



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS

**OBTENCIÓN DE PARÁMETROS PARA LA GENERACIÓN DE UN MODELO NO-LINEAL
(IMK) PARA LA SIMULACIÓN DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
VASECA SÁNCHEZ HÉCTOR MANUEL

TUTOR:
DR. JUAN JOSÉ PÉREZ GAVILÁN ESCALANTE
INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. ENERO 2020

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Escobar Sánchez José Alberto

Secretario: Dr. López Bátiz Oscar Alberto

Vocal: Dr. Pérez Gavilán Escalante Juan José

1^{er}. Suplente: M. I. Flores Corona Leonardo Emmanuel

2^d o. Suplente: Dr. Guerrero Bobadilla Héctor

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

TUTOR DE TESIS:

DR. JUAN JOSÉ PÉREZ GAVILÁN ESCALANATE

FIRMA

DEDICATORIAS

A Dios

A mi Papá y mi mamá por todo el apoyo, cariño y amor por ser mi ejemplo de seguir adelante.

A mis hermanas Ariadna y Miriam por su apoyo, compañía y cariño.

A Elvis por su gran amistad y cariño.

A mis sobrinos Samuel y Maximiliano por su cariño, ser las personas que me inspiran a seguir adelante.

A mi familia y amigos que me ha apoyado durante la realización de estudios de maestría.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y al Instituto de Ingeniería por contribuir a mi formación personal, académica y profesional.

A CONACYT por el apoyo económico durante la realización de mis estudios de maestría.

Al Instituto de Ingeniería y al Centro Nacional de Prevención de desastres (CENAPRED) por las facilidades de utilizar las instalaciones y equipo de laboratorio para la elaboración de los muritos.

Al Dr. Juan Jose Perez Gavilán Escalante por su valioso apoyo, asesoramiento durante la realización del proyecto, así mismo su amable atención.

A los miembros del jurado: Dr. José Alberto Escobar Sánchez, Dr. Oscar López Batíz, M. I. Leonardo Flores Corona y Dr. Héctor Guerrero Bobadilla por su disponibilidad y revisar mi tesis.

Al M.I. Leonardo Flores Corona por su valiosa ayuda durante la construcción de los muritos e interpretación de los resultados.

Al M. I. Roberto Durán Hernández por operar la mesa vibradora durante los ensayos dinámicos y por sus recomendaciones para la elaboración de los especímenes ensayados dinámicamente.

A los trabajadores Benito Rangel, Marco Carreón y Salomón Trinidad por su apoyo que me brindaron durante la etapa de construcción y ensayos de los muritos

Al estudiante de servicio social Ricardo Patiño Carmona por su apoyo durante la etapa de ensaye de los muritos

A Ana Issa Cruz Olayo y Rafael Ruiz Soberanes por su compañerismo y su valiosa amistad y el tiempo que pasamos juntos en el cubículo.

Al M. I. Julio Ernesto Lira por darme la oportunidad de desarrollarme en este mundo de las estructuras y su apoyo durante la realización de mis estudios de maestría.

A mis compañeros del posgrado pasamos momentos muy agradables Luz Elena, Héctor, Saúl, Adán y Rafael

Mis más sinceros agradecimientos.

RESUMEN

En este estudio se obtuvieron los parámetros para la simulación numérica del comportamiento de muros de mampostería usando el modelo con degradación histerética propuesto por Ibarra Medina Krawinkler (IMK) (Ibarra L. F., Krawinkler H., 2003).

Para tal efecto se realizó un programa experimental que consistió en el ensaye de 6 muros de mampostería confinada cuadrados a escala reducida 1:2. Todos los muros tuvieron las mismas dimensiones. Se llevaron a cabo dos series de muros con tres muros en cada serie, una serie sin refuerzo horizontal (MSR) y otra con refuerzo (MCR) horizontal ($p_{hf_{yh}} = 6 \text{ kg/cm}^2$). En cada serie se ensayó un muro de forma dinámica (D), uno en forma cuasi-estática (E) y el tercero en forma monotónica (M). Los ensayos dinámicos se llevaron a cabo en la mesa vibradora del Instituto de Ingeniería, y los ensayos estáticos en el laboratorio de estructuras y materiales del Instituto de Ingeniería.

De los ensayos monotónicos se obtuvo la curva sin degradación histerética (backbone curve) una característica básica para el modelo IMK (Ibarra Medina Krawinkler). De los ensayos cuasi-estáticos y dinámicos se obtuvo la curva de histéresis de los especímenes de los muros con y sin refuerzo. Los datos experimentales resultantes se utilizaron para la obtención de los parámetros que se requieren para el modelo numérico no-lineal: λ_s que determina la degradación de resistencia, λ_c para la degradación post-pico, λ_k que determina la degradación de rigidez y λ_a que determina la degradación de rigidez de recarga acelerada.

El modelo numérico no-lineal debe predecir el desempeño de los muros a una acción sísmica cualquiera. La degradación histerética se logra utilizando un factor que depende de la energía disipada durante la respuesta ante la acción sísmica.

Los parámetros se obtuvieron con la ayuda del programa OpenSees. Se utilizó como medida de ajuste la suma del cuadrado de las diferencias de las ordenadas de la curva histerética experimental y la obtenida numéricamente. Los parámetros se obtuvieron también para otros muros que se utilizarán para la simulación numérica de dos modelos de estructuras de mampostería confinada ensayadas previamente en la mesa vibradora del Instituto de Ingeniería de la UNAM utilizando el modelo no-lineal IMK utilizando el sistema OpenSees el cual tiene implementado el modelo; el modelo debe predecir el desempeño de una estructura de mampostería sometida a una acción sísmica.

Contenido

| | |
|--|----|
| RESUMEN | 1 |
| LISTADO DE FIGURAS | 5 |
| LISTADO DE TABLAS | 7 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 8 |
| 1.1 OBJETIVOS | 9 |
| 2. ANTECEDENTES | 10 |
| 2.1 Modelo elasto-plástico..... | 10 |
| 2.2 Modelo bilineal | 11 |
| 2.3 Modelo de Clough | 12 |
| 2.4 Modelo de Takeda..... | 12 |
| 2.5 Modelo Ibarra-Medina-Krawinkler (IMK)..... | 13 |
| 2.6 Descripción de los modelos histeréticos con la degradación cíclica..... | 14 |
| 2.6.1 Curva principal monotónica (Backbone curve) | 14 |
| 2.6.2 Modelo bilineal con límite de resistencia | 15 |
| 2.6.3 Modelo de pico orientado..... | 15 |
| 2.6.4 Modelo de estrechamiento (pinching model) | 16 |
| 2.6.5 Fuerza cíclica y deterioro de la rigidez basado en la energía disipada | 17 |
| 2.6.6 Deterioro de la fuerza básica | 17 |
| 2.6.7 Deterioro de la fuerza resistente post-pico | 19 |
| 2.6.8 Deterioro de la rigidez de descarga..... | 20 |
| 2.6.9 Deterioro acelerado de la rigidez de recarga..... | 21 |
| 2.6.10 Modificación del modelo Ibarra Krawinkler..... | 22 |
| 3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN | 24 |
| 3.1 Programa experimental..... | 24 |
| 3.1.1 Descripción de los especímenes..... | 24 |
| 3.2 Marcos de carga | 27 |
| 3.3 Escalamiento de los materiales..... | 29 |
| 3.3.1 Piezas de mampostería | 30 |
| 3.3.2 Agregados..... | 30 |
| 3.3.3 Acero de refuerzo..... | 30 |
| 3.4 Armados | 32 |
| 3.5 Pruebas de materiales..... | 33 |
| 3.6 Construcción de los especímenes | 33 |
| 3.7 Instrumentación | 34 |
| 3.7.1 Instrumentación interna | 35 |
| 3.7.2 Instrumentación externa..... | 36 |
| 3.8 Calibración de la mesa vibradora | 38 |
| 3.9 Historia de carga de ensayos dinámicos y cuasi-estáticos | 39 |
| 3.10 Adquisición de datos | 40 |
| 3.11 Restricción del movimiento fuera del plano | 40 |
| 4. CÁLCULO DE RESISTENCIA Y RIGIDEZ | 42 |
| 4.1 Resistencia a carga vertical | 42 |
| 4.2 Resistencia a flexocompresión en el plano del muro..... | 42 |
| 4.3 Resistencia a carga lateral | 43 |
| 4.3.1 Fuerza cortante resistida por la mampostería | 43 |
| 4.3.2 Fuerza cortante resistida por el acero de refuerzo horizontal..... | 43 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.4 | Rigidez del muro..... | 44 |
| 5. | COMPORTAMIENTO GENERAL DE LOS ESPECÍMENES | 46 |
| 5.1 | Introducción | 46 |
| 5.2 | Procesamiento de señales..... | 46 |
| 5.3 | Fuerza lateral efectiva..... | 47 |
| 5.4 | Modelo MSR-D | 48 |
| 5.4.1 | Evaluación de daño y falla..... | 48 |
| 5.4.2 | Comportamiento histerético..... | 51 |
| 5.5 | Modelo MSR-E..... | 51 |
| 5.5.1 | Evaluación de daño y falla..... | 51 |
| 5.5.2 | Comportamiento histerético..... | 53 |
| 5.6 | Modelo MSR-M | 53 |
| 5.6.1 | Evaluación de daño y falla..... | 53 |
| 5.6.2 | Comportamiento monotónico | 54 |
| 5.7 | Modelo MCR-D..... | 55 |
| 5.7.1 | Evaluación de daño y falla..... | 55 |
| 5.7.2 | Comportamiento histerético..... | 57 |
| 5.8 | Modelo MCR-E | 58 |
| 5.8.1 | Evaluación de daño y falla..... | 58 |
| 5.8.2 | Comportamiento histerético..... | 59 |
| 5.9 | Modelo MCR-M..... | 60 |
| 5.9.1 | Evaluación de daño y falla..... | 60 |
| 5.9.2 | Comportamiento monotónico | 61 |
| 6. | OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA EL MODELO IMK..... | 62 |
| 6.1 | Introducción | 62 |
| 6.2 | Curva principal (Backbone curve) | 62 |
| 6.2.1 | Modificación de la curva principal | 64 |
| 6.3 | Muro MSR-D IMK | 64 |
| 6.3.1 | Parámetros de la curva principal (Backbone) | 64 |
| 6.3.1 | Modelo histerético IMK MSR-D..... | 64 |
| 6.3.2 | Energía disipada acumulada del muro MSR-D..... | 66 |
| 6.4 | Muro MSR-E IMK..... | 66 |
| 6.4.1 | Parámetros de la curva principal..... | 66 |
| 6.4.2 | Modelo histerético IMK MSR-E | 67 |
| 6.4.3 | Energía disipada acumulada del muro MSR-E..... | 68 |
| 6.5 | Muro MCR-D IMK | 68 |
| 6.5.1 | Parámetros de la curva principal..... | 69 |
| 6.5.2 | Modelo histerético IMK..... | 69 |
| 6.5.3 | Energía disipada acumulada muro MCR-D..... | 70 |
| 6.6 | Muro MCR-E IMK..... | 70 |
| 6.6.1 | Parámetros de la curva principal..... | 71 |
| 6.6.2 | Modelo histerético IMK..... | 71 |
| 6.6.3 | Energía disipada acumulada del muro MCR-E | 72 |
| 6.7 | Resumen de los parámetros obtenidos para el modelo IMK..... | 72 |
| 7. | CONCLUSIONES | 74 |
| 7.1 | RESUMEN | 74 |
| 7.2 | CONCLUSIONES | 74 |
| 8. | BIBLIOGRAFÍA..... | 76 |

| | |
|---|----|
| APENDICE A. RESULTADOS DE LOS ENSAYES DE MATERIALES | 78 |
| A.1 Compresión de cilindros de concreto | 78 |
| A.2 Compresión en pilas de mampostería | 81 |
| A.3 Compresión diagonal en muretes | 82 |
| A.4 Compresión de piezas de mampostería..... | 84 |
| A.5 Compresión en cubos de mortero | 85 |
| APÉNDICE B. MODELOS IMK EN OPENSEES (EJEMPLO) | 87 |
| APÉNDICE C. MODELO DE HISTÉRESIS DE TAKEDA | 89 |
| APENDICE D. DESFASE DE LAS SEÑALES DE LOS ENSAYES DINÁMICOS | 91 |

LISTADO DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 Modelo elasto-plástico..... | 11 |
| Figura 2.2 Modelo bilineal..... | 11 |
| Figura 2.3 Modelo de Clough | 12 |
| Figura 2.4 Modelo de Takeda (Takeda T., Sozen M. A, Nielsen N. N., 1970) | 13 |
| Figura 2.5 Ejemplo de modelo IMK en estructuras de mampostería | 13 |
| Figura 2.6 Curva principal (Backbone curve)..... | 14 |
| Figura 2.7 Modelo hysterético Bilineal con límite de resistencia | 15 |
| Figura 2.8 Modelo hysterético pico orientado; (a) Reglas básicas del modelo, (b) Modificación Mahin y Bertero | 16 |
| Figura 2.9 Modelo hysterético de estrechamiento: (a) reglas básicas del modelo y (b) modificación de la recarga de la deformación es a la derecha del punto de ruptura | 16 |
| Figura 2.10 Modelo de Pico orientado deterioro de la fuerza básica (Ibarra y otros, 2005)..... | 18 |
| Figura 2.11 Modelo de Pico orientado con degradación de resistencia usando el modelo IMK..... | 19 |
| Figura 2.12 Modelo de Pico orientado, deterioro de la fuerza por endurecimiento por deformación (Ibarra y otros, 2005)..... | 20 |
| Figura 2.13 Modelo de Pico orientado, deterioro de la rigidez de descarga (Ibarra y otros, 2005).... | 21 |
| Figura 2.14 Modelo de Pico orientado, deterioro de la rigidez de recarga acelerado (Ibarra y otros, 2005) | 22 |
| Figura 3.1 Armados de los especímenes. | 25 |
| Figura 3.2 Modelo de muro con y sin refuerzo horizontal (MCR y MSR). Dinámico..... | 25 |
| Figura 3.3 Modelo de muro con y sin refuerzo horizontal (MCR y MSR). Estáticos | 26 |
| Figura 3.4 Marco de carga inercial Mesa Vibradora Instituto de Ingeniería, UNAM..... | 26 |
| Figura 3.5 Sistema de deslizamiento de la masa adicional (Carrillo, 2010) | 27 |
| Figura 3.6 Dispositivo para ensayos de modelos dinámicos MCR y MSR; Mesa Vibradora II-UNAM.. | 27 |
| Figura 3.7 Marco de carga ensaye tipo dinámico | 28 |
| Figura 3.8 Dispositivo para ensaye pseudo-estático de modelos MCR y MSR; Laboratorio Instituto de Ingeniería, UNAM..... | 29 |
| Figura 3.9 Marco de carga para los ensayos pseudo-estáticos..... | 29 |
| Figura 3.10 secuencia de corte para piezas del modelo | 30 |
| Figura 3.11 Gráfica esfuerzo-deformación de un alambón no. 2 estirado en el laboratorio. | 31 |
| Figura 3.12 Dispositivo de carga para estirar los alambres no. 2 (1/4") | 32 |
| Figura 3.13 Alargamiento de alambres no. 2 (1/4") alambón | 32 |
| Figura 3.14 Construcción de especímenes estáticos y dinámicos | 34 |
| Figura 3.15 Ubicación de deformímetros (instrumentación interna) | 35 |
| Figura 3.16 Instrumentación interna (castillo y refuerzo horizontal). | 35 |
| Figura 3.17 Arreglo para los ensayos dinámicos. Se muestra la instrumentación externa | 36 |
| Figura 3.18 Instrumentación externa. Ensaye dinámico..... | 37 |
| Figura 3.19 Arreglo para los ensayos pseudo-estáticos. (se muestra la instrumentación externa) | 37 |
| Figura 3.20 Instrumentación externa. Ensaye pseudo-estático..... | 38 |
| Figura 3.21 Masas para calibrar la mesa vibradora | 38 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.22 Comparativa de señales de entrada y salida de la mesa vibradora | 39 |
| Figura 3.23 Historia de carga, ensaye cuasi-estático (NTCM, 20017) | 40 |
| Figura 3.24 Sistema de restricción de desplazamiento fuera del plano a) ensayes dinámicos, b) ensayes estáticos | 41 |
| Figura 5.1 Comparativa de señal de aceleración MSR-D M5 | 46 |
| Figura 5.2 Comparación de señales filtradas y no filtradas | 47 |
| Figura 5.3 Fotografías del estado de daño muro MSR-D | 50 |
| Figura 5.4 Curva de histéresis muro MSR-D..... | 51 |
| Figura 5.5 Fotografías del estado de daño muro MSR-E..... | 53 |
| Figura 5.6 Curva de histéresis muro MSR-E | 53 |
| Figura 5.7 Fotografías del estado de daño muro MSR-M | 54 |
| Figura 5.8 Curva monotónica muro MSR-M..... | 55 |
| Figura 5.9 Fotografías del daño del muro MCR-D..... | 57 |
| Figura 5.10 Curva de histéresis muro MCR-D | 58 |
| Figura 5.11 Curva de histéresis del muro MCR-E (MEsc-1 (Flores y Guzman, 2015))...... | 59 |
| Figura 5.12 Fotografías del estado de daño muro MCR-M | 61 |
| Figura 5.13 Curva monotónica muro MCR-D | 61 |
| Figura 6.1 Envolvente simplificada y curva principal | 63 |
| Figura 6.2 Curva envolvente y cíclica (Deierlein, 2010). | 64 |
| Figura 6.3 Comparativa de respuesta histerética experimental y simulación muro MSR-D | 65 |
| Figura 6.4 Comparativa de ciclos histeréticos muro MSR-D | 65 |
| Figura 6.5 Energía disipada acumulada, curva experimental y analítica IMK muro MSR-D | 66 |
| Figura 6.6 Comparativa de respuesta histerética experimental y simulación muro MSR-E..... | 67 |
| Figura 6.7 Comparativa de ciclos histeréticos muro MSR-E..... | 68 |
| Figura 6.8 Energía disipada acumulada curva experimental y analítica IMK muro MSR-E..... | 68 |
| Figura 6.9 Comparativa de respuesta histerética experimental y simulación, muro MCR-D | 69 |
| Figura 6.10 Comparativa de ciclos histeréticos muro MCR-D | 70 |
| Figura 6.11 Energía disipada acumulada curva experimental y analítica muro MCR-D | 70 |
| Figura 6.12 Comparativa de respuesta histerética experimental y simulación muro MCR-E..... | 71 |
| Figura 6.13 Comparativa de ciclos histeréticos muro MCR-E | 72 |
| Figura 6.14 Energía disipada acumulada curva experimental y analítica muro MCR-E..... | 72 |
| Figura 7.1 Modelo ensayado previamente en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Flores y otros 2016) | 75 |
| Figura B.0.1 Modelo de histéresis IMK de pico orientado | 88 |
| Figura C.0.1 Modelo histerético de Takeda | 90 |
| Figura D.0.1 Desfase entre señal celda de carga y acelerómetro | 91 |
| Figura D.0.2 Alineado de señal celda de carga y acelerómetro | 92 |
| Figura D.0.3 Alineado de señales con DEGTRA | 92 |

