema hidráulico, combinado con los actuadores dinámicos y un sistema de servo control digital, permiten fuertes efectos de movimiento en tiempo real, sostenible por hasta 30 segundos.

Figura 23. **Muro y losa de reacción-Universidad de Lehigh**



Fuente: Universidad de Lehigh. *Infraestructura de Investigación de Ingeniería de Peligros Naturales*. <https://lehigh.designsafe-ci.org>. Consulta: 30 de diciembre de 2019.

A continuación, se muestra el tamaño gigante que pueden llegar a tener los actuadores utilizados para la aplicación de carga lateral en un muro o losa de reacción, en este caso los actuadores mostrados pertenecen al laboratorio de grandes estructuras en la universidad de Lehigh, Estados Unidos.

Figura 24. **Actuador utilizado en muro y losa de reacción de Lehigh**



Fuente: Universidad de Lehigh. *Infraestructura de Investigación de Ingeniería de Peligros Naturales*. <https://lehigh.designsafe-ci.org>. Consulta: 30 de diciembre de 2019.

4.8.4. Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA), El Salvador

La Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, conocida como UCA, fundada en septiembre de 1965 y perteneciente a San Salvador, es una universidad de inspiración cristiana al servicio del pueblo salvadoreño y centroamericano para impulsar universitariamente la transformación social, a través de la investigación, la docencia y la proyección social. La Universidad Centroamericana se caracteriza por el desarrollo de investigaciones multidisciplinarias e interinstitucionales en el campo ambiental y científico-tecnológico.

En el ámbito del desarrollo de la investigación en ingeniería UCA cuenta con un Laboratorio de estructuras grandes (LEG) único en el país y adquirido gracias a la donación de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (por sus siglas en inglés, JICA) con el objetivo de realizar proyectos que permitan realizar pruebas e investigaciones a escala real en la mejora de la vivienda popular y desarrollo de sistemas constructivos antisísmicos del país.

Dentro la infraestructura con la que cuenta LEG se encuentra un muro de reacción y losa de reacción que permiten realizar simulaciones de sismos para poner a prueba materiales y sistemas estructurales a escala real; del mismo modo, LEG cuenta con medidores de deformación en acero, un marco de reacción y una grúa para poner a prueba el comportamiento estructural de diferentes sistemas constructivos.

El Laboratorio de estructuras grandes (LEG) de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas de San Salvador, es el único de El Salvador que permite realizar pruebas e investigaciones a escala real para

mejorar la vivienda popular y el desarrollo de sistemas constructivos sismo resistentes. Fue inaugurado en 2003 gracias al apoyo financiero y técnico de la Agencia Internacional de Cooperación Japonesa (JICA); el Vice-ministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano de El Salvador y la Fundación Salvadoreña de Desarrollo y Vivienda Mínima. El laboratorio nació después de terremoto de 2001. Posee un piso y muro de reacción para poner a prueba diferentes sistemas constructivos a escala real. En él reciben cursos los estudiantes de ingeniería civil y desarrolla investigaciones que tienen impacto en la normativa del país.

En la figura 25 se pueden ver fotografías de las instalaciones del Laboratorio de Estructuras Grandes (LEG) de la Universidad Centroamericana. Desafortunadamente, en su página electrónica es la única información que pudo obtenerse.

Figura 25. **Muro y losa de reacción de UCA**



Muro de reacción

Continuación figura 25.



Losa de reacción

Fuente: Universidad Centroamericana José Simeón Cañas. *Laboratorio de Estructuras Grandes*. <http://www.uca.edu.sv/>. Consulta: 25 de enero de 2020.

4.9. Ventajas del muro de reacción

Las ventajas para el equipo de aplicación de carga lateral, muro de reacción, halladas durante la búsqueda de información en este trabajo, se describen a continuación.

- Los modelos ensayados en muro de reacción son ensayados en sus dimensiones reales.

- Dado que este equipo de aplicación de carga es automatizado, la simulación de cargas laterales se hace totalmente accesible cuando se trata de simular cargas de sismos, viento o empujes laterales.
- Es posible reconocer y observar los patrones de falla en la estructura en cualquier instante de tiempo, dada la característica de aplicación de carga lateral en cámara lenta.
- El diseño geométrico de un muro de reacción puede ser modificable si la construcción de este es con bloques modulares, permitiendo modificar la altura y ancho de este.

4.10. Desventajas del muro de reacción

Las desventajas para el equipo de aplicación de carga lateral, muro de reacción, halladas durante la búsqueda de información en este trabajo, se describen a continuación.