LISTADO DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 3-1 Especímenes de prueba y tipo de ensaye | 24 |
| Tabla 3-2 Valores promedios de los materiales de construcción de los especímenes | 33 |
| Tabla 5-1 Parámetros del filtrado de las señales | 46 |
| Tabla 5-2 Pesos del sistema | 48 |
| Tabla 5-3 Registros de movimientos muro MSR-D | 49 |
| Tabla 5-4 Registros de movimientos muro MCR-D | 56 |
| Tabla 6-1 Parámetros de modificación de envolvente trilineal | 63 |
| Tabla 6-2 Parámetros del muro MSR-D para modelo IMK..... | 64 |
| Tabla 6-3 Parámetros del muro MSR-E para modelo IMK | 66 |
| Tabla 6-4 Parámetros del muro MCR-D para modelo IMK | 69 |
| Tabla 6-5 Parámetros del muro MCR-E para modelo IMK..... | 71 |
| Tabla 6-6 Resumen de los parámetros del modelo histerético de pico orientado IMK | 72 |
| Tabla A.0-1 Resultados ensaye cilindros de concreto | 79 |
| Tabla A.0-2 Resultados ensaye pilas a compresión | 82 |
| Tabla A.0-3 Resultados ensaye muretes a compresión diagonal..... | 83 |
| Tabla A.0-4 Resultados ensaye piezas de mampostería a compresión | 84 |
| Tabla A.0-5 Resultados ensaye cubos de mortero a compresión diagonal | 86 |

1. INTRODUCCIÓN

Para comprender el comportamiento de estructuras de mampostería en el rango inelástico, se deben realizar ensayos de estructuras de manera dinámica teniéndose que llevarse a cabo en mesa vibradora. Sin embargo, debido al tiempo y el costo de estos ensayos, y de las dimensiones de la mesa vibradora en México los modelos que pueden estudiarse son de configuraciones y dimensiones muy limitadas. Con los modelos numéricos dichas limitaciones no desaparecen por completo, pero permiten el estudio de un muy amplio espectro de estructuras. Este tipo de simulación numérica ya tiene un gran desarrollo en el estudio de estructuras de acero, sin embargo, es necesario todavía avanzar tanto en la generación de información necesaria para poder utilizar los modelos numéricos que ya existen, así como generar nuevos modelos que nos permitan simular el comportamiento de las estructuras de mampostería ante la acción de un sismo.

Existen en la literatura reconocidos modelos numéricos para caracterizar el comportamiento no-lineal de las estructuras. Uno de esos modelos fue desarrollado por Ibarra Medina Krawinkler o IMK usando las iniciales de los nombres de sus autores. Este modelo tiene la capacidad de representar fenómenos que describen el comportamiento de elementos estructurales durante la acción sísmica; como el comportamiento de muros de mampostería confinada.

Entre estos fenómenos se encuentra la degradación de la rigidez lateral del muro, la degradación de la resistencia y la carga después de la máxima (“post capping strength”), así como la rigidez de descarga. El modelo IMK incorpora la degradación histerética de modelos conocidos como el de pico orientado (Mahin y Bertero) y el modelo de estrechamiento (“pinching”). La degradación histerética se logra utilizando un factor que depende de la energía disipada durante la respuesta ante la acción sísmica.

El modelo histerético IMK ha sido calibrado con datos obtenidos de forma experimental para elementos de acero, concreto reforzado y madera; recientemente (Maganti, 2014) realizó la calibración del modelo histerético IMK con estrechamiento “pinching” de paneles de yeso reforzados con fibra de vidrio.

Una característica básica del modelo es que requiere de la definición de una curva de comportamiento sin degradación histerética (“backbone curve”), esta curva se obtiene mediante la aplicación monotónica de la carga hasta la falla.

1.1 OBJETIVOS

- Obtener la curva de resistencia monotónica de los muros de mampostería confinada con y sin refuerzo horizontal.
- Obtener la curva histerética estática y dinámica de los muros de mampostería confinada con y sin refuerzo horizontal.
- Estimar los parámetros requeridos para utilizar un modelo “Ibarra-Medina-Krawinkler” (IMK) para simular el comportamiento no lineal de muros de mampostería, mediante un proceso de regresión no-lineal.
- Comparar el modelo histerético usando IMK y los parámetros calculados con los obtenidos experimentalmente.

2. ANTECEDENTES

El formato de degradación histerética utilizado por el modelo IMK tiene la característica de que puede utilizarse para simular el comportamiento a flexión, cortante o cualquier otra respuesta de un elemento estructural. Los autores del modelo y otros investigadores han calibrado estos modelos principalmente para elementos de acero con distintas secciones transversales. La calibración se realizó con base en una muy extensa campaña experimental de elementos sometidos a flexión y carga axial. Gracias a estos modelos es posible predecir el comportamiento de estructuras de acero sometidas a la acción sísmica hasta llevarlas cerca del colapso.

Durante los últimos años se han desarrollado un número considerable de modelos que representan el comportamiento histerético de los elementos cuando se ven sometidos a cargas reversibles. Los modelos han ido evolucionados, para parecerse más a la respuesta cíclica real de los elementos.

Se ha observado una gran cantidad de variables que influyen en el comportamiento histerético como los que se enuncian a continuación:

- Forma de la sección transversal,
- Cuantía de acero de refuerzo,
- Calidad del anclaje,
- Calidad de los materiales y la adherencia entre ellos,
- La magnitud de las cargas actuantes.

Es necesario tener en cuenta la variación de los siguientes parámetros:

- La rigidez en las ramas de carga y descarga, ya que es un parámetro determinante en la magnitud de la deformación producida por los ciclos reversibles de carga.
- El ancho de los ciclos de histéresis, incluyendo el efecto de estrechamiento, que determina la cantidad de energía disipada en los ciclos de carga.
- La disminución de la resistencia de los ciclos de histéresis, en comparación a la resistencia obtenida a partir de carga monotónica, la cual determina la estabilidad de la respuesta.

A continuación, se describen algunos modelos utilizados en el análisis no-lineal.

2.1 Modelo elasto-plástico

El primer modelo (figura 2.1) inelástico desarrollado e implementado, por su sencillez, utiliza la teoría clásica de la plasticidad. El modelo tiene limitaciones como el no poder representar el endurecimiento del material, la pérdida de rigidez del elemento y la máxima deformación límite que puede sufrir el material (Picón, 2003)

El modelo elasto-plástico es un caso particular de los modelos bilineales, en el cual no se considera el endurecimiento por deformación, razón por la que se observa que la curva post-fluencia tiene pendiente nula (recta BC). Las rigideces de las ramas de descarga y recarga son paralelas a la rama elástica de carga inicial (recta AB). Este modelo no contempla el deterioro de la rigidez y resistencia;

los lazos de histéresis de este modelo son muy anchos y sobreestiman la cantidad de energía disipada del elemento.

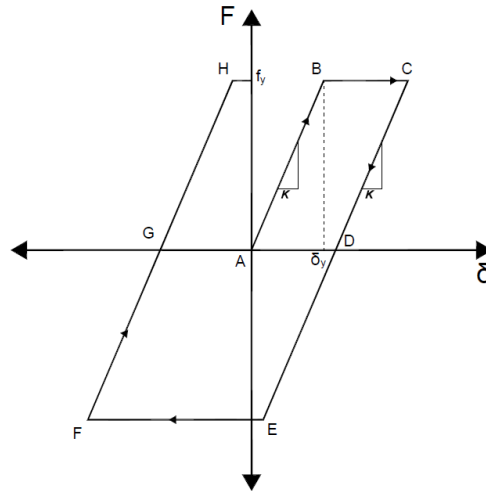


Figura 2.1 Modelo elasto-plástico

2.2 Modelo bilineal

El modelo bilineal es un modelo similar al elasto-plástico, excepto que al tomar en cuenta el efecto de endurecimiento por deformación, se acerca más a la realidad que el elasto-plástico. Para este modelo se define una pendiente positiva después de alcanzar la fluencia, mientras que en el elasto-plástico dicha pendiente es nula.

El inconveniente es no incluir la degradación de rigidez durante la descarga después de sobrepasar la fluencia del material y durante las cargas reversibles.

El modelo bilineal simula el comportamiento del material describiendo una línea recta con pendiente positiva, k , hasta que se alcanza el límite elástico (recta AB), y una vez lograda la fluencia, se comporta como una línea recta con pendiente positiva (rama de endurecimiento, recta BC) normalmente mucho menor que k , hasta que se inicia la descarga. Este modelo no considera la pérdida de rigidez.

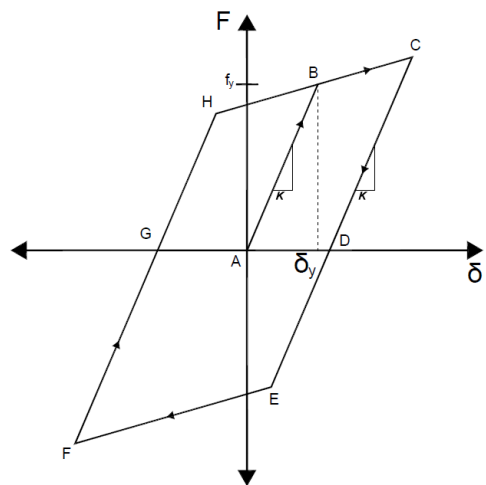


Figura 2.2 Modelo bilineal

2.3 Modelo de Clough

El modelo propuesto por Clough y Johnston (figura 2.3) es una variante del modelo elasto-plástico, el cual introduce el efecto de la degradación de rigidez durante las cargas reversibles.

Durante la carga la respuesta sigue la curva elasto-plástica con endurecimiento (del punto 1 al 3). La rigidez de descarga después de la fluencia se mantiene igual a la rigidez elástica inicial (del punto 3 al 4). Durante la recarga la respuesta sigue una trayectoria hacia el punto de fluencia en el sentido negativo (del punto 4 al 5) o bien al punto de deformación máxima del semiciclo anterior (del punto 7 hacia el 3 o del punto 9 al 3).

En el modelo de Clough modificado por Mahin y Bertero en la recarga, si la pendiente de 9 a 8 es mayor que de 9 a 3, se va orientada hacia el punto 8.

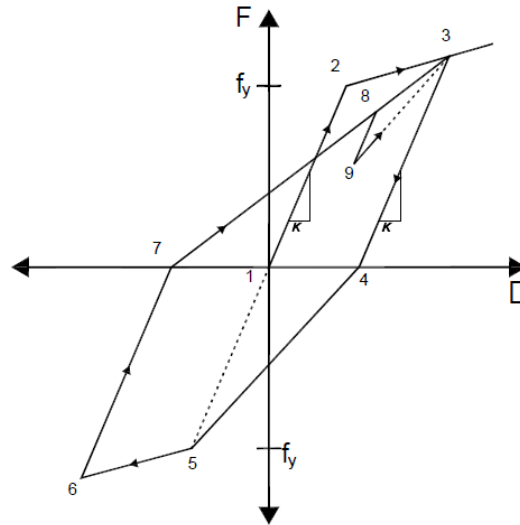


Figura 2.3 Modelo de Clough

2.4 Modelo de Takeda

Un modelo histerético más refinado y sofisticado, fue desarrollado con base en observaciones hechas de muchos ensayos experimentales en elementos de concreto (Takeda, 1970). Este modelo incluye tanto los cambios de rigidez debidos al agrietamiento por flexión como los debidos a la fluencia considerando el endurecimiento por deformación. La degradación de la rigidez de descarga se controla por una función exponencial de la deformación máxima anterior (figura 2.4)

El modelo consiste en una curva envolvente trilineal bajo curvas monótonicas, una para cada sentido de carga, con cambios de pendiente en los puntos de agrietamiento (1, 1') y de fluencia (2 y 6). La rama de descarga (tramo 3-4) a partir de la rama post-fluencia, tienen una pendiente K_x , similar a la recta que conecta el punto de fluencia con el punto de agrietamiento en la dirección opuesta K_y (tramo 2-1'), multiplicada por $(D_y/D)^{0.4}$ en el cual D es la curvatura máxima en la dirección de carga. La recarga se dirige hacia el punto de deformación máxima previa (3) o al punto de fluencia (5).

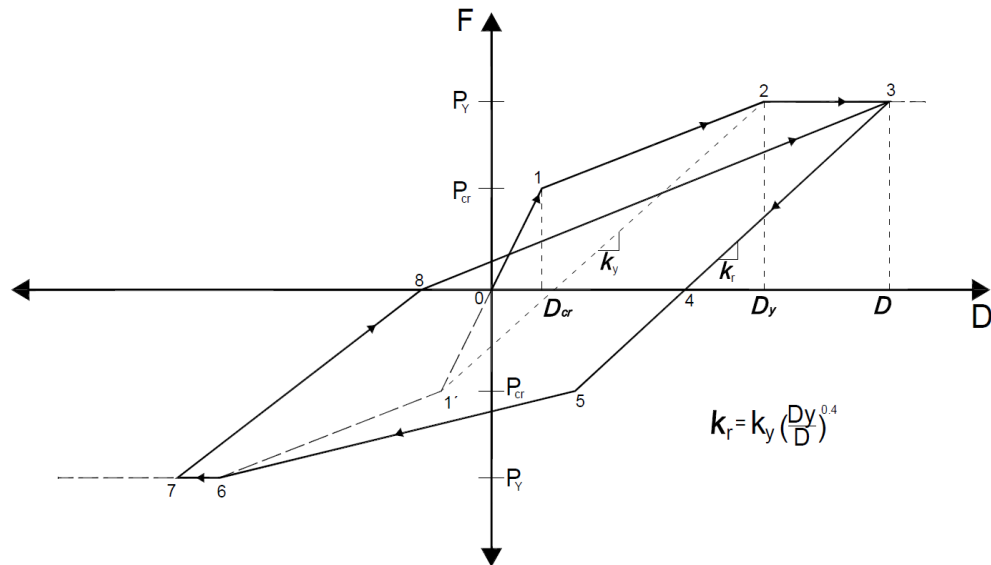


Figura 2.4 Modelo de Takeda (Takeda T., Sozen M. A, Nielsen N. N., 1970)

2.5 Modelo Ibarra-Medina-Krawinkler (IMK)

Los modelos anteriores no tienen degradación histerética, eso significa que para nuevas incursiones de deformaciones siempre se usa la misma envolvente de resistencia, independientemente del número de ciclos ocurridos antes de llegar a la nueva deformación.

Este modelo representa fenómenos que describen el comportamiento de elementos estructurales durante la acción sísmica:

- Incluye la degradación de la rigidez lateral.
- La degradación de la resistencia y resistencia después de la máxima (“post capping strength”).
- La degradación de la rigidez de descarga.