- Se requiere una base sólida de conocimientos de dinámica, análisis de vibraciones, instrumentación y técnicas de medición, para la total comprensión del manejo y uso de un equipo de aplicación de carga como el muro de reacción.
- El periodo de planeación de los modelos por ensayar es el mismo que el de una obra a escala natural.
- El tiempo de ensayo de una estructura en un muro de reacción puede durar un largo periodo debido a que se realiza en cámara lenta.

5. MESA SÍSMICA

5.1. ¿Qué es una mesa sísmica?

Es un dispositivo o equipo mecánico para ensayos dinámicos estructurales, de forma rectangular.

5.2. ¿Para qué sirve?

Es un equipo de ensayo estructural que sirve para la aplicación de carga dinámica a estructuras de pequeña, mediana y gran escala como edificios viviendas, puentes y cualquier estructura que se requiera investigar, con el objetivo de determinar su comportamiento estructural ante cargas unidireccionales y rotacionales en los tres ejes cartesianos.

5.3. ¿Cómo funciona?

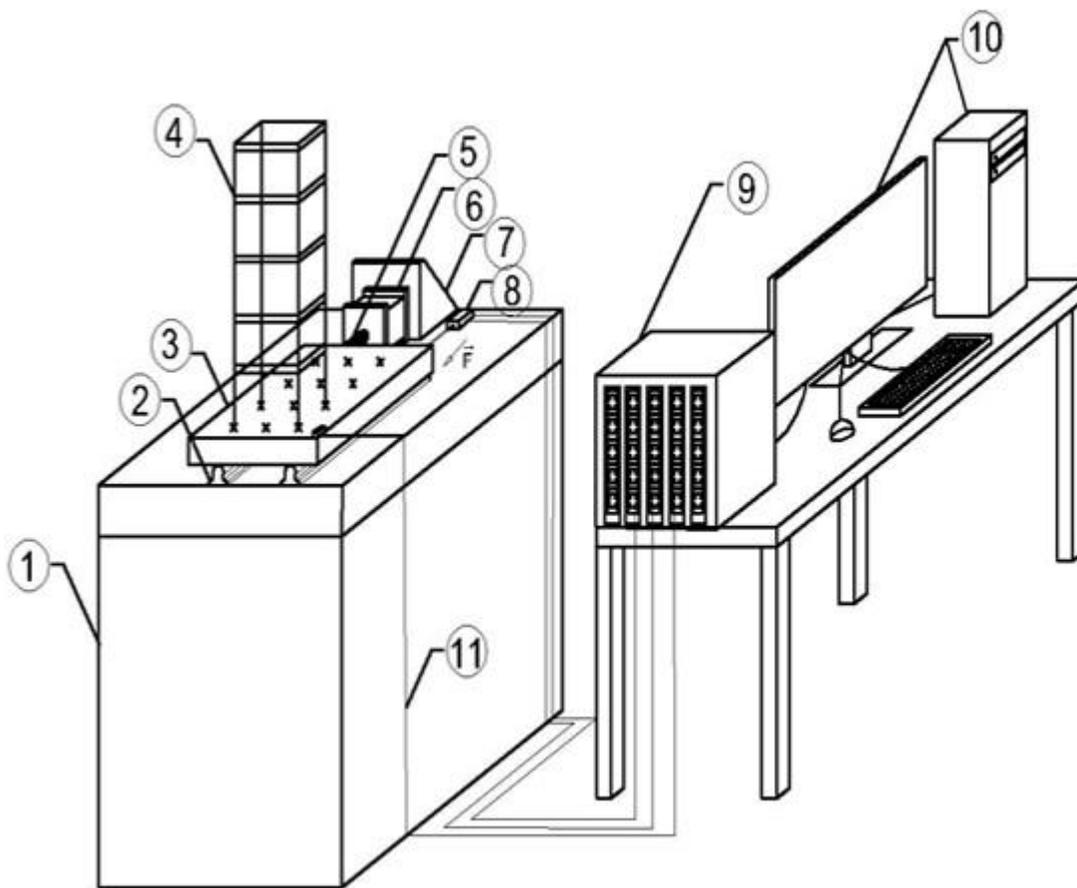
Funciona por medio de las fuerzas provenientes del actuador colocado en forma vertical, horizontal o inclinada, anclada a una estructura llamada mesa de reacción.

5.4. ¿Cuáles son sus aplicaciones?

Su aplicación típica es totalmente de comportamiento dinámico, es decir, su uso es orientado al análisis y diseño de estructuras sometidas a eventos sísmicos.

Un ejemplo es la comprobación de edificios y casas a escala natural o reducida en donde se quieran obtener resultados de aceleración, frecuencia o la determinación del estado de los materiales de una estructura ante un evento sísmico.

Figura 26. **Ilustración de una mesa sísmica unidireccional**



Fuente: CARRILLO, Julián. *Evaluación del diseño de una pequeña Mesa vibratoria para ensayos en ingeniería sismo resistente*. <https://revistas.unimilitar.edu.co/>. Consulta: 25 de enero de 2019.

Tabla VI. **Componente de una mesa sísmica unidireccional**

Número	Descripción
1	Base de concreto
2	Rodamiento lineal
3	Plataforma móvil
4	Modelo de ensayo
5	Actuador integrado con servo válvula
6	Sistema Hidráulico
7	Masa de reacción
8	Sensor
9	Sistema de adquisición de datos
10	Computador
11	Cable eléctrico

Fuente: CARRILLO, Julián. *Evaluación del diseño de una pequeña Mesa vibratoria para ensayos en ingeniería sísmo resistente*. <https://revistas.unimilitar.edu.co/>. Consulta: 25 de enero de 2019.

5.5. Partes que conforman una mesa sísmica

El sistema mecánico o estructura de la mesa sísmica está conformado por todas aquellas piezas y partes del sistema cuya función principal es mantener la estabilidad estructural y permitir que mecánicamente se transmitan las cargas dinámicas necesarias para la realización del ensayo.

Así es entonces que la mesa sísmica está compuesta por varias piezas y elementos mecánicos muy complejos para mesas sísmicas de grandes dimensiones, sin embargo, en este documento se describen las partes básicas de una mesa sísmica unidireccional de un grado de libertad, es decir, con un actuador de aplicación de carga y movimiento horizontal.

5.5.1. Plataforma rígida del simulador

Esta es una plataforma rígida de metal con agujeros pasantes que provee de área y anclaje del modelo estructural a ensayar. Su función prácticamente es alojar los modelos de ensayo en su superficie.

5.5.2. Masa de reacción

Elemento metálico, o de concreto armado, anclado a una losa de cimentación que permite realizar una fuerza contraria a la fuerza realizada por los actuadores.

5.5.3. Sistema de soporte lineal

Componente que provee de un área de deslizamiento a la plataforma rígida de la mesa sísmica. Es un sistema mecánico de muy baja fricción que permite los movimientos de traslación de la plataforma rígida. Estos sistemas de soporte lineal pueden ser de esferas, películas de aceite, actuadores diagonales y sistemas de aire a presión.

5.6. Descripción del equipo de aplicación de carga lateral que utiliza una mesa sísmica

El equipo para la aplicación de carga lateral e instrumentación localizada durante la búsqueda de información en este trabajo para una mesa sísmica, se describen a continuación.

5.6.1. Sistema hidráulico

El sistema hidráulico del equipo consta de un sistema general de presión común a otras máquinas del laboratorio y a un sistema hidráulico local. El sistema general está formado por una bomba hidráulica, un depósito, una torre de refrigeración, filtros, acumuladores y válvulas.

5.6.2. Actuador

Los actuadores consisten en cilindros hidráulicos lineales que transmiten el movimiento a la plataforma rígida de la mesa sísmica. Estos son los que generan el movimiento de carga lateral dinámica en la estructura de ensayo.

5.6.3. Servo válvula

La servo válvula o las mangueras hidráulicas son los elementos encargados de la regulación del movimiento del actuador. Regulan el caudal hidráulico que entra y sale del cilindro interno del actuador.

5.6.4. Computador

Para la carga sistemática, el procesamiento de datos y la verificación de seguridad se hace uso de las computadoras, por lo general, dos. Una para el manejo de datos y otra para el control de las cargas de aplicación. Durante la prueba una computadora supervisa el movimiento de los actuadores para un control de comando preciso y para la verificación de seguridad. Mientras, la otra computadora en línea con unidades de adquisición de datos se utiliza para el procesamiento de datos.

5.6.5. Sistema de adquisición de datos

La adquisición de datos o de señales consiste en la toma de muestras del mundo real para generar datos que puedan ser manipulados por un ordenador u otros dispositivos electrónicos. Para esto es utilizado un sistema de adquisición de datos especial, ya sea fabricado por la institución que posee la mesa sísmica, o por una empresa privada. Este sistema recibe los datos recopilados por la instrumentación colocados en el equipo para enseguida ser mostrados en la pantalla del computador.

5.7. Instrumentación básica utilizada en una mesa sísmica

En los laboratorios estructurales es común encontrar diferentes tipos de instrumentación básica para la medición de magnitudes físicas como fuerza, aceleración y desplazamiento. Cada instrumentación tiene diferentes atributos y limitaciones que determinan su idoneidad para diferentes tipos de aplicaciones. La siguiente es una lista de una instrumentación básica utilizada en la mesa sísmica.