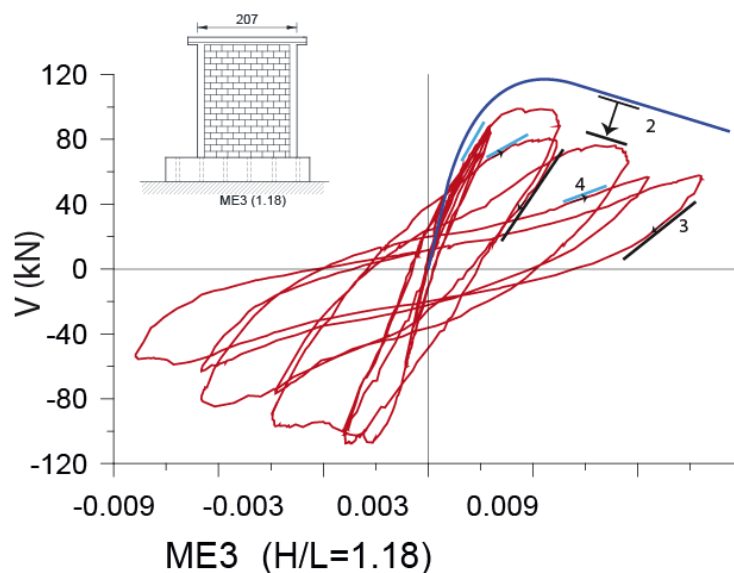


Figura 2.5 Ejemplo de modelo IMK en estructuras de mampostería

El modelo IMK incorpora la degradación histerética a los modelos conocidos en la evaluación sísmica, bilineal, pico orientado, pinching (estrechamiento). El modelo incorpora un parámetro de deterioro basado en la energía disipada que controla los distintos modos cíclicos de deterioro.

2.6 Descripción de los modelos histeréticos con la degradación cíclica

2.6.1 Curva principal monotónica (Backbone curve)

La curva principal describe la respuesta ante una acción ascendente monotónica (Figura 2.6). Si no hay deterioro, la curva principal está definida por tres parámetros: la rigidez elástica (inicial) K_e , la fuerza de fluencia F_y y la rigidez por endurecimiento por deformación $K_s = \alpha_s K_e$. Si el deterioro de la curva principal es incluido, una rama con pendiente negativa comienza en la deformación δ_c , que corresponde la resistencia o fuerza máxima F_c , de la curva carga-deformación.

Si δ_c es normalizada por la deformación de fluencia, la razón resultante puede notarse como la capacidad de ductilidad (δ_c/δ_y). La rama descendente es definida por la rigidez de ablandamiento, $K_c = \alpha_c K_e$, la cual tiene un valor negativo. Además, dependiendo del tipo de problema puede incluirse una fuerza residual $F_r = \lambda F_y$, la cual representa la fracción de la fuerza de fluencia del componente que es preservado una vez que se alcanza la deformación de falla δ_r .

Los parámetros α_s , δ_c/δ_y α_c y λ son obtenidos ya sea de predicciones analíticas o por la calibración de modelos histeréticos con datos carga-deformación obtenidos experimentalmente.

El modelo histerético permite que estos parámetros tengan diferentes valores en las direcciones positiva y negativa de δ .

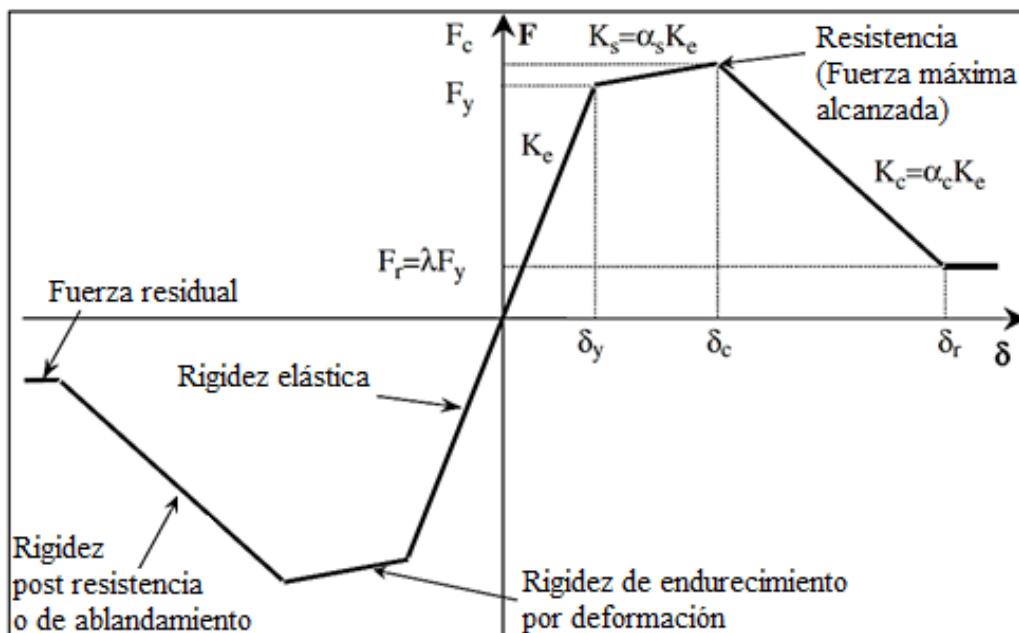


Figura 2.6 Curva principal (Backbone curve)

2.6.2 Modelo bilineal con límite de resistencia

Este modelo se basa en las reglas histeréticas bilineales estándar con endurecimiento por deformación cinemática. Estas reglas básicas son preservadas una vez incluidas las ramas de fuerza residual y de endurecimiento por deformación. Sin embargo, es necesario introducir “el límite de resistencia” mostrado en la figura 2.7, cuando la curva principal incluye una línea con pendiente negativa. De acuerdo con las reglas cinemáticas, los segmentos de carga que comienzan en el punto 5 deben de continuar orientados hacia el punto 6'. Sin embargo, este segmento de carga finaliza cuando se cruza el “límite de resistencia en el punto 6”. Este límite corresponde a la fuerza en el punto 3, la cual es la fuerza más pequeña en el rango no lineal de la curva principal de los ciclos anteriores. Si esta condición no fuera establecida, la fuerza en el trayecto de la carga se incrementaría en las etapas posteriores de deterioro.

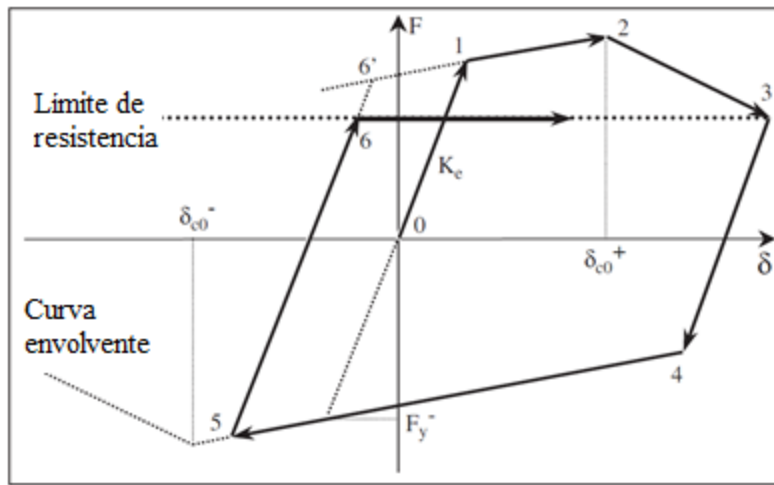


Figura 2.7 Modelo histerético Bilineal con límite de resistencia

2.6.3 Modelo de pico orientado

Este modelo mantiene las reglas básicas de histéresis propuestas por Clough y Johnston, modificado más tarde por Mahin y Bertero, pero la curva principal es modificada para incluir la fuerza máxima y la fuerza residual. La presencia de una rigidez por endurecimiento negativa no modifica ninguna norma básica del modelo. La figura 2.8.a muestra el deterioro de la rigidez de recarga para un modelo de pico orientado una vez que se rebasa el eje horizontal (puntos 3, 7, y 11). El camino de recarga se dirige al desplazamiento máximo del semiciclo anterior, siempre que este sea mayor al de fluencia de lo contrario se dirige al punto de fluencia.

Mahin y Bertero propusieron que la ruta de recarga se dirija al desplazamiento máximo del último ciclo en lugar del desplazamiento máximo de todos los ciclos anteriores si la trayectoria anterior da como resultado mayor rigidez de recarga. Esto se puede ilustrar en la figura 2.8.b donde la recarga desde el punto 10 se dirige al punto 7 (desplazamiento máximo del último ciclo) en vez de ir al punto 2

(desplazamiento máximo de todos los ciclos anteriores, como en el modelo original de pico orientado); una vez que se alcanza el punto 7, el camino se dirige al punto 2.

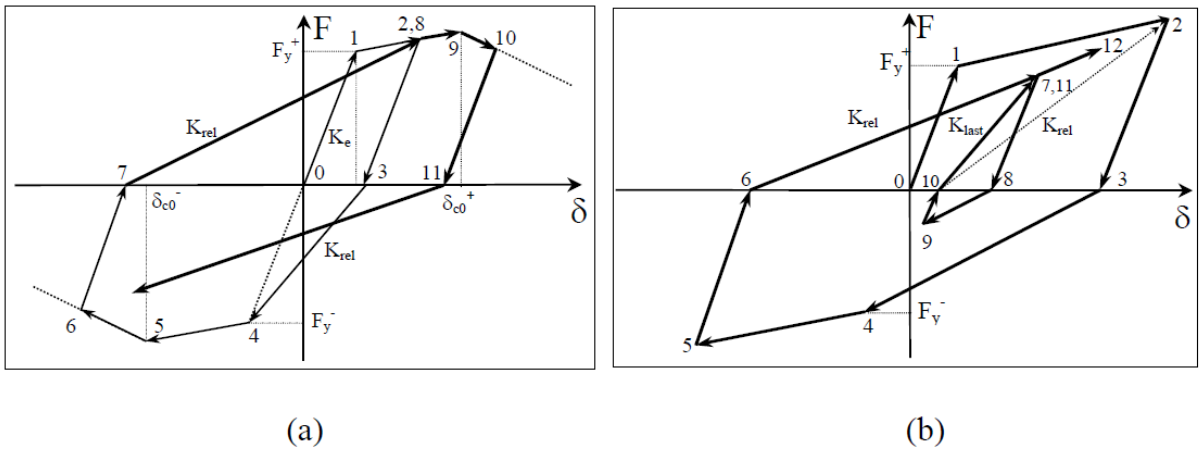


Figura 2.8 Modelo histerético pico orientado; (a) Reglas básicas del modelo, (b) Modificación Mahin y Bertero

2.6.4 Modelo de estrechamiento (pinching model)

El modelo de estrechamiento (pinching model) es similar al modelo de pico orientado, excepto que la recarga consta de dos partes. Inicialmente la ruta de recarga se dirige hacia un “punto de ruptura”, que es una función de la deformación máxima permanente y la carga máxima experimentada en la dirección de la carga. El punto de estrechamiento (break point) es definido por el parámetro K_F , que modifica la fuerza máxima de ‘estrechamiento’ (puntos 4 y 8 de la figura 2.9a) y K_d , que define el desplazamiento del punto de interrupción (punto 4’ y 8’). La primera parte de la rama de descarga está definida por $K_{rel,a}$ y una vez que se alcanza el punto de quiebre (puntos 4’ y 8’), la ruta de recarga se dirige hacia la deformación máxima de los ciclos anteriores en la dirección de carga ($K_{rel,b}$).

Si la deformación absoluta en la recarga (punto 13 figura 2.9b) es mayor que el valor absoluto de $(1 - K_d)\delta_{per}$, la trayectoria de recarga consiste en una única rama que está dirigida hacia la deformación máxima previa en la dirección de carga.

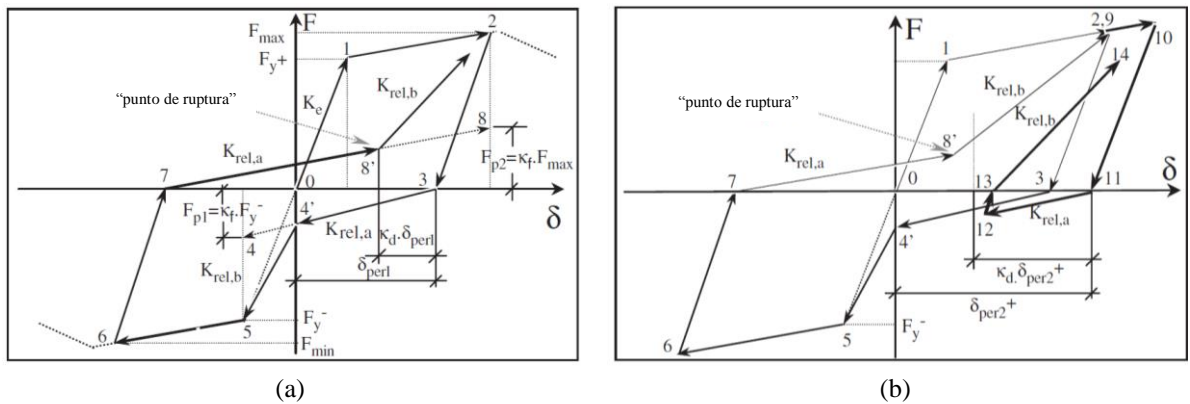


Figura 2.9 Modelo histerético de estrechamiento: (a) reglas básicas del modelo y (b) modificación de la recarga de la deformación es a la derecha del punto de ruptura.

2.6.5 Fuerza cíclica y deterioro de la rigidez basado en la energía disipada

Cuatro modelos de deterioro cíclico pueden ser activados una vez que se ha alcanzado el punto de fluencia en al menos una dirección:

- Fuerza básica (Basic strength)
- Fuerza de endurecimiento por deformación (post-capping strength)
- Rigidez de descarga (unloading stiffness)
- Deterioro de la rigidez de descarga (unloading stiffness deterioration)

La tasa de deterioro cíclico es controlada por la regla desarrollada por (Rahnama y Krawinkler, 1993), la cual es basada en la disipación de energía histerética cuando los componentes son sujetos a carga cíclica.

El deterioro cíclico en la excursión i es definido por el parámetro β_i , que se define como:

$$\beta_i = \left(\frac{E_i}{E_t - \sum_{j=1}^i E_j} \right)^c \quad (1)$$

Donde c es un parámetro que tiene valores de 1 si la rapidez del deterioro es constante y 2 si el deterioro es lento primero y rápido después; E_i es la energía disipada en el semiciclo i , $\sum E_j$ es la suma de la energía disipada en todos los semiciclos anteriores y E_t es la capacidad de disipar energía; que suele escribirse como

$$E_t = \gamma F_Y \delta_y \quad (2)$$

Donde γ es un factor que multiplica la energía de deformación del elemento hasta la fluencia. Este parámetro debe obtenerse de ensayos experimentales y puede ser distinto para distintos modelos de deterioro (rigidez lateral, resistencia, etc.).

Si la historia de desplazamientos consiste de amplitud de ciclos constantes, un valor unitario de “ c ” implica una razón de deterioro casi constante; para el mismo historial de desplazamientos un valor de $c = 2$ ralentiza la velocidad de deterioro en los primeros ciclos y acelera la tasa de deterioro en los ciclos posteriores.

A lo largo de la historia de carga β_i debe de estar dentro de los límites $0 < \beta_i \leq 1$. Sí β_i está fuera de estos límites, significa que la capacidad de energía histerética se ha agotado y se produciría el colapso.

2.6.6 Deterioro de la fuerza básica

El deterioro de la resistencia está definido por el traslado de la rama de endurecimiento por deformación hacia el origen por una cantidad equivalente a la reducción de la fuerza de fluencia

$$\begin{aligned} F_i^+ &= (1 - \beta_{s,i}) F_{i-1}^+ \\ F_i^- &= (1 - \beta_{s,i}) F_{i-1}^- \end{aligned} \quad (3)$$

$F_i^{+/-}$ y $F_{i-1}^{+/-}$ son las fuerzas de fluencia de deterioro antes y durante de la excursión i respectivamente.

Hay un valor positivo y uno negativo para cada parámetro de deterioro porque el algoritmo deteriora la fuerza de forma independiente en ambas direcciones. Es decir F_i^- se actualiza después de cada excursión inelástica positiva, F_i^+ se actualiza después de cada excursión inelástica negativa.

El parámetro $\beta_{s,i}$ se calcula con la ecuación 1, cada vez que el camino inelástico cruza con el eje horizontal. (se asocia con el valor apropiado γ para el modelo de deterioro correspondiente a la resistencia γ_s).

El modo de deterioro de la resistencia básica también incluye el deterioro de la pendiente de endurecimiento por deformación, la cual es rotada de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} K_{s,i}^+ &= (1 - \beta_{s,i})K_{s,i-1}^+ \\ K_{s,i}^- &= (1 - \beta_{s,i})K_{s,i-1}^- \end{aligned} \quad (4)$$

La pendiente de endurecimiento por deformación es también deteriorada independientemente en ambas direcciones.

Un modelo de pico orientado es usado en la figura 2.10 para ilustrar el modo básico de deterioro de la fuerza. En el punto 3, β_s se calcula por primera vez y el límite elástico en el lado negativo se reduce de F_y^- a F_1^- . Además, la pendiente de la rama de endurecimiento por deformación disminuye desde $K_{s,0}^-$ a $K_{s,1}^-$. En el punto 7 β_s se calcula nuevamente y el límite elástico positivo se modifica de F_y^+ a F_1^+ . Observe que el valor de β_s se usa para modificar solo la intensidad en la dirección de la carga actual, en función de la resistencia anterior en esa dirección, es decir, la fuerza en la dirección opuesta no se modifica.