5.7.1. Acelerómetro

Instrumento utilizado para la medición de la aceleración. Este es colocado directamente en el cuerpo de la estructura a ensayar o directamente en la plataforma móvil.

5.7.2. Galga extensométrica

Instrumento utilizado para la medición de deformación. Es colocado directamente en el cuerpo estructural del modelo investigado.

5.7.3. Celdas de carga

Instrumentación utilizada para la medición de la carga. Al igual que en la descripción de los equipos de ensayo anteriores, esta celda es montada y anclada a la estructura del actuador, con el fin de determinar la carga generada en la estructura de ensayo.

5.7.4. Sensor de movimiento o desplazamiento

Instrumento utilizado para la medición de los desplazamientos. Es colocado generalmente en el elemento estructural ensayado.

5.8. Mesas sísmicas localizadas durante este trabajo

En la investigación bibliográfica y de campo, se localizaron las mesas sísmicas que se describen a continuación.

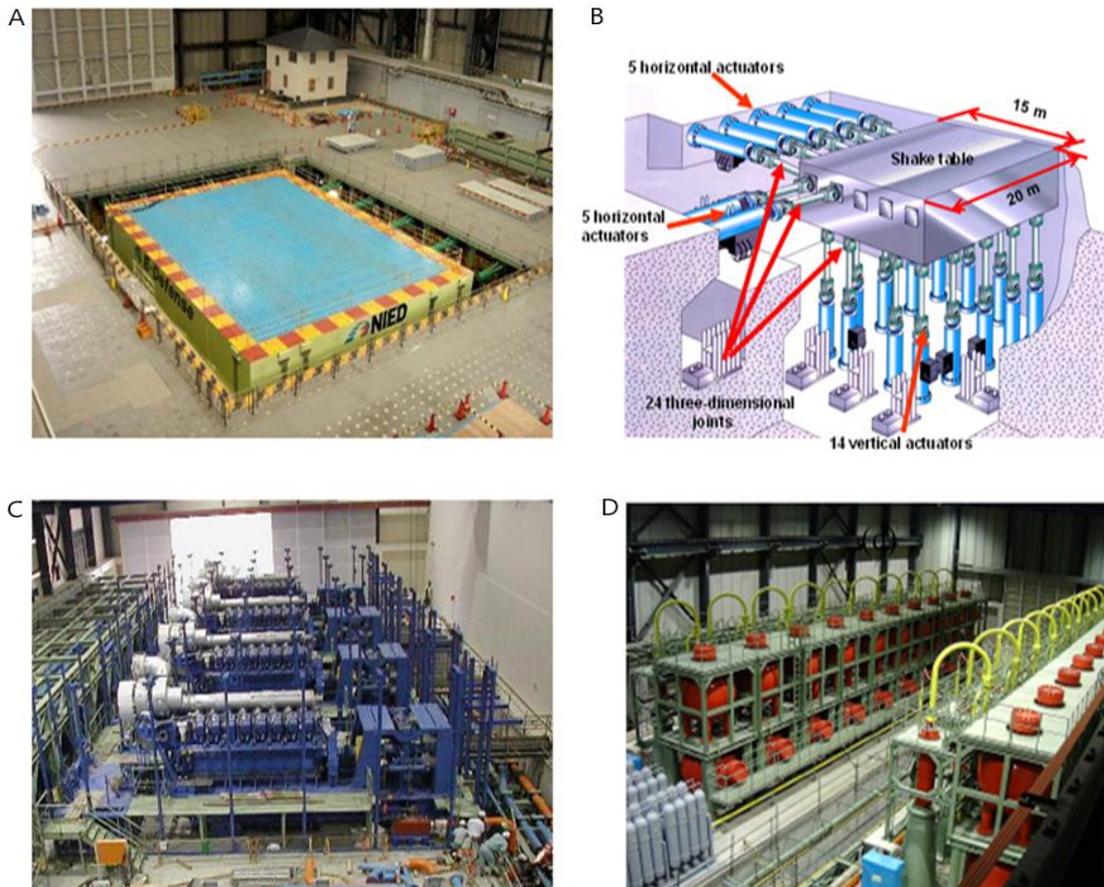
5.8.1. Mesa sísmica del Centro de Investigación de Ingeniería de Terremotos de Hyogo, Japón

El Instituto Nacional de Investigación para Ciencias de la Tierra y Resiliencia ante Desastres (INDE por sus siglas en inglés) y Centro de Investigación de Ingeniería de Terremotos de Hyogo Japón, nació en 1999 con el objetivo de mejorar el nivel de la ciencia y tecnología en prevención de desastres ante los hechos ocurridos con el terremoto Kobe, en 1995, y el ocurrido en Kocaeli, en 1999. El instituto cuenta con la instalación de simulación sísmica más grande del mundo. La misma es descrita a continuación.

- Descripción de la mesa sísmica: el Instituto Nacional de Investigación Japonés para la Ciencias de la Tierra y Resiliencia ante Desastres, actualmente contiene la mesa sísmica tridimensional más grande del mundo. Esta cuenta con un tamaño en plataforma de 20 × 15 m y una capacidad máxima de carga de 12 000 kN, figura 27 A. La mesa sísmica es impulsada por 5 actuadores horizontales instalados en cada dirección y por 14 actuadores verticales como se muestra en la figura 27 B. Cada actuador tiene una fuerza motriz máxima de 4 500 k en conjunto con un transductor de medición de desplazamiento magnostriectivo. La mesa sísmica tiene grandes juntas universales en las conexiones entre la mesa y los actuadores, lo que permite el movimiento en 3D con una fricción mínima. Cada actuador horizontal tiene 3 servo válvulas, lo que permite un caudal total de 45 000 lpm, para alcanzar una velocidad de mesa de 2,0 m / s. Basado en el caudal y las especificaciones requeridas para la reproducción de los movimientos registrados durante el terremoto de Kobe, se determinó que el sistema de suministro de energía hidráulica debía comprender 4 bombas de aceite accionadas por motores de gas, como se muestra en la figura 27 C, y 20 unidades de acumuladores de

1 000 lpu, que se muestran en la figura 27 D. El acumulador de la mesa tiene la desventaja que requiere de unos minutos para la restauración del aceite presurizado, su nueva acumulación durante la excitación no es práctica. Los actuadores pueden generar una frecuencia de hasta 15 Hz con una precisión razonable, aunque se puede lograr una frecuencia de 30 Hz si se sacrifica algo de precisión.

Figura 27. Resumen de mesa sísmica de INDE



Fuente: Instituto Nacional de Investigaciones sobre Ciencias de la Tierra y Resiliencia ante Desastres. *Instalaciones principales de mesa sísmica*. <https://www.bosai.go.jp/>. Consulta: 10 de febrero de 2020.

A continuación, en la figura 28 se ilustra un experimento llevado a cabo en la mesa vibratoria de INDE, este consistió en sacudir un edificio de madera de 7 pisos a gran escala, en el cual se utilizó el movimiento sísmico registrado en Canoga Park durante el terremoto de Northridge en 1994. La estructura de prueba fue sacudida por el 180 % del movimiento sísmico y se investigó la respuesta de la estructura bajo un movimiento severo.

Figura 28. **Experimento en mesa sísmica gigante de INDE**



Fuente: Instituto Nacional de Investigaciones sobre Ciencias de la Tierra y Resiliencia ante Desastres. *Experimento en edificio de madera*. <https://www.bosai.go.jp/>. Consulta: 10 de febrero de 2020.

5.8.2. Mesa sísmica de la Universidad Nacional de Costa Rica Lanamme UCR

EL Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (Lanamme)-UCR fundado en la década de los cincuenta. Es un laboratorio nacional especializado en la investigación aplicada a la docencia y la transferencia tecnológica en el campo de la protección de la infraestructura civil vial y líneas vitales. El Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica cuentan con modernos equipos de ensayo dinámico para realizar múltiples y complejos ensayos de materiales y comportamientos sísmicos. Así mismo, la UCR cuenta con personal altamente calificado para la ejecución de los ensayos en los distintos laboratorios que la componen, incluyendo certificaciones del ACI (American Concrete Institute) para ensayos de concreto en el campo. Estos laboratorios están enfocados en ensayos para materiales y modelos estructurales concernientes a obras civiles como taludes, edificios, cimientos, viviendas puentes, entre otros.

Los laboratorios de UCR se dividen en tres áreas, que son el laboratorio de concreto y agregados, geotecnia y estructuras. Sin embargo, el laboratorio de estructuras destaca por su equipo de ensayo dinámico como las mesas sísmicas descritas a continuación:

- Descripción de las mesas sísmicas portátiles: para los ensayos de simulación de sismos, el laboratorio Lanamme cuenta con 4 mesas sísmicas portátiles, figura 29, que permiten estudiar el efecto de los sismos sobre los modelos estructurales. Las mesas sísmicas con que cuenta el laboratorio son de desplazamiento axial. Son de material de aluminio con dimensiones de 1 800 × 1 100 × 900 mm y varios marcos

de aluminio. Las mesas simulan una losa de reacción y los marcos de aluminio, una vez anclados a las mesas, simulan los marcos de reacción. Cada mesa sísmica cuenta con su respectivo acelerómetro, fuente de poder, un panel de adquisición de datos y una computadora personal con software especializado que permite procesar la información recolectada mediante sensores y controlar la misma. Estas mesas son utilizadas en cursos de licenciatura y maestría y en investigación sobre el comportamiento y la respuesta dinámica de estructuras.