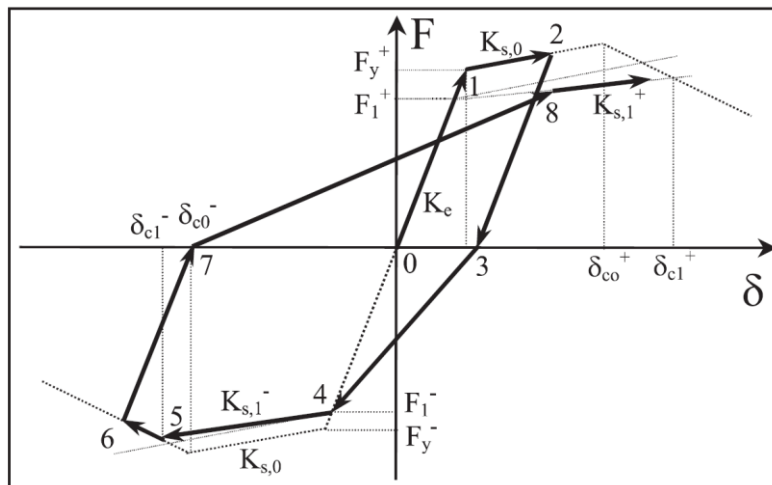
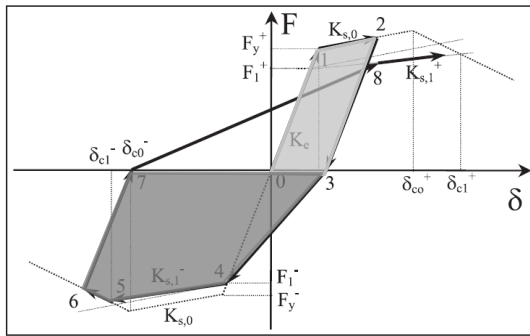


Figura 2.10 Modelo de Pico orientado deterioro de la fuerza básica (Ibarra y otros, 2005)

Posteriormente se muestra la técnica para usar el modelo de Pico Orientado, pero incluyendo la degradación histerética de acuerdo al modelo de IMK. Este modelo con degradación se muestra en la Figura 2.11.



| | |
|--|---|
| $\beta_1 = \frac{E_1}{E_t - E_1}$ $F_1^- = (1 - \beta_1)F_y^-$ $F_y^- \text{ de curva principal}$ $K_{s,1}^- = (1 - \beta_1)K_{s,0}$ | E_1 E_2 ΣE_i |
| | $\beta_2 = \frac{E_2}{E_t - \Sigma E_i}$ $F_1^+ = (1 - \beta_2)F^+$ |

Figura 2.11 Modelo de Pico orientado con degradación de resistencia usando el modelo IMK

El modelo se calibra utilizando la curva monotónica y la curva de histéresis de ensayos experimentales.

2.6.7 Deterioro de la fuerza resistente post-pico

Este modo de deterioro traslada la rama de endurecimiento por deformación hacia el origen y a diferencia del deterioro de la fuerza básica, la pendiente de la rama de endurecimiento por deformación se mantiene constante. La rama posterior al límite máximo se mueve hacia el interior una cantidad equivalente a la reducción de la fuerza de referencia de acuerdo con la ecuación (5).

$$F_{ref,i}^{+/-} = (1 - \beta_{c,i})F_{ref,i-1}^{+/-} \quad (5)$$

$F_{ref,i}^{+/-}$ es la intersección del eje vertical con la proyección la rama descendente i. e. la resistencia post pico (figura 2.12). Hay un parámetro de fuerza de referencia positivo y uno para el negativo para deterioros independientes positivos y negativos de fuerza de endurecimiento por deformación.

El parámetro β_c es calculado con la ecuación 7 y se asocia con el valor apropiado de γ para modelar el deterioro de endurecimiento por deformación (γ_c).

El deterioro de resistencia post pico se calcula cada vez que se cruza el eje horizontal, pero el parámetro de deterioro puede no afectar la trayectoria de recarga en las primeras etapas de la no linealidad. En la figura 2.12, el primer deterioro de resistencia post pico se calcula en el punto 3 y el punto de referencia negativo se mueve a $F_{ref,1}^-$. Esta modificación a la curva principal no afecta el camino de recarga debido a la pequeña magnitud del desplazamiento negativo no alcanza la rama post pico. En el punto 6, la fuerza post pico es calculada de nuevo y esta vez si modifica la ruta de recarga debido a que el desplazamiento $\delta_{c,1}^+$ se excede en esta excursión.

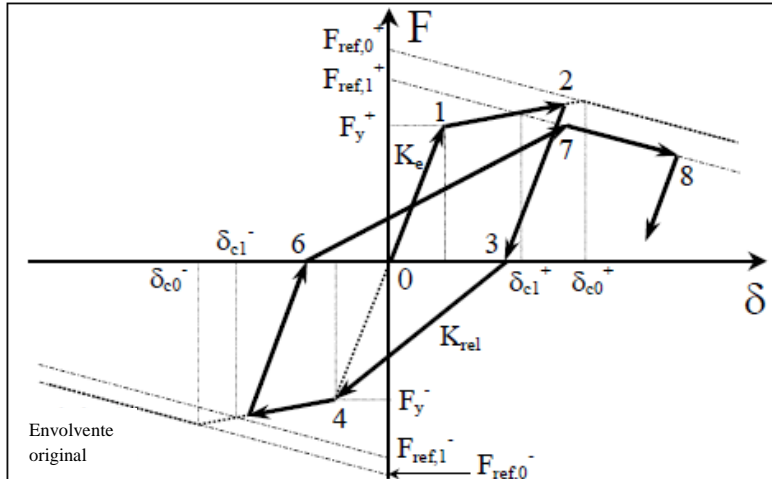


Figura 2.12 Modelo de Pico orientado, deterioro de la fuerza por endurecimiento por deformación (Ibarra y otros, 2005)

2.6.8 Deterioro de la rigidez de descarga

La rigidez de descarga (K_u) se deteriora con la ecuación 6.

$$K_{u,i} = (1 - \beta_{k,i})K_{u,i-1} \quad (6)$$

Donde $K_{u,i}$ y $K_{u,i-1}$ son la rigidez de descarga después y antes de la excursión i , respectivamente; β_k es calculado con la ecuación 1 y se asocia con un parámetro de deterioro cíclico apropiado γ_k .

El parámetro β_k es el único que se calcula cuando se produce un cambio de carga en el rango inelástico. Además, es el único modo de deterioro en el que el parámetro de deterioro en una dirección también se usa para actualizar el parámetro de deterioro en la otra dirección. En consecuencia, la rigidez de descarga se actualiza hasta el doble de veces que los otros parámetros de deterioro. Por lo tanto, si se espera la misma capacidad de disipación de energía para los cuatro modos de deterioro, se recomienda asignar un valor mayor a γ_k que γ_s , γ_c y γ_a . Si la misma energía se disipa en la dirección positiva y negativa, entonces γ_k debería ser aproximadamente dos veces más grande que los otros valores de γ , es decir $\gamma_k = 2\gamma_{s,c,a}$.

En la figura 2.13 se muestra el modelo de pico orientado que incluye el deterioro de la rigidez de descarga. En el punto 2 se produce el primer cambio de dirección en el rango inelástico y la rigidez de descarga se deteriora de K_e a $K_{u,1}$. En el punto 5 se produce el primer cambio en el lado negativo y $K_{u,2}$ se calcula en función de la actualización de β_u y $K_{u,1}$. A diferencia de los otros modos de deterioro $K_{u,2}$ se actualiza en función del valor de la rigidez de descarga del semiciclo anterior.

El deterioro de la rigidez de descarga se produce cada vez que hay un cambio de dirección y la rigidez de descarga de la actualización se utiliza para actualizaciones posteriores de este parámetro. Sin embargo, la actualización de la rigidez de descarga no se tiene en cuenta si el cambio se considera una interrupción en la dirección de la carga.

En los modelos de pico orientado y estrechamiento (pinching), se produce una interrupción cuando la trayectoria está en la rigidez de descarga y se produce una reversión antes de que la trayectoria alcance el desplazamiento máximo en el lado opuesto (figura 2.13). En el modelo bilineal se produce una interrupción cuando la ruta está en la rigidez de descarga y se invierte antes de alcanzar la curva principal en el lado opuesto.

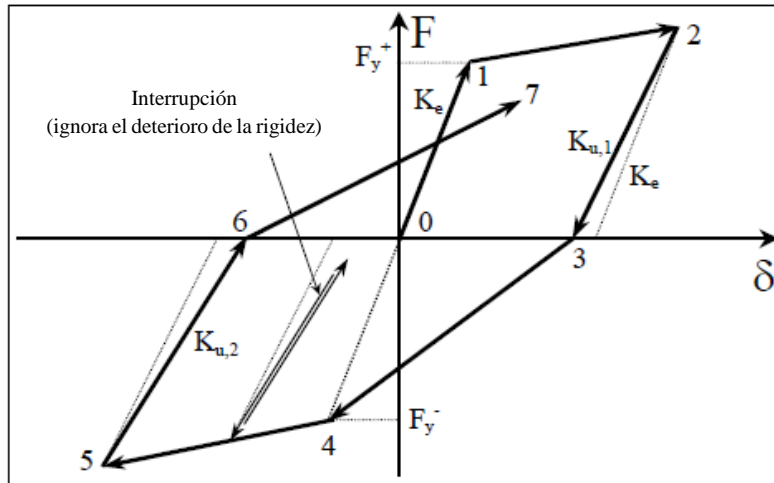


Figura 2.13 Modelo de Pico orientado, deterioro de la rigidez de descarga (Ibarra y otros, 2005)

2.6.9 Deterioro acelerado de la rigidez de recarga

Este modo de deterioro aumenta el valor absoluto del desplazamiento objetivo, definido como el máximo desplazamiento positivo o negativo de ciclos pasados según la dirección de carga. El deterioro acelerado de la rigidez de recarga se define sólo para los modelos de pico orientado y estrechamiento (pinching) y se rige por la ecuación 7.

$$\delta_{t,i}^{+/-} = (1 + \beta_{a,i})\delta_{t,i-1}^{+/-} \quad (7)$$

Existe un desplazamiento objetivo (δ_t) para cada dirección de carga, y el deterioro de la rigidez de recarga se calcula cada vez que se cruza el eje horizontal (figura 5.12). La ecuación 1 se emplea para calcular β_a basado en el parámetro correspondiente γ_a .

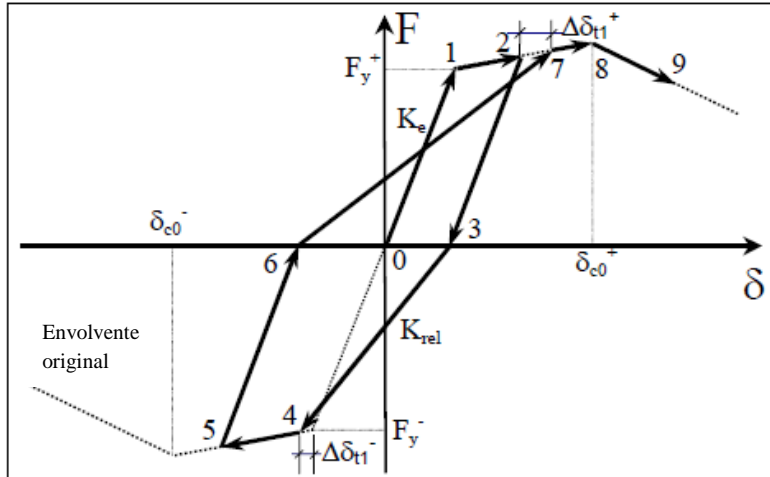


Figura 2.14 Modelo de Pico orientado, deterioro de la rigidez de recarga acelerado (Ibarra y otros, 2005)

2.6.10 Modificación del modelo Ibarra Krawinkler

Una de las modificaciones al modelo de Ibarra Medina Krawinkler consiste en tomar en cuenta las diferentes razones de deterioro cíclico en ambas direcciones de carga, como por ejemplo en el caso de una viga de sección compuesta, debido a la acción cíclica. El componente se deteriora mucho más lentamente en la dirección de carga positiva cuando el concreto está en compresión comparado con el negativo cuando el patín inferior de la viga está en compresión y puede doblarse fácilmente en un modo de torsión lateral. Para tener en cuenta las diferentes razones de deterioro en ambas direcciones de carga se introduce el parámetro D en la ecuación 7.

$$\beta_i = \left(\frac{E_i}{E_t - \sum_{j=1}^i E_j} \right)^c * D^{+/-} \quad (8)$$

$D^{+/-}$ = parámetro que define la disminución de la razón de deterioro cíclico en la dirección de carga positiva y negativa. Cuando la razón de deterioro cíclico es la misma en ambas direcciones de carga entonces $D^{+/-} = 1$. En el caso de muros de mampostería puede tomarse $D=1$, sin embargo, sería necesario revisar el caso de muros en L o en T.

Definición de la capacidad de disipación de energía de referencia

En el modelo original, la capacidad de disipación de energía de referencia E_t para cada modo de deterioro se expresó $\gamma F_y \delta_y$, con el factor γ_s , γ_c , γ_a y γ_k , respectivamente, para la resistencia básica, resistencia post-pico, degradación acelerada de la rigidez de recarga y deterioro de la rigidez de descarga. Relacionar la capacidad de disipación de energía con la deformación que se produce no es una medida muy estable, ya que en muchos casos no está bien definido. Por esta razón, se utiliza el parámetro más estable δ_p para normalizar la capacidad de disipación de energía de referencia. Así, en el modelo modificado propuesta por (Lignos, 2008) este valor de referencia se expresa como:

$$E_t = \lambda F_y \delta_p \quad (9)$$

Donde ahora la normalización es con respecto a $F_y \delta_p$ en que δ_p es la deformación plástica $\delta_p = \delta_c - \delta_y$ como una medida de la capacidad de deformación de los elementos en lugar de δ_c / δ_y ; puede tomar diferentes valores para los cuatro modos de deterioro cíclico, es decir, γ_s , γ_c , γ_a y γ_k .

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Programa experimental

Para la obtención de los parámetros requeridos para generación del modelo histerético Ibarra Medina Krawinkler IMK, se llevó a cabo un programa experimental el cual consistió en la construcción y ensaye de seis muros a escala 1:2. Los muros formaron dos series, una con y la otra sin refuerzo horizontal; las dimensiones de los muros y las características de los materiales son las mismas para los seis muros. En la Tabla 3-1 se muestran las características de los muros, tipo de refuerzo, así como el tipo de ensaye para cada muro; los ensayos dinámicos se llevaron a cabo en la mesa vibradora del Instituto de Ingeniería, los ensayos monotónico y cíclico pseudo estático se realizaron en el laboratorio de estructuras y materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Tabla 3-1 Especímenes de prueba y tipo de ensaye

| Muro | Refuerzo | Tipo de ensaye |
|-------|--------------|----------------------------|
| MSR-M | Sin refuerzo | Monotónico pseudo-estático |
| MSR-E | Sin refuerzo | Cíclico pseudo-estático |
| MSR-D | Sin refuerzo | Dinámico |
| MCR-M | Con refuerzo | Monotónico pseudo-estático |
| MCR-E | Con refuerzo | Cíclico pseudo-estático |
| MCR-D | Con refuerzo | Dinámico |

3.1.1 Descripción de los especímenes

Las dimensiones de los muros fueron de 125 cm de altura, 120 cm de longitud, el espesor fue de 6 cm. Las dimensiones de los castillos fueron de 6 cm x 7.5 cm, con armado longitudinal de cuatro barras del no. 2 (1/4" ó 6.3 mm.) y refuerzo transversal estribos de alambre de calibre 10 (3.4 mm) a cada 9 cm en la parte central y a cada 4.5 cm en los extremos. La junta entre los tabiques se construyó en promedio de 7 mm. En la parte superior del muro se construyó una dala de 6 x 14 cm con un armado de cuatro barras del no. 2 y estribos a cada 9 cm, una losa maciza de concreto reforzado de 45 cm de ancho de 8 cm de espesor armada con barras del no. 3 (9.5 mm) a cada 18 cm, esta para repartir de manera uniforme la carga sobre el muro. En los muros con refuerzo horizontal (MCR) se colocaron barras de diámetro 4 mm (5/32") cada cinco hiladas (5/32@5hiladas) En las figuras 3.2 y 3.3 se muestra la geometría de los muros de ensayos dinámicos y estáticos.

Los muros que se ensayaron en la mesa vibradora se desplantaron sobre una viga de cimentación de una altura de 47 cm, un ancho de 56 cm y una longitud de 165 cm, en la cual se anclaron los castillos (figura 3.1). La longitud de empotramiento fue la altura de la viga. En la viga de cimentación se dejaron ductos para poder anclar a la plataforma de la mesa vibradora mediante cuatro barras roscadas de 30 mm de diámetro.

Los muros que se ensayaron en forma pseudo-estática se desplantaron sobre vigas de cimentación de 60 cm de ancho, una altura de 40 cm y una longitud de 240 cm. En la parte superior de la viga se colocó una dala de desplante de 15 cm de ancho, una altura de 25 cm y longitud igual a la viga de cimentación;

para el anclaje de la cadena con la viga de cimentación se colocaron dos barras del no. 4 en forma de “U” en cada extremo de la viga, esto para asegurar que no hubiera deslizamiento entre la viga y la dala; el armado de la dala fue con cuatro barras del no. 4 y estribos del no. 3 a cada 15 cm; en la cual se anclaron los castillos del espécimen y se desplantaron las hiladas de tabique.