Figura 29. **Mesa sísmica portátil de Lanamme**



Fuente: Universidad Nacional de Costa Rica. *Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales*. <http://163.178.106.6/sitio-nuevo/index.php/nba-latest-news/56-laboratorios/civil-labs.html>. Consulta: 20 de febrero de 2020.

5.8.3. Laboratorio de Simulación Sísmica de la Universidad Mariano Gálvez de Guatemala

El Instituto de Investigaciones de Ingeniería, Matemática y Ciencias Físicas de la Universidad Mariano Gálvez de Guatemala, creado en el año 2010, tiene como objetivo la mejora en la investigación de las ciencias de la ingeniería. Para esto, la institución cuenta con laboratorios de hidrología, dinámica, estática, aerodinámica, registro sísmico y el laboratorio de simulación sísmica. Este cuenta con la infraestructura que se describe a continuación.

- Descripción de la mesa sísmica: el equipo del laboratorio de simulación sísmica lo constituye una mesa sísmica biaxial de la marca Quanser.Inc, con plataforma cuadrada de 3 x 3 m.

La mesa sísmica de la UMG es impulsada por dos pistones, uno en cada eje horizontal, y está totalmente equipada para hacer pruebas en modelos físicos de escala reducida.

5.8.4. Mesa sísmica del Laboratorio de Estructuras de la Universidad de El Salvador (UES)

La Universidad de El Salvador (UES) es la única universidad pública de El Salvador. Su población estudiantil, según los datos basados en el número de estudiantes matriculados en 2013, promedia 56 000 alumnos. Es la universidad más grande del país y la primera en ser fundada. El campus central posee la mayor población estudiantil universitaria de todo el país. En este claustro funcionan nueve facultades, dentro de estas la carrera de ingeniería civil, que cuenta con diversas áreas de laboratorio.

Figura 30. **Mesa sísmica de UMG**



Fuente: Universidad Mariano Gálvez de Guatemala. *Instituto de Investigaciones de Ingeniería, Matemática y Ciencias Físicas*. <https://in3.umg.edu.gt/images/5.png>. Consulta: 30 de marzo de 2019.

El laboratorio de la Escuela de Ingeniería Civil de la UES está dividido en cuatro áreas de especialización:

- Laboratorio de suelos y materiales q
- Laboratorio de topografía
- Laboratorio de mezclas asfálticas

- Laboratorio de estructuras

Este último laboratorio de estructuras de la UES es un centro de actividades, con recursos para desarrollar pruebas en construcciones a escala natural apoyado por una mesa Inclinable, ver figuras 31 y 32, en conjunto con un marco de carga, figura 11 y un decodificador de datos, figura 13, para el ensayo en componentes estructurales de concreto reforzado y mampostería.

El laboratorio cuenta con un sistema de aplicación de carga (actuadores) modernos (figura 12), para la realización de las investigaciones experimentales, que tienen como objeto verificar y desarrollar sistemas constructivos resilientes e innovar en alternativas de reforzamiento y reparación de estructuras dañadas por sismo.

Figura 31. **Mesa inclinable UES**



Fuente: Universidad Nacional de San Salvador. *Laboratorio de Estructuras*.
<http://www.fia.ues.edu.sv/taishin/index.html>. Consulta: 26 de junio de 2020.

Figura 32. **Ensayo de módulo en mesa inclinable de UES**



Fuente: Universidad Nacional de San Salvador. *Laboratorio de Estructuras*.
<http://www.fia.ues.edu.sv/taishin/index.html>. Consulta: 26 de junio de 2020.

5.9. Ventajas de la mesa sísmica

Las ventajas para el equipo de aplicación de carga lateral, mesa sísmica, halladas durante la búsqueda de información en este trabajo, se describen a continuación.

- Equipo de ensayo que ofrece los mejores resultados sobre el comportamiento de las estructuras bajo cargas laterales.
- Las mesas sísmicas de grandes dimensiones permiten la aplicación de grandes cargas laterales como para representar el comportamiento de estructuras a escala completa en un sismo de elevadas magnitudes.

- Las mesas sísmicas pequeñas y unidireccionales son convenientes y sencillas de manipular para el análisis de modelos a menor escala sobre todo si se trata de objetivos netamente educacionales.

5.10. Desventajas de la mesa sísmica

Las desventajas para el equipo de aplicación de carga lateral, mesa sísmica, halladas durante la búsqueda de información en este trabajo, se describen a continuación.

- Ya sean de gran tamaño o de pequeñas dimensiones, involucran una costosa construcción y mantenimiento debido a las piezas mecánicas de las que están compuestas.
- Un modelo a escala real o escala reducida ensayados en este equipo requiere un equipo multidisciplinario de personal capacitado, tanto para la construcción, ejecución y el montaje de los modelos de ensayo.
- Controlar una mesa sísmica que ejecute cargas unidireccionales en varios sentidos requiere de un estudio extenso de las especificaciones y manual de quien la construye.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- Existen tres tipos básicos de equipos y procedimientos de ensayos dinámicos estructurales utilizados a nivel mundial, los cuales son de gran importancia en la evaluación estructural y de materiales ante cargas laterales. En este estudio se encontró los tres principales equipos de aplicación de carga más utilizados: la prueba cuasi estática con un equipo de ensayo denominado marco de reacción, la prueba Falsa-dinámica con un equipo de ensayo denominado muro y losa de reacción y las pruebas dinámicas con un equipo de ensayo denominado mesa sísmica.
- Guatemala no cuenta con suficiente información de equipos de ensayo estructural. La única mesa sísmica está en la Universidad Mariano Gálvez; existen dos marcos de carga en la Universidad San Carlos de Guatemala y ningún muro de reacción en todo el país.
- Toda la información concerniente al diseño de equipos de ensayo estructural como la mesa sísmica y el muro de reacción, está muy poco difundida en la región centroamericana.
- Las instituciones que cuentan con un equipo de ensayo estructural de alto nivel en Centro América, han sido colaboraciones o donaciones de parte de países europeos o asiáticos, que son líderes en la construcción de mesas sísmicas y muros de reacción.
- La bibliografía con datos técnicos de los equipos de ensayo como la mesa sísmica y el muro de reacción están en un gran porcentaje en

idioma inglés e idiomas hablados en el continente asiático, lo que para investigaciones futuras debe tomarse en cuenta.

- La mayoría de mesas sísmicas, muros de reacciones y marcos de carga en la región centroamericana son estructuras que realizan ensayos en estructuras a escala reducida, es decir, se ensayan como máximo viviendas de dos niveles.
- El marco de carga sigue siendo un equipo muy utilizado para la realización de ensayos sujetos a cargas cuasi-estáticas laterales. Sin embargo, este no es muy recomendado para la aplicación de cargas dinámicas. Su uso sigue, pero se limita a elementos estructurales y estructuras pequeñas.
- La mesa sísmica y el muro de reacción son ampliamente utilizados para la aplicación de cargas dinámicas en el desarrollo de nuevas tecnologías de materiales y normas estructurales de los países con los que cuentan con alguno de ellos. Estos dos equipos son los más utilizados para la simulación de las cargas sísmicas. Sin embargo, cada uno tiene sus ventajas y desventajas. Entre las más destacadas y observadas en este documento es que el muro de reacción no requiere muchos recursos para su construcción y manejo y permite introducir cargas dinámicas, sin sacudir al objeto de investigación. Contrario a la mesa sísmica que, por observación requiere de grandes recursos para su construcción y manejo.
- Sin duda, los equipos de aplicación de cargas son indispensables para el descubrimiento de nuevas tecnologías y el desarrollo de la infraestructura de un país.

6.1. Síntesis de los equipos de ensayos dinámicos estructurales

A continuación, se presenta una asimilación de los hechos observados en la investigación de este trabajo sobre los equipos y procedimientos de ensayos de estructuras y materiales sujetos ante cargas laterales. Esta síntesis es realizada únicamente por observación, por lo que deberá extenderse o realizar una línea de investigación que involucre datos técnicos y económicos para determinar su veracidad.

6.1.1. Marco de carga o reacción

- Requiere de relativamente bajos costos para su construcción y mantenimiento.
- Los modelos a ensayar son de pequeñas dimensiones
- Equipo limitado para evaluación de desempeño sísmico.
- La larga duración de la prueba permite una observación detallada de la respuesta del modelo experimental.

6.1.2. Muro y losa de reacción

- Requiere de medianos costos de construcción y mantenimiento.
- Los modelos a ensayar son de escala natural.
- Equipo adecuado para la evaluación del desempeño sísmico y reproducción exacta de las condiciones de carga lateral.

- Larga duración de la prueba permite una observación detallada de la respuesta del modelo experimental.