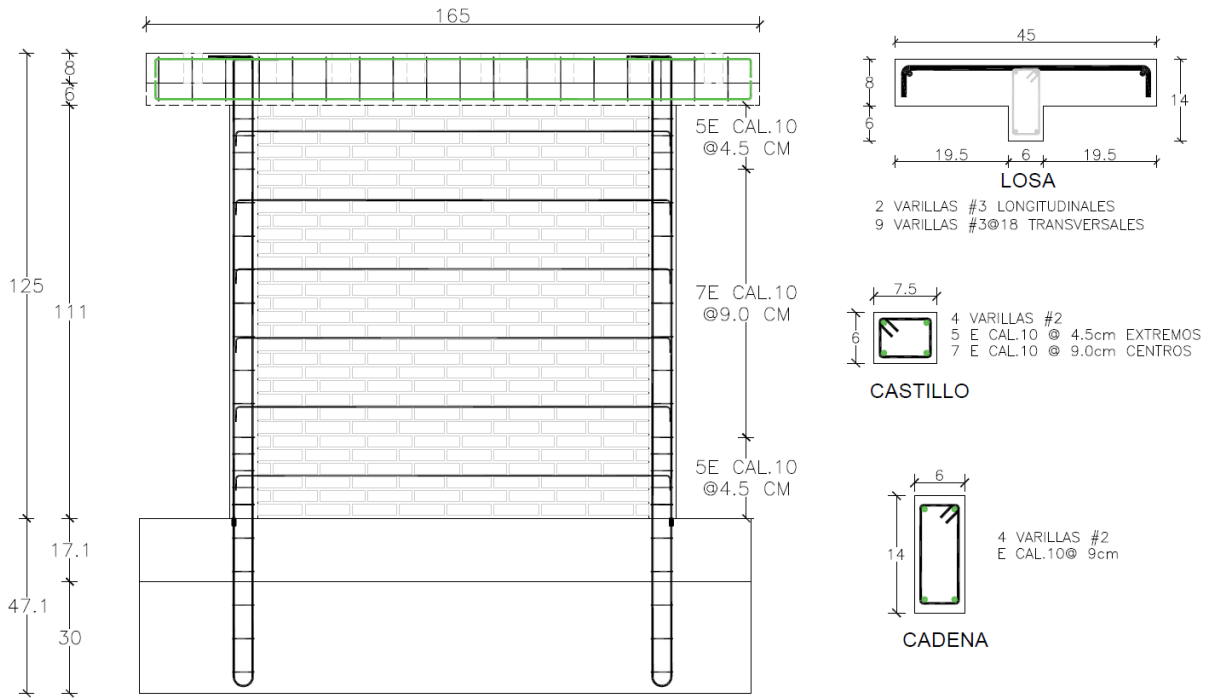


Figura 3.1 Armados de los especímenes.

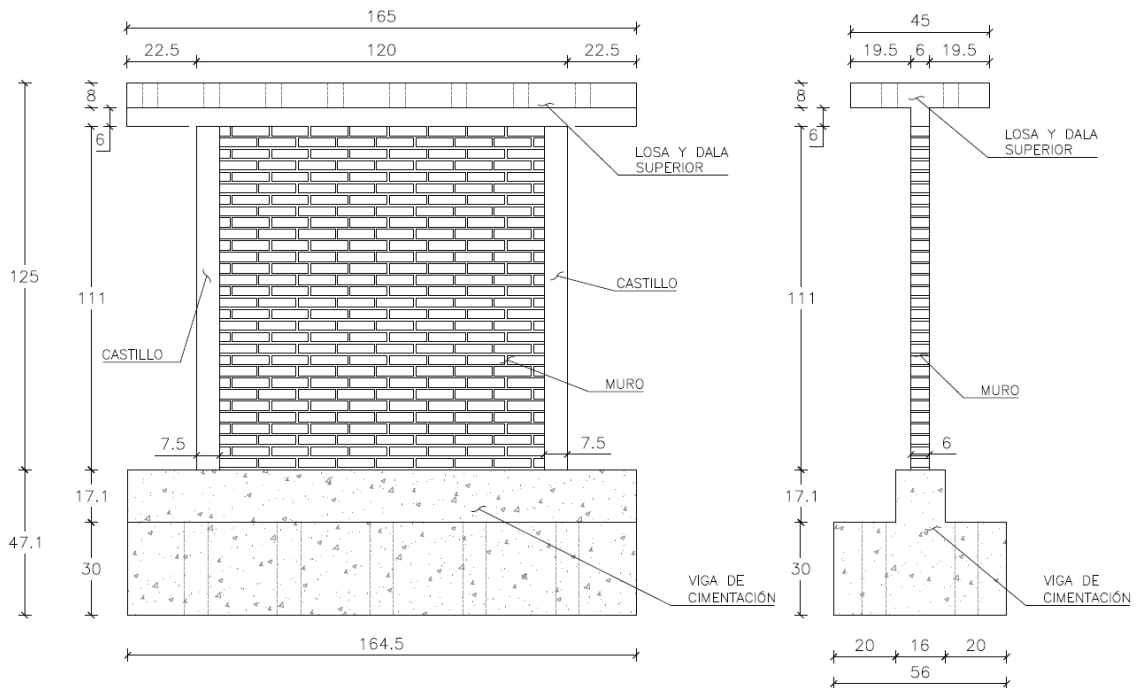


Figura 3.2 Modelo de muro con y sin refuerzo horizontal (MCR y MSR). Dinámico

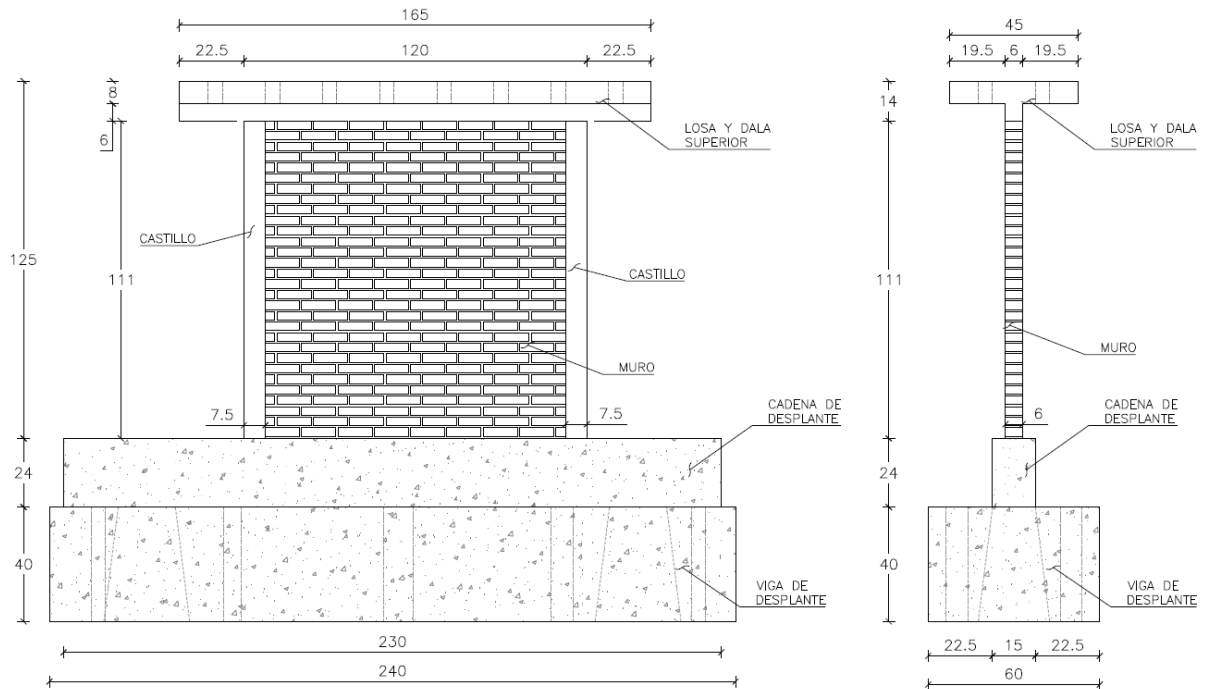


Figura 3.3 Modelo de muro con y sin refuerzo horizontal (MCR y MSR). Estáticos

En los ensayos dinámicos se utilizó el marco de carga inercial de la mesa vibradora (Figura 3.4), el dispositivo tiene un peso total igual a 245.3 kN, de los cuales 96.2 kN representan la masa adicional y 49.1 kN corresponden al peso de los componentes auxiliares (viga de carga, rótulas, viga de conexión, celda de carga y caja); en la figura 3.5 se especifica el sistema de deslizamiento del marco de carga inercial de la mesa vibradora, el cual tiene un coeficiente muy bajo (Carrillo, 2010). La masa utilizada se diseñó para lograr un periodo cercano al obtenido por Flores de sus especímenes de tres niveles (Flores y otros, 2016), se supuso que el muro forma parte de dicho modelo.



Figura 3.4 Marco de carga inercial Mesa Vibradora Instituto de Ingeniería, UNAM

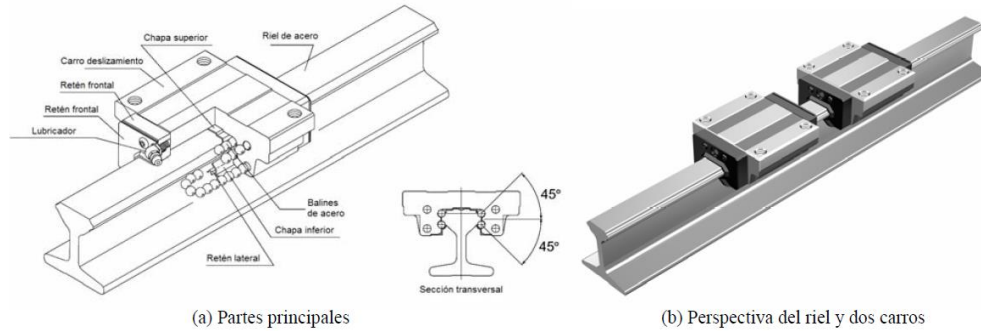


Figura 3.5 Sistema de deslizamiento de la masa adicional (Carrillo, 2010)

3.2 Marcos de carga

La carga vertical sobre los muros se aplicó de manera que se tuviera un esfuerzo de 3 kg/cm^2 . En los muros ensayados dinámicamente, la carga vertical se incluyó por medio de elementos auxiliares del marco de carga inercial (viga de carga, rotulas, placa de unión y puntal de conexión) lo que dio un peso de 976.3 kg (esfuerzo sobre el muro 1.36 kg/cm^2); para alcanzar el nivel de esfuerzo sobre el espécimen se adicionaron lingotes de plomo los cuales tienen un peso de 47 kg; se realizaron dos paquetes de 12 lingotes cada uno conformados entre dos placas de acero de 1" (2.54 mm) de espesor unidas mediante barras roscadas de 1" (2.54 mm).

Con la colocación de los lingotes se llegó al esfuerzo requerido para el ensaye; estos se colocaron de manera equidistante al centro del muro para no generar fuerzas no programadas en el mismo; se fijaron a la parte superior de la viga de carga por medio de las barras de ambos paquetes, como se muestra en la figura 3.6 y 3.7.

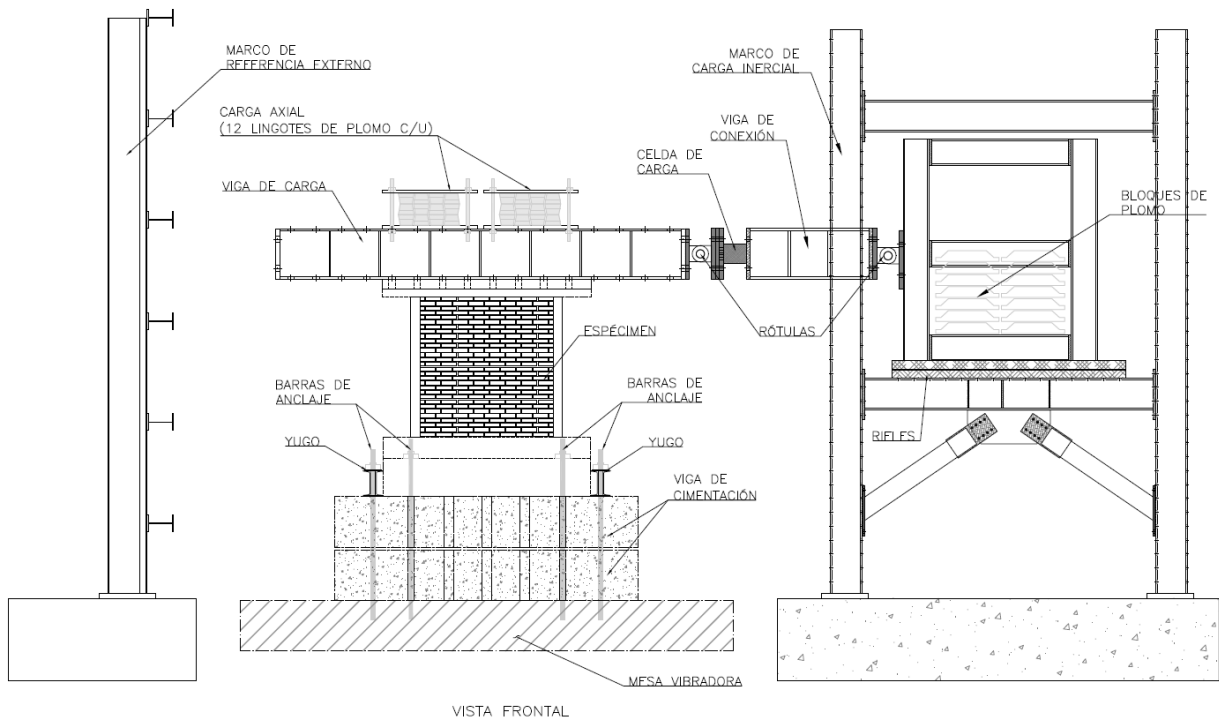


Figura 3.6 Dispositivo para ensayos de modelos dinámicos MCR y MSR; Mesa Vibradora II-UNAM



Figura 3.7 Marco de carga ensaye tipo dinámico

En los muros ensayados de forma pseudo-estática se colocó una viga de carga de 2.0 m de longitud. En cada extremo de esta se colocó una placa de acero de 115 cm de longitud, 65 cm de ancho y 7.62 cm de espesor (3 pulgadas). Para la sujeción de estos elementos se utilizaron cuatro barras de postensado de 2.54 cm (1 pulgada) diámetro; se utilizó una celda de carga para medir el peso de todos los elementos el cual fue de 1356 kg dando como resultado un esfuerzo sobre el muro de 1.88 kg/cm^2 , para alcanzar el nivel de esfuerzo requerido sobre el muro se adicionaron en la parte superior de la viga de carga dos placas con las mismas dimensiones a las de los extremos. Estas placas se sujetaron entre sí mediante cuatro tornillos de 1 pulgada; se fijaron a la viga de carga mediante barras de 1 pulgada, esto sirvió para que no se generara deslizamiento entre ambas partes. El arreglo para el ensayo se muestra en la figura 3.8 y 3.9.