6.1.3. Mesa sísmica

- Requiere de grandes costos de construcción y mantenimiento.
- Las dimensiones físicas del modelo experimental son limitadas, dependiendo de la magnitud de los equipos.
- Equipo totalmente adecuado para la evaluación del desempeño sísmico y la reproducción exacta de las condiciones de carga.

6.2. Acerca del equipo sugerido para el medio guatemalteco

Tomando en cuenta los costos de adquisición y mantenimiento de los equipos y los recursos humanos y presupuesto necesarios para la operación y mantenimiento de los mismos, se considera que para el caso de Guatemala y específicamente para la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, la opción de actualización del marco de carga es la más viable y adecuada para el medio. Se considera que la segunda opción alternativa, dependiendo de los recursos disponibles, es el muro de reacción.

La opción de mesa sísmica, a pesar de ser la opción que más se acerca a la simulación de las condiciones reales y que cuenta con los equipos de registro de deformaciones y desplazamientos ante cargas controladas, se considera a largo plazo para Guatemala; a menos que se contara con una asociación que involucrara a las universidades del país que imparten la carrera de ingeniería civil, los colegios de Ingenieros y Arquitectos de Guatemala, la Cámara de la

Construcción, algunas empresas del sector productivo interesadas y con el apoyo de la Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología.

CONCLUSIONES

1. La obtención de la información en internet y las visitas a las diferentes universidades de Guatemala permitieron conocer los equipos y caracterizar el procedimiento para el ensayo de estructuras bajo carga lateral con gatos hidráulicos de una sola acción y de doble acción, utilizando el marco de carga.
2. La obtención de la información en internet permitió conocer los equipos y caracterizar el procedimiento para el ensayo cuasi dinámico de estructuras utilizando el muro de reacción.
3. La obtención de la información en internet y las visitas realizadas permitieron conocer los equipos y caracterizar el procedimiento para el ensayo dinámico de estructuras utilizando la mesa sísmica.
4. Tomando en cuenta los costos de adquisición y mantenimiento de los equipos y los recursos humanos y presupuesto necesarios para la operación y mantenimiento de los mismos, se considera que para el caso de Guatemala y específicamente para la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, la opción de actualización del marco de carga es la más viable y adecuada, de acuerdo a las condiciones del medio. Las otras opciones podrían considerarse, de acuerdo a lo indicado en el numeral 6.2. de la discusión de resultados.

RECOMENDACIONES

1. A los estudiantes de la Facultad de Ingeniería, que se interesen en conocer los sistemas y ensayos de aplicación de carga lateral que existen para evaluar el comportamiento de elementos y estructuras bajo cargas dinámicas. Como mínimo se recomienda conocer los equipos actuales y su funcionamiento.
2. Actualizar el equipo del marco de carga del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Facultad de Ingeniería, con todos los avances tecnológicos actuales, ya que es fundamental en la docencia, investigación y extensión, en pro del avance tecnológico de estructuras en el país.
3. Continuar las investigaciones para tener información específica de los beneficios de contar con un equipo de ensayo estructural dinámico y el desarrollo que puede ofrecer a las mejoras de tecnología y normas estructurales del país.
4. Comunicarse de forma constante con laboratorios de estructuras y el intercambio de información y experiencias de ensayos estructurales con todos los países interesados en la mejora del desarrollo de la infraestructura ante eventos catastróficos como los sismos.

BIBLIOGRAFÍA

1. BOWIE, Robert. *Laboratorio de investigación de ingeniería civil a gran escala*. [en línea]. <<https://engineering.purdue.edu>>. [Consulta: 1 de febrero de 2019].
2. CASTRO, Francisco. *Métodos numéricos para cálculo y Diseño en Ingeniería*. [en línea]. <<https://dialnet.unirioja.es>>. [Consulta: 10 de abril de 2019].
3. CORAL, Horacio. *Diseño, construcción y control de un simulador sísmico uniaxial tele operable*. [en línea]. <<http://www.redalyc.org>>. [Consulta: 30 de octubre de 2019].
4. OKAMOTO, Satoshi. *Técnicas para pruebas a gran escala*. [en línea]. <<https://www.kenken.go.jp>>. [Consulta: 27 de enero de 2020].
5. SALAZAR, Jennifer. *Cálculo y diseño de cimentaciones para equipos y maquinaria vibratorias*. [en línea]. <<https://repositorio.espe.edu.ec>>. [Consulta: 31 de mayo de 2020].
6. YABUUCHI, Koichi. *Conferencia mundial sobre ingeniería sísmica*. [en línea]. <<https://www.iitk.ac.in>>. [Consulta: 19 de agosto de 2020].