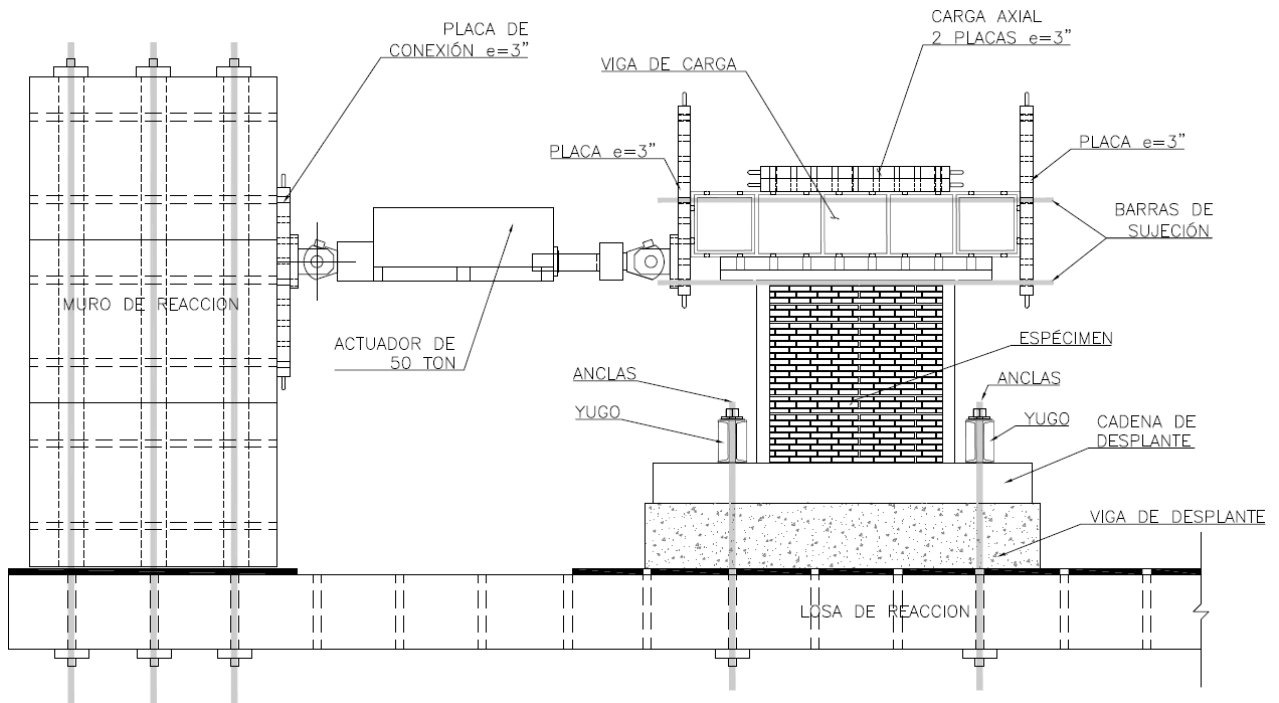


Figura 3.8 Dispositivo para ensaye pseudo-estático de modelos MCR y MSR; Laboratorio Instituto de Ingeniería, UNAM

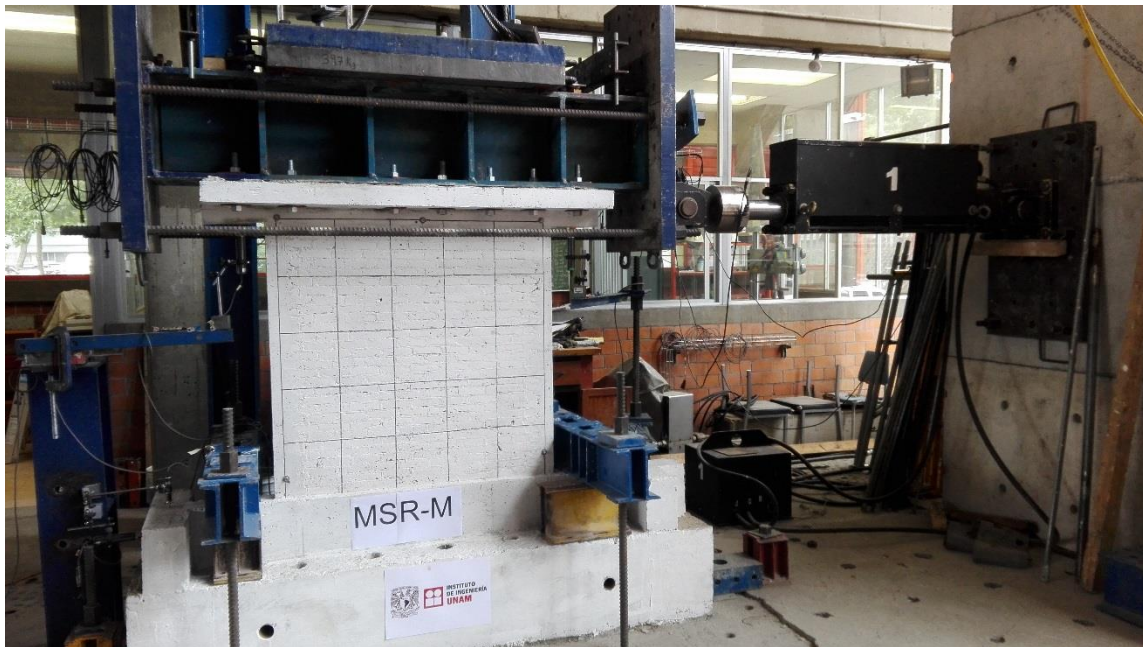


Figura 3.9 Marco de carga para los ensayos pseudo-estáticos

3.3 Escalamiento de los materiales

Los materiales empleados para la construcción de los especímenes fueron manufacturados para cumplir con el requerimiento de similitud en esfuerzos y adecuarse a las características de la escala empleada 1:2; de acuerdo al modelo de 3 niveles ensayado por (Flores y otros, 2016).

Las piezas a escala reducida se obtuvieron por medio de corte de las piezas escala natural. Esto se realizó para garantizar que las propiedades del material de las piezas prototipo.

3.3.1 Piezas de mampostería

Las piezas de mampostería fueron de fabricación artesanal macizas. Se realizaron varios cortes en las piezas de tamaño real para así obtener las piezas de tamaño a escala, para poder contar con el material real de las piezas. En la figura 3.10 se muestra el esquema de corte de las piezas.

Los tabiques para el modelo son de dimensiones $3 \times 6 \times 12$ cm que a escala natural representan las medidas típicas en la práctica de estructuras de mampostería que son $6 \times 12 \times 24$ cm. De ensayos a compresión de pilas y muretes se obtuvieron los siguientes valores de promedio $\bar{f}_m = 57.0 \text{ kg/cm}^2$ y $\bar{v}_m = 11.92 \text{ kg/cm}^2$

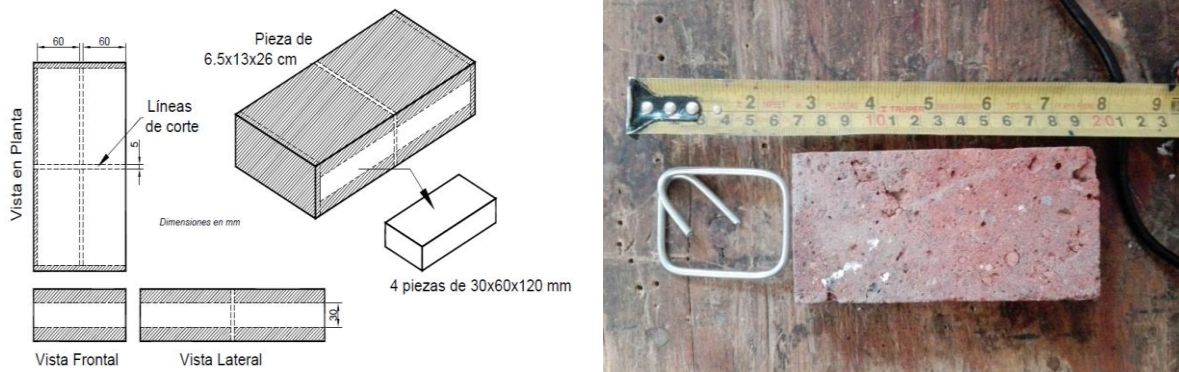


Figura 3.10 secuencia de corte para piezas del modelo

3.3.2 Agregados

Los agregados del mortero y concreto también se escalan por las dimensiones a construir de los especímenes, se utilizó un tamaño de agregado de 8 mm, y arena con un bajo contenido de finos.

3.3.3 Acero de refuerzo

El acero de refuerzo que se utilizó en los castillos fue por medio de barras lisas del no. 2 (1/4") "alambrón" que reflejarían el tamaño natural de barras del no. 4 (1/2") que se usan comúnmente en la construcción de muros de mampostería. Las barras utilizadas en los especímenes tuvieron un esfuerzo de fluencia $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$. Para que el alambrón con $f_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$ tuviera el esfuerzo de fluencia de 4200 kg/cm^2 fue necesario estirarlo en frío.

"De la solución práctica y económica que se realizó previamente para los modelos a escala 1:2 de 3 niveles ensayados por Flores; se estiraron las barras de alambrón del no. 2, llevándolos a la fluencia y al endurecimiento por deformación, de tal forma de igualar el esfuerzo requerido $f_{yreq} = 4200 \text{ kg/cm}^2$. Se conoce que al llevar a una barra de acero deformaciones de la etapa de endurecimiento y descargarla, queda en una condición de deformación permanente y con "memoria" de la deformación inelástica previamente alcanzada, de tal forma que si se considera ahora como una barra que se va a ensayar nuevamente, su comportamiento es elástico lineal hasta igualar la envolvente que llevaba antes de ser descargada, mostrando una plataforma de fluencia y, para el caso de este tipo de alambrón, tener todavía una importante capacidad de deformación inelástica fluyendo." (Flores y Guzman, 2015).

En la figura 3.11 se presentan las gráficas de los ensayos de los alambres realizados en el CENAPRED. El alargamiento al que estuvieron sometidos los alambres fue del 11%, esto se determinó realizando ensayos de las muestras de los alambres en la maquina universal del CENAPRED, una vez obtenido el valor del $f_{yreq} = 4200 \text{ kg/cm}^2$. En la figura 3.11 a) se muestra la gráfica completa esfuerzo-deformación del alambre estirado en frío; en la figura 3.11 b) se presenta solo la parte de la recarga que es como se usaron los alambres en los especímenes.

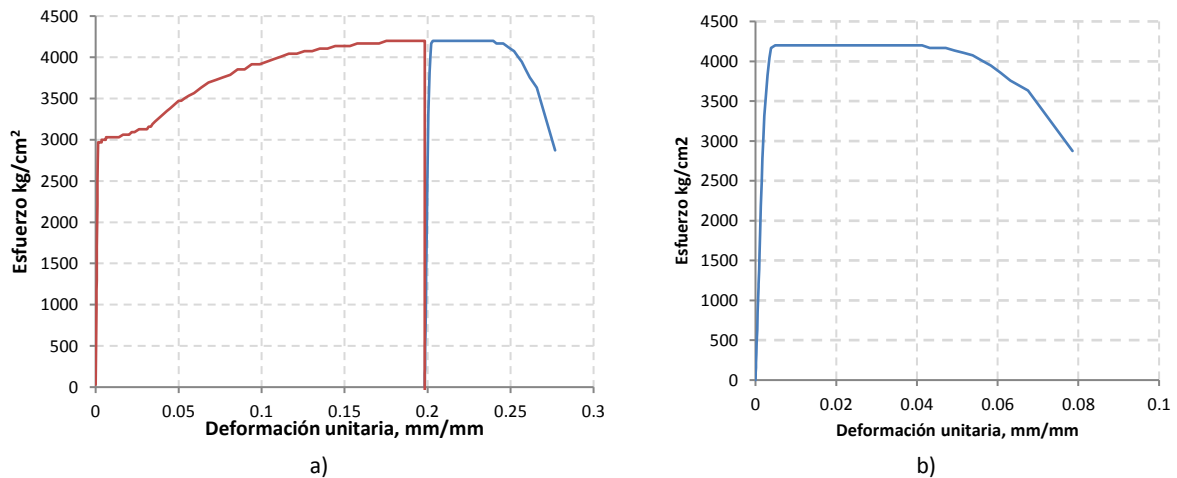


Figura 3.11 Gráfica esfuerzo-deformación de un alambón no. 2 estirado en el laboratorio.

Una vez determinado el porcentaje de alargamiento en los alambres se procedió a desarrollar un dispositivo de carga en el laboratorio de estructuras grandes del CENAPERD para estirar los alambres de refuerzo longitudinal de los castillos y dalas, en las figuras 3.12 y 3.13 se muestra el dispositivo desarrollado. Se utilizó un gato de capacidad de 50 ton y los alambres se cortaron a una longitud de 5 m, se doblaron por la mitad y se introdujeron por la parte posterior del gato las dos puntas del alambón, por la parte de enfrente se sujetaron las puntas con unas cuñas; se tuvo un alargamiento mayor a 25 cm (el gato tienen una carrera del émbolo de 15 cm), el procedimiento que se realizo fue sacar toda la carrera del émbolo y después colocar en la parte posterior una pieza de acero de aproximadamente 15 cm para que ahí se apoyará el gato y realizar una vez más el estiramiento de los alambres llegando hasta la longitud total de alargamiento.

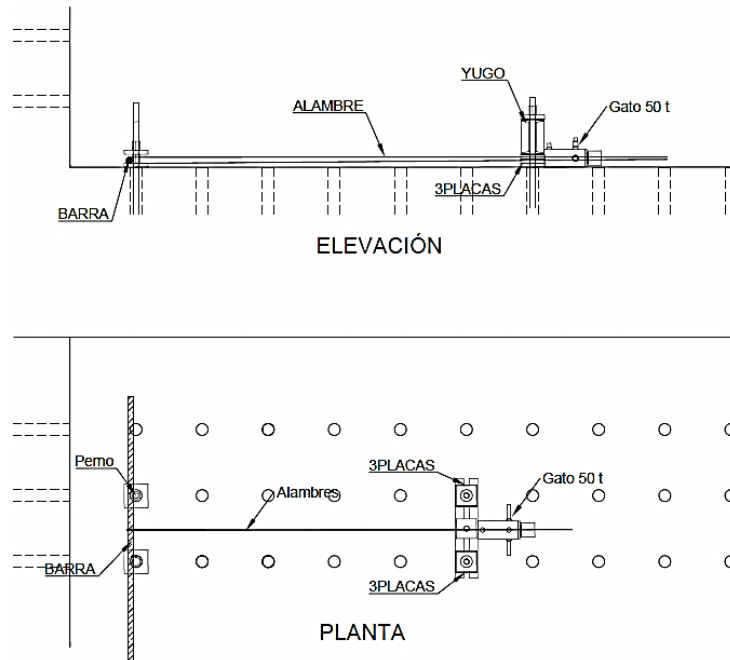


Figura 3.12 Dispositivo de carga para estirar los alambres no. 2 (1/4")

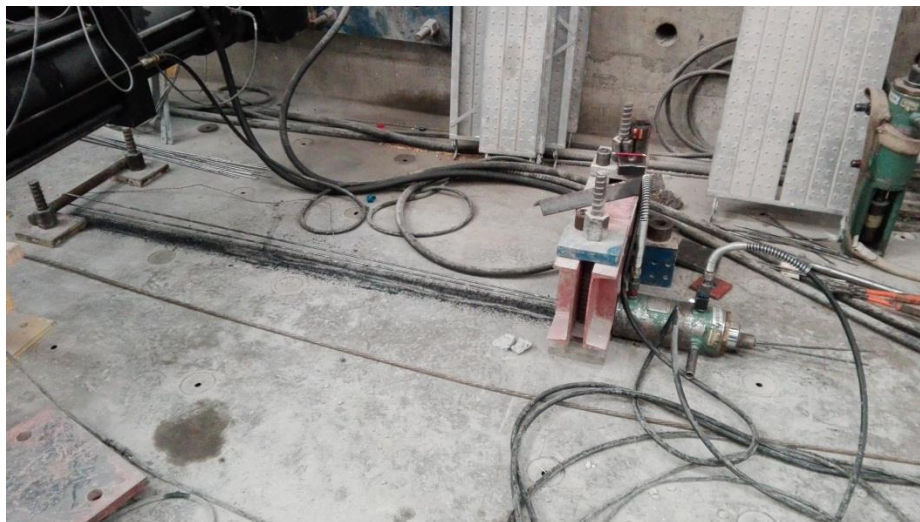


Figura 3.13 Alargamiento de alambres no. 2 (1/4") alambrcn

3.4 Armados

Los castillos tuvieron dimensiones de 6 cm de ancho por 7.5 cm de largo con refuerzo longitudinal de barras del #2 (alambrcn estirado) y el refuerzo transversal se usó alambre calibre 10 a cada 4.5 cm en los extremos y a cada 9 cm en el centro. La dala fue de sección de 14 cm de peralte por 6 cm de espesor con refuerzo longitudinal de varillas del #2 y estribos calibre 10 a cada 9 cm: Una losa maciza de 8 cm de espesor y 45 cm de ancho con refuerzo 2#3 longitudinales y 9#2 a cada 15 transversal; como se muestra en la figura 3.1.

3.5 Pruebas de materiales

Se realizaron pruebas a los materiales de construcción en la máquina universal del Instituto de Ingeniería; en la tabla 3-2 se presentan los valores promedios obtenidos de cada prueba que se realizó a los materiales. Los resultados detallados se muestran en el apéndice A.

Tabla 3-2 Valores promedios de los materiales de construcción de los especímenes

| Valores promedio | | | | | | | |
|------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| Muro | \bar{f}_m kg/cm ² | \bar{v}_m kg/cm ² | f'_c castillos Kg/cm ² | \bar{f}_j kg/cm ² | E_m kg/cm ² | G_m kg/cm ² | E_C castillos kg/cm ² |
| MCR-M | 67.56 | 16.2 | 161 | 176.05 | 20,764.35 | 10,140 | 153,367 |
| MCR-E | 63.97 | 14.6 | | 151.20 | 21,336.53 | 10,902 | |
| MSR-M | 46.63 | 8.6 | 157 | 196.97 | 11,405.09 | 4,382 | 136,033 |
| MSR-E | 46.34 | 8.3 | | 184.07 | 10,850.88 | 6,123 | |

\bar{f}_m es la resistencia promedio a compresión de la mampostería medida en pilas de 6 piezas

\bar{v}_m es la resistencia promedio a compresión diagonal de la mampostería (resistencia a cortante), medida en muretes cuadrados de 5 hiladas ensayadas a 45°

f'_c es la resistencia a compresión del concreto medido en cilindros

E_m y E_C son los módulos de elasticidad de la mampostería y concreto respectivamente

G_m es el módulo de rigidez a cortante de la mampostería

\bar{f}_j es la resistencia promedio a compresión de cubos de mortero.

3.6 Construcción de los especímenes

La construcción de cada uno de los especímenes se realizó en tres partes, construyendo la mitad del panel del muro y posteriormente cimbrando y colando los castillos a esta altura, después la mitad superior siguiendo el procedimiento anterior y después el cimbrado y colocación del acero de refuerzo de la dala superior y de la losa se llevó a cabo el colado de ambas partes.

Previo a la etapa de construcción de los especímenes se llevaron a cabo varios ensayos para la correcta construcción de la junta entre los tabiques; la junta tuvo en promedio un espesor de 7 mm utilizando una mezcla de un volumen de cemento, 1/4 de cal y tres de arena (1; 1/4:3). En los extremos de los muros se recortaron las esquinas de los tabiques para obtener un dentado. Para el colado de los elementos de concreto se utilizó una dosificación con una proporción de un volumen de cemento, 2 1/2 de arena, 3 1/2 de grava y aproximadamente 1 de agua; no se utilizó ningún aditivo para el concreto, se utilizó vibrador de pequeño tamaño cabeza de 2.54 cm vibrando el acero de refuerzo de los castillos, como se muestra en la figura 3.14.



Dentado de tabiques



Colocación de acero de refuerzo horizontal



Colado de castillos mitad inferior



Vibrado de concreto de castillos



Colado de castillos



Colocación de armado de losa

Figura 3.14 Construcción de especímenes estáticos y dinámicos

3.7 Instrumentación

La instrumentación de los modelos se dividió en dos tipos: instrumentación interna y externa. La instrumentación interna consistió en la colocación de deformímetros electrónicos adheridos en el refuerzo horizontal (muros con refuerzo MCR), refuerzo longitudinal y transversal (castillos), de esta manera se obtuvieron los datos confiables de la respuesta de los especímenes durante los ensayos. La instrumentación externa se ubicó sobre los especímenes para conocer la respuesta global, usando transductores eléctricos de desplazamiento, de carga y acelerómetros (en el caso de ensayos dinámicos).

3.7.1 Instrumentación interna

Para conocer las deformaciones en el refuerzo y posteriormente la contribución de este a la resistencia a corte, se colocaron 20 deformímetros eléctricos (“straing gauge”) adheridos a las barras de refuerzo horizontal, distribuidos en la diagonal del muro en ambos sentidos, y concentrando la parte central del muro. También se colocaron tres deformímetros en las barras longitudinales de los castillos como se muestra en la figura 3.15. Se utilizaron deformímetros eléctricos “straing gauge” marca Tokyo Sokky Kenyiujo. Se utilizó la misma distribución de ubicación de “straing gauges” en los especímenes de ensaye tipo dinámico y pseudo-estático.

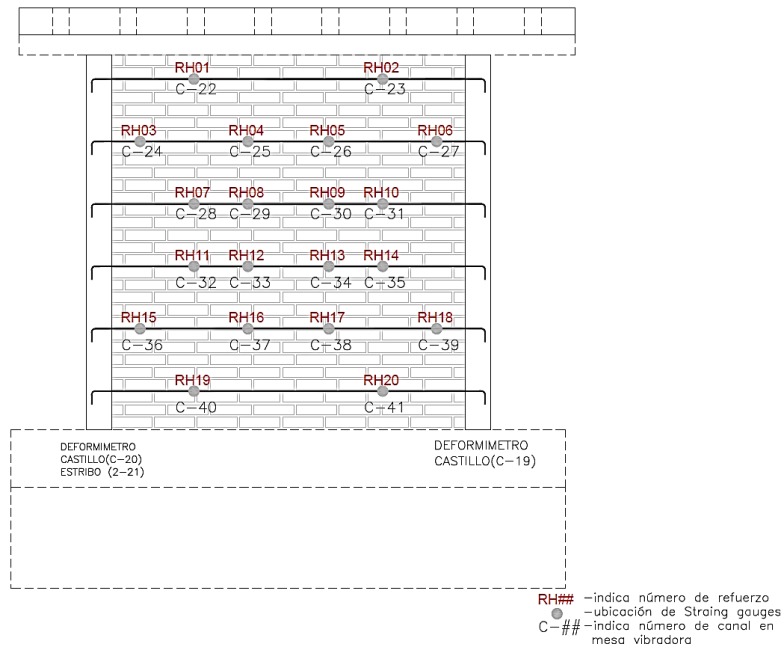


Figura 3.15 Ubicación de deformímetros (instrumentación interna)

En la figura 3.16 se observa la colocación de los deformímetros en las barras del refuerzo longitudinal y alambres de refuerzo horizontal. Se tuvo especial cuidado la protección de estos durante la construcción de los especímenes.

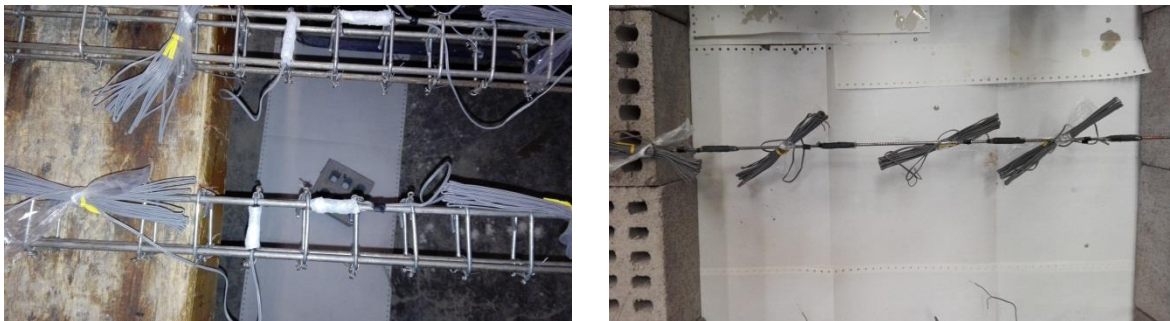


Figura 3.16 Instrumentación interna (castillo y refuerzo horizontal).

3.7.2 Instrumentación externa

Para los ensayos dinámicos se utilizaron acelerómetros uniaxiales con intervalo de aceleración de ± 4 g colocados de la siguiente manera; uno en la plataforma de la mesa vibradora, dos a nivel de desplante de los muros (viga de cimentación) y dos sobre la viga de carga (colocados uno por la parte de enfrente y el otro por la parte posterior del espécimen). Los acelerómetros se atornillaron a una base cúbica de acrílico que a su vez estaba sujeta a una base cuadrada de acrílico. Se colocó una celda de carga de capacidad de 68 tf, ubicada entre la viga de carga y de conexión del dispositivo de ensayo.

Para conocer los desplazamientos laterales y deformaciones de los especímenes se colocaron transductores de desplazamiento de 10, 25, 50 y 200 mm de carrera del vástago. Se colocaron 2 transductores para medir el desplazamiento lateral de muro (uno en la base y uno a la altura de la losa); 4 transductores para medir las rotaciones del muro ubicados en los extremos del muro, 4 transductores para medir los desplazamientos relativos del muro dos en forma diagonal y dos en vertical. Como se muestran en las figuras 3.17 y 3.18 el dispositivo de instrumentación externa y la instrumentación de los especímenes de ensayo dinámico

Para ambos tipos de ensayo se colocó un marco externo donde se sujetaron, con ayuda de diferentes perfiles de acero, los transductores. Para la medición de los desplazamientos relativos del muro los transductores se colocaron dos tubos de aluminio unos de mayor diámetro que el otro, deslizando entre sí, en el interior de los tubos se colocó lubricante para deslizar fácilmente; en los extremos se atornilló a un dispositivo libre de rotación en el plano y placas de aluminio, los cuales se fijaron mediante espárragos a los especímenes.

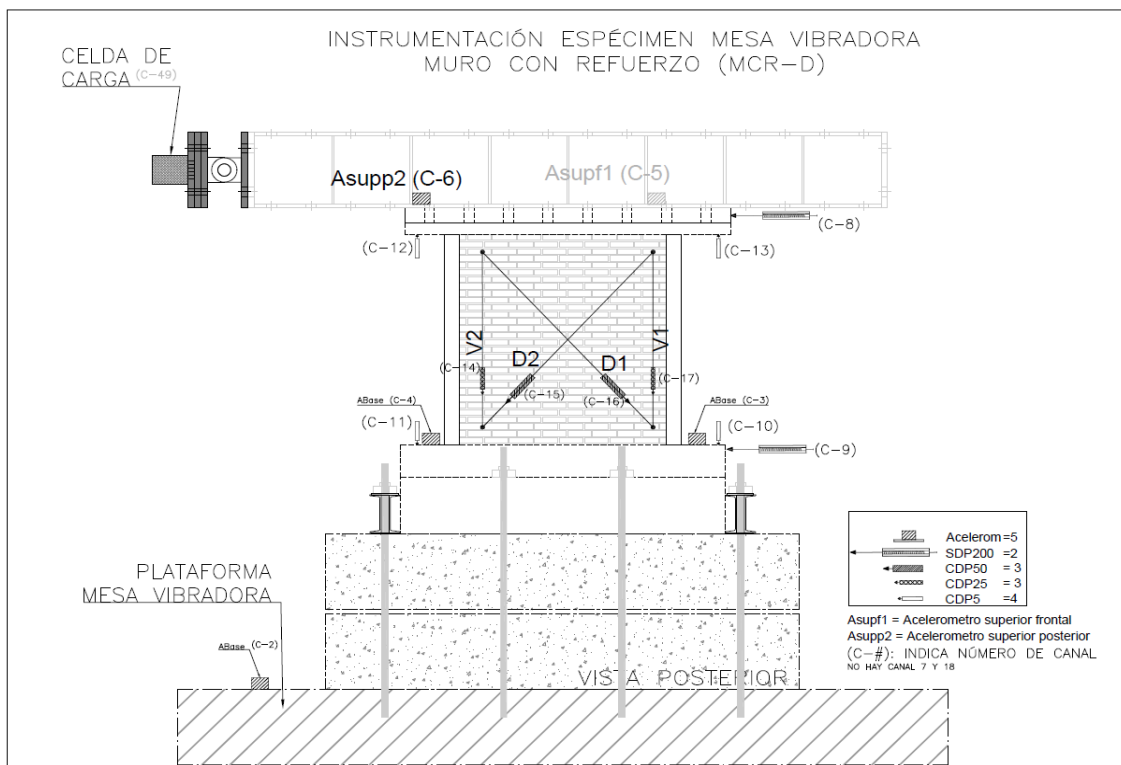


Figura 3.17 Arreglo para los ensayos dinámicos. Se muestra la instrumentación externa



Vista frontal



Vista posterior

Figura 3.18 Instrumentación externa. Ensaye dinámico

Para la instrumentación de los muros ensayados en forma pseudo-estática se utilizó la misma configuración de los ensayos dinámicos; el marco externo en el cual se colocaron bases metálicas imantadas para la sujeción de los transductores, así como los tubos de aluminio para medir los desplazamientos relativos en el muro. El arreglo se muestra en la figura 3.19 y 3.20.

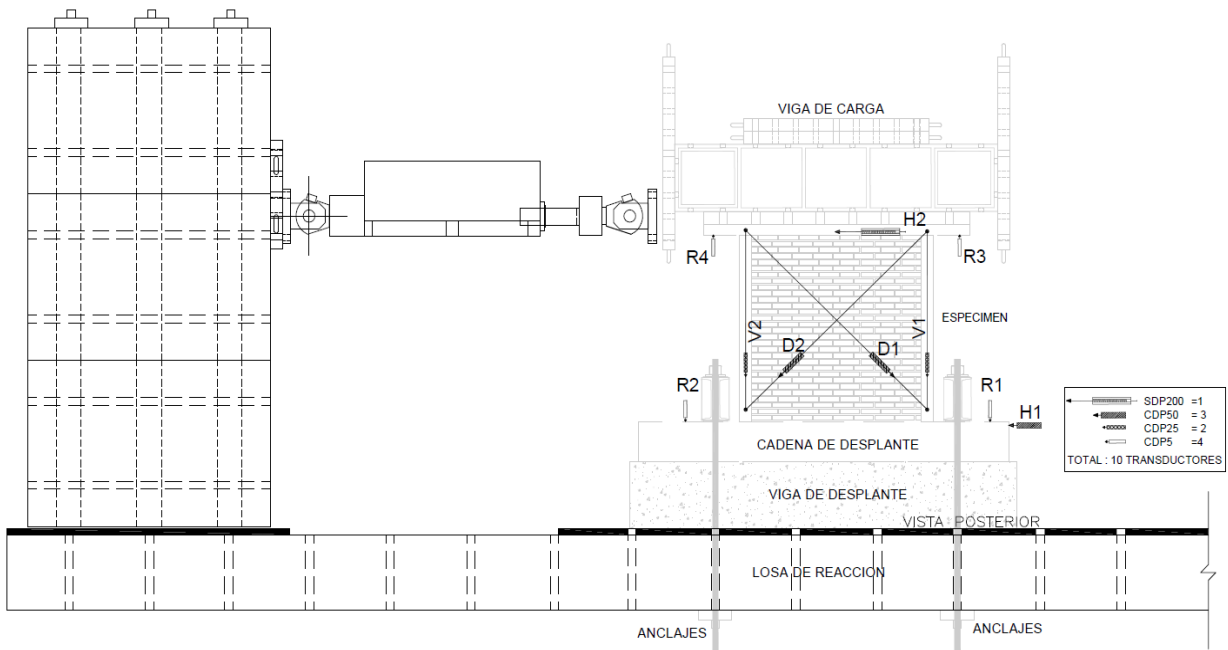
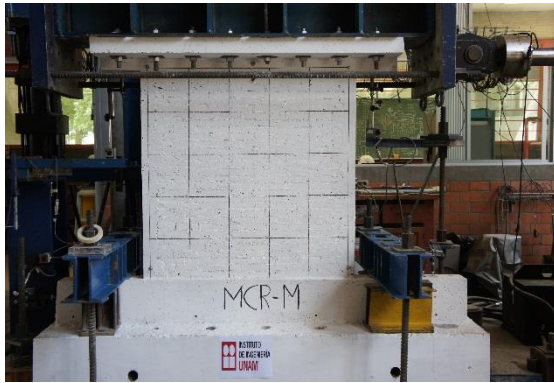


Figura 3.19 Arreglo para los ensayos pseudo-estáticos. (se muestra la instrumentación externa)



Vista frontal



Vista posterior

Figura 3.20 Instrumentación externa. Ensayo pseudo-estático

3.8 Calibración de la mesa vibradora

Para la calibración de la mesa vibradora se utilizaron cuatro vigas de concreto de 40 cm de alto x 60 cm de ancho x 240 cm de longitud, las vigas estuvieron sujetas mediante cuatro barras de postensado de 3.81 mm (1 ½") y cuatro yugos, además se colocaron encima de las vigas cuatro lingotes de plomo, el peso total del dispositivo fue de 5,600 kg, correspondiente al peso promedio de los especímenes sobre la plataforma, como se puede observar en la figura 3.21 la colocación de vigas y lingotes en la calibración.



Figura 3.21 Masas para calibrar la mesa vibradora

En la figura 3.22 se muestra la comparativa de las señales de entrada (registro) y la señal reproducida por la mesa vibradora (MV); como se puede observar la diferencia no es significativa entre ambas señales.

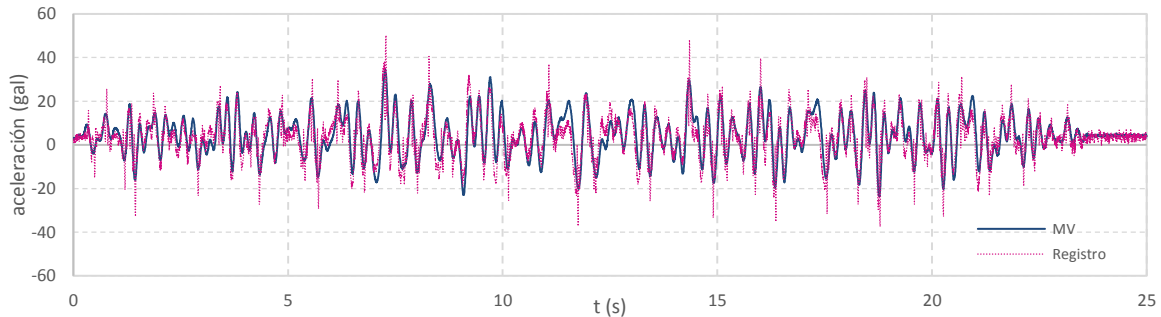


Figura 3.22 Comparativa de señales de entrada y salida de la mesa vibradora

3.9 Historia de carga de ensayos dinámicos y cuasi-estáticos

En ensayos del tipo dinámico se utilizó una señal senoidal con una amplitud inicial de 125 cm/s² o gals e incrementos de 125 gals hasta 1500 gals, teniendo cinco ciclos en cada incremento; durante el ensaye del muro MSR-D una vez aplicado el primer movimiento al 100% y su repetición al 125% se decidió cambiar de señal a una señal de “ruido blanco” considerando de 10 gal de aceleración RMS (Root Mean Square en inglés, Raíz Cuadrada Media), esto porque los movimientos de la señal senoidal no presentaba un buen desempeño en lo que se deseaba para el modelo histerético del comportamiento del muro, para este muro se realizaron 10 movimientos. El ruido blanco es una señal aleatoria con contenidos de frecuencias, por lo tanto, excita todos los modos.

El uso de ruido blanco se justifica ya que lo que se requiere es obtener la capacidad del muro de disipar energía esto es, se trata de llevar a la falla para obtener una propiedad mecánica más que conocer el comportamiento ante una acción representativa de un sitio.

Para los ensayos del muro MCR-D también se utilizó una señal de ruido blanco considerando 5 gal de aceleración RMS, con incrementos de 10 gal; se realizaron 10 movimientos para este muro.

El ensaye tipo pseudo-estático se realizó conforme se especifica en el apéndice A de las normas técnicas complementarias de mampostería NTCM 2017. Se dividió en dos etapas: la primera controlada por carga, se aplica hasta el 25% de la carga de agrietamiento teórico, el siguiente incremento se aplicó hasta el 50% de la misma, ambas con su repetición, la carga se aplicó a una razón de 2000 kg/min. La segunda etapa, controlada por distorsión, se aplicó con incrementos de 0.002*H (H = altura del muro) para cada incremento, iniciando con 0.001*H; la velocidad de aplicación de la distorsión fue 8.6 mm/min. Para los valores de aplicación de la velocidad de aplicación de la carga y distorsión se tomó como base la velocidad de aplicación de los ensayos de pilas a compresión de la norma (NMX-C-464-ONNCCE-2010, 2010). En la figura 3.23 se muestra la historia de aplicación de la carga.

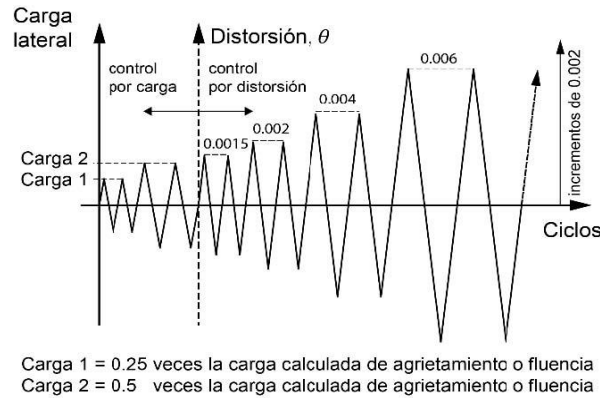


Figura 3.23 Historia de carga, ensayo cuasi-estático (NTCM, 20017)

En el ensayo tipo monotónico se realizó en dos etapas en la primera etapa controlada por carga, se realizó un ciclo hasta el 25% de la carga de agrietamiento teórico con una razón de velocidad de 2000 kg/min; en la siguiente etapa se controló por distorsión de 0 (cero) hasta llevarlo a la falla, a una razón de velocidad de 8.6 mm/min.

3.10 Adquisición de datos

Los datos se capturaron usando una frecuencia de muestreo de 250 muestras por segundo. Los ensayos pseudo-estáticos se usó un muestreo de 10 muestras por segundo.

3.11 Restricción del movimiento fuera del plano

Debido a la esbeltez de los especímenes se utilizó un sistema de restricción fuera del plano, tanto en los ensayos dinámicos como en los estáticos; en los ensayos dinámicos se utilizó el mismo sistema propuesto por (Carrillo, 2010), construido por perfiles de acero y formado por dos columnas de sección "I" (W14-8-53) conectadas en el extremo superior por medio de una placa conectada a una de las columnas y con un agujero alargado en un extremo y una placa atornillada a la viga de carga y con un tornillo libre (de 1.25 pulg de diámetro) en un extremo; como se muestra en la figura 3.24a.

En los ensayos estáticos se utilizaron perfiles de acero formado por dos columnas de sección I (W10x49), fijadas en la base por medio de una placa y un sistema de sujeción con anclas, en la parte superior se colocó un perfil CE (6") conector de manera lateral en el patín de las columnas por medio de tornillos, en el perfil CE se colocaron dos barras roscadas de 19 mm de diámetro que permitían el deslizamiento de la viga de carga en dirección longitudinal, como se muestra en la figura 3.24b.



a)



b)

Figura 3.24 Sistema de restricción de desplazamiento fuera del plano a) ensayos dinámicos, b) ensayos estáticos

4. CÁLCULO DE RESISTENCIA Y RIGIDEZ

Se realizó la predicción teórica con las propiedades de los materiales, obtenida de los ensayos de pilas, muretes y cilindros de concreto; para el diseño de los ensayos en cuanto a fuerzas y aceleraciones necesarias, así como el tipo de medidores a utilizar.

4.1 Resistencia a carga vertical

Haciendo el cálculo de la resistencia a carga vertical, se utiliza el área de acero de los castillos cuatro alambres del no. 2 (1/4") en cada castillo, con $f_{yreq} = 4,200 \text{ kg/cm}^2$, con las NTCM (2017):

$$P_R = F_R(f'_m A_T + \Sigma A_s f_{yreq}) \quad (10)$$

donde:

- F_R Factor de resistencia igual a 1 para estos ensayos;
- f'_m esfuerzo a compresión de la mampostería $f'_m = 36.9 \text{ kg/cm}^2$;
- A_T área bruta de la sección transversal del muro $A_T = t \times L = 6 \times 120 = 720 \text{ cm}^2$;
- A_s Área de acero de los alambres de los castillos $A_s = 4 \times 0.32 = 1.28 \text{ cm}^2$;

Sustituyendo valores se obtiene una resistencia a carga vertical:

$$P_R = 1 \times (36.9 \times 720 + 1.28 \times 4,200 \times 2) = 36,984 \text{ kg}.$$

4.2 Resistencia a flexocompresión en el plano del muro

Usando las expresiones de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería, NTCM (GDF, 2017); para la revisión de la resistencia a flexocompresión en el plano del muro:

$$M_R = F_R M_o + 0.3 P_u d \text{ si } P_u < P_R/3 \quad (11)$$

donde:

- $M_o = A_s f_{yreq} d'$ resistencia a flexión pura del muro,
- F_R Factor de resistencia igual a 0.8 si $P_u < P_R/3$,
- A_s Área del refuerzo colocada en cada extremo del castillo,
- d' Distancia entre los centroides del acero colocado en los extremos del muro,
- d Peralte efectivo,
- P_u Carga axial sobre el muro,
- P_R Resistencia a carga vertical.

El peralte efectivo es la distancia entre el centroide del acero en tensión y la fibra extrema a compresión de la sección transversal; $d = L - h_c/2$, h_c el peralte efectivo del castillo en el plano del muro. Por lo tanto $d = 120 - 7.5/2 = 116.25 \text{ cm}$.

La separación de los castillos es $d' = L - h_c = 120 - 7.5 = 112.5 \text{ cm}$

La carga aplicada P_u con $\sigma = 3 \text{ kg/cm}^2$; $P_u = P = A_T \times \sigma = 720 \times 3 = 2,160 \text{ kg}$; por lo que P es menor a $P_R/3$, sustituyendo valores tenemos:

$$M_R = [1 \times 1.28 \times 4,200 \times 112.5 + 0.3 \times 2,160 \times 116.25]/100,000 = 6.80 \text{ t} \cdot \text{m}$$

4.3 Resistencia a carga lateral

La resistencia a carga lateral es proporcionada generalmente por dos partes: la mampostería V_{mR} y el refuerzo horizontal V_{sR} .

$$V_R = V_{mR} + V_{sR} \quad (12)$$

4.3.1 Fuerza cortante resistida por la mampostería

Esta se calculó de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería, NTCM (GDF, 2017). La resistencia de la mampostería de cada muro, V_{mR} , es:

$$V_{mR} = F_R[(0.5v'_m A_T + 0.3P) \cdot f] \leq 1.5F_R v'_m A_T f \quad (13)$$

donde:

- v'_m Resistencia a compresión diagonal de la mampostería $v'_m = 6.43 \text{ kg/cm}^2$;
- A_T Área transversal del muro; incluyendo los castillos; $A_T = t \times L = 6 \times 120 = 720 \text{ cm}^2$,
- P Carga axial sobre el muro, se usó un esfuerzo vertical de $\sigma = 3 \text{ kg/cm}^2$; $P = 2,160 \text{ kg}$,
- f Factor por la relación de aspecto del muro, $f = 1$ para muro cuadrado

Sustituyendo valores se obtiene la resistencia a carga lateral resistida por la mampostería:

$$V_{mR} = 1[(0.5 \times 6.43 \times 720 + 0.3 \times 2160) \times 1] = 2962 \text{ kg}.$$

4.3.2 Fuerza cortante resistida por el acero de refuerzo horizontal

La contribución del refuerzo horizontal a la resistencia a cortante se calculó de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$V_{sR} = F_R \eta p_h f_{yh} A_T; \quad (14)$$

donde:

- η Factor de eficiencia del refuerzo horizontal, $\eta = \frac{V_{mR}}{F_R p_h f_{yh} A_T} (k_o k_1 - 1) + \eta_s$,
- p_h cuantía de acero de refuerzo horizontal en el muro; $p_h = \frac{A_{sh}}{s_h t} = \frac{0.124 \text{ cm}^2}{(18.5 \text{ cm} \times 6 \text{ cm})} = 0.00111$
 $p_h f_{yh} = 0.00111 \times 6000 \text{ kg/cm}^2 = 6.70 \text{ kg/cm}^2$

- k_o Factor para determinar la resistencia a fuerza cortante de la mampostería que depende se la relación de aspecto

$$k_o = \begin{cases} 1.3 \text{ si } H/L \leq 1.0 \\ 1.0 \text{ si } H/L \geq 1.5 \end{cases}$$

En este caso $k_o = 1.3$ ya que es cuadrado $H/L = 1$

- k_1 Factor de reducción de la resistencia fuerza cortante de la mampostería que depende de la cuantía de refuerzo

$$k_1 = 1 - \alpha p_h f_{yh}$$

$$k_1 = 1 - 0.045 \times 6.70 = 0.70$$

El valor de k_1 no será menor que $(1 - 0.1 f_{an} f'_m \alpha)$; $\alpha = 0.045 \text{ (kg/cm}^2\text{)}^{-1}$

$$(1 - 0.1 \times 1 \times 36.9 \times 0.045) = 0.83$$

$$\therefore k_1 = 0.83$$

f_{an} Cociente entre el área neta y el área bruta de las piezas $f_{an} = 1$
 η_s Factor parcial de eficiencia del refuerzo horizontal que depende de la resistencia a compresión de la mampostería

$$\eta_s = \begin{cases} 0.75 & \text{si } f'_m \geq 9 \text{ MPa } (90 \text{ kg/cm}^2) \\ 0.55 & \text{si } f'_m \leq 6 \text{ MPa } (60 \text{ kg/cm}^2) \end{cases}$$

Todos los valores de diseño f'_m fueron menores a 60 kg/cm^2 , por lo tanto $\eta_s = 0.55$
 Cuando el valor de $p_h f_{yh} > 0.1 f_{an} f'_m$, el valor de η_s se multiplicará por $0.1 f_{an} f'_m / (p_h f_{yh})$.

$$0.1 f_{an} f'_m = 0.1 \times 1 \times 36.9 = 3.69 \text{ kg/cm}^2$$

$$\therefore \eta_s = 0.55 \left(\frac{0.1 f_{an} f'_m}{p_h f_{yh}} \right) = 0.55 \times \left(\frac{0.1 \times 1 \times 36.9}{6.70 \text{ kg/cm}^2} \right) = 0.30$$

Sustituyendo los valores para obtener el factor de eficiencia η ; se tiene

$$\eta = \frac{2962 \text{ kg}}{1 \times 6.70 \text{ kg/cm}^2 \times 720 \text{ cm}^2} (1.3 \times 0.83 - 1) + 0.30 = 0.35$$

La fuerza cortante resistente debida al refuerzo horizontal, V_{SR}

$$V_{SR} = 0.35 \times 6.70 \text{ kg/cm}^2 \times 720 \text{ cm}^2 = 1688 \text{ kg}$$

La resistencia a carga lateral de los muros con refuerzo es la suma de la contribución de la mampostería y el acero de refuerzo

$$V_R = V_{mR} + V_{SR} = 2962 \text{ kg} + 1688 \text{ kg} = 4650 \text{ kg}$$

4.4 Rigidez del muro

Se realizó el cálculo de la rigidez del muro como un elemento en voladizo considerando las deformaciones por cortante y por flexión, mediante fórmulas de la mecánica de materiales:

$$Rig = \frac{1}{\left(\frac{H^3}{3E_m I} + \frac{H}{G_m A_T} \right)} \quad (15)$$

donde:

- H Altura del muro,
- E_m, G_m Módulo de elasticidad y de cortante de la mampostería, respectivamente,
- A_T Área de cortante, se toma como el área transversal del muro incluyendo castillos,
- I Momento de inercia del muro.

Para el momento de inercia de la sección se considera la contribución de los castillos mediante el criterio de la sección transformada, convirtiendo las áreas de concreto a mampostería.

$$I = \frac{tL_m^3}{12} + 2n \left[\frac{b_c h_c^3}{12} + \frac{A_c (L - h_c)^2}{4} \right] \quad (16)$$

donde:

- t espesor del muro,
 b_c, h_c Ancho y peralte del castillo, respectivamente,
 A_c Área del castillo,
 L Longitud total del muro, incluyendo castillos,
 L_m Longitud solo de la mampostería, $L_m = L - 2h_c$,
 n Relación de módulos del concreto y de la mampostería, $n = E_c/E_m$.
 $b_c = 6 \text{ cm}, \quad h_c = 7.5 \text{ cm}, \quad A_c = 6 \times 7.5 = 45 \text{ cm}^2, \quad L_m = 120 - 2 \times 7.5 = 105 \text{ cm},$
 $L - h_c = 112.5 \text{ cm}$

Propiedades mecánicas de la mampostería y del concreto:

$$E_c = 144,699 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_m = 16,449 \text{ kg/cm}^2$$

$$G_m = 7,887 \text{ kg/cm}^2$$

$$n = 144,699/16,449 = 8.80$$

Sustituyendo valores tenemos:

$$I = \frac{6 \times 105^3}{12} + 2(8.80) \left[\frac{6 \times 7.5^3}{12} + \frac{45 \times 112.5^2}{4} \right] = 3'087,606.9 \text{ cm}^4$$

$$Rig = \left[\frac{125^3}{3 \times 16,449 \times 3,087,606.9} + \frac{125}{7,887 \times 720} \right]^{-1} = 28,709.80 \text{ kg/cm}$$

Es decir $Rig = 28.71 \text{ t/cm}$.

5. COMPORTAMIENTO GENERAL DE LOS ESPECÍMENES

5.1 Introducción

Se presenta en este capítulo de manera general el comportamiento de los seis especímenes y los resultados obtenidos por cada tipo de ensaye. Para la interpretación de los resultados de los muros ensayados dinámicamente se realiza una serie de trabajos previos como son el procesamiento de las señales obtenidas con los transductores de desplazamiento, acelerómetros y celda de carga, también se realiza el cálculo de la fuerza lateral efectiva en el muro para este tipo de ensaye.

5.2 Procesamiento de señales

El filtrado de las señales de los muros ensayados en la mesa vibradora se realizó usando el programa DEGTRA.NET (Ordaz y Montoya, 2005). El procesamiento consistió en corregir la línea base del registro, y filtrado de las señales usando un filtro pasa banda usando las frecuencias límite que se muestran en la tabla 5-1. La selección de un procedimiento de filtrado juega un papel muy importante en la interpretación de los resultados obtenidos y debe de hacerse para cada caso específico de ensayo (Carrillo, 2010). Como se aprecia en la figura 5.1 en el registro M5 del muro MSR-D se hace la comparativa de la señal sin filtrar y filtrada, donde se puede notar que se eliminan las frecuencias altas de la señal.

En la figura 5.2 se muestra la curva de histéresis del registro M5 utilizado en el muro MSR-D en términos de carga lateral-distorsión, a) señal sin filtrar y b) filtrada; en c) y d) se muestra la comparativa por ciclos sin filtrar y filtrados, respectivamente. Como se observa el filtrado permitió eliminar las frecuencias no asociadas al comportamiento del muro.

Tabla 5-1 Parámetros del filtrado de las señales

| Tipo de señal | Tipo | f_{\min} (Hz) | F_{\max} (Hz) |
|-----------------------|------------|-----------------|-----------------|
| Desplazamiento | Pasa baja | - | 10 |
| Celda de carga | Pasa banda | 1 | 10 |
| Aceleración | Pasa banda | 1 | 10 |

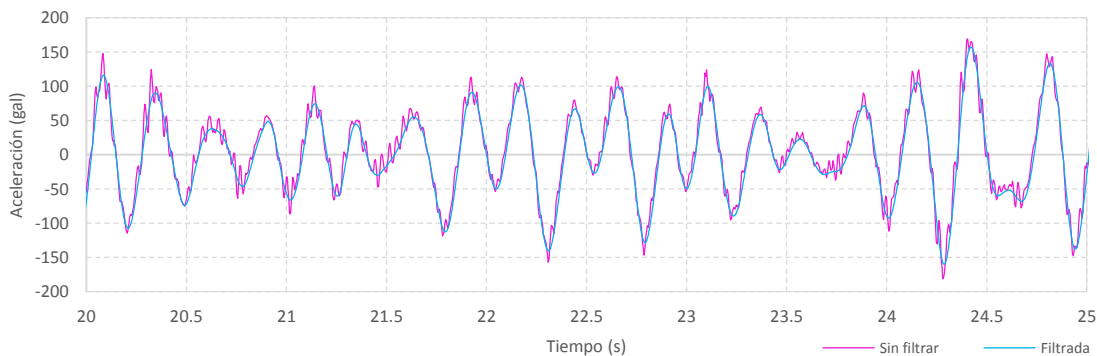


Figura 5.1 Comparativa de señal de aceleración MSR-D M5

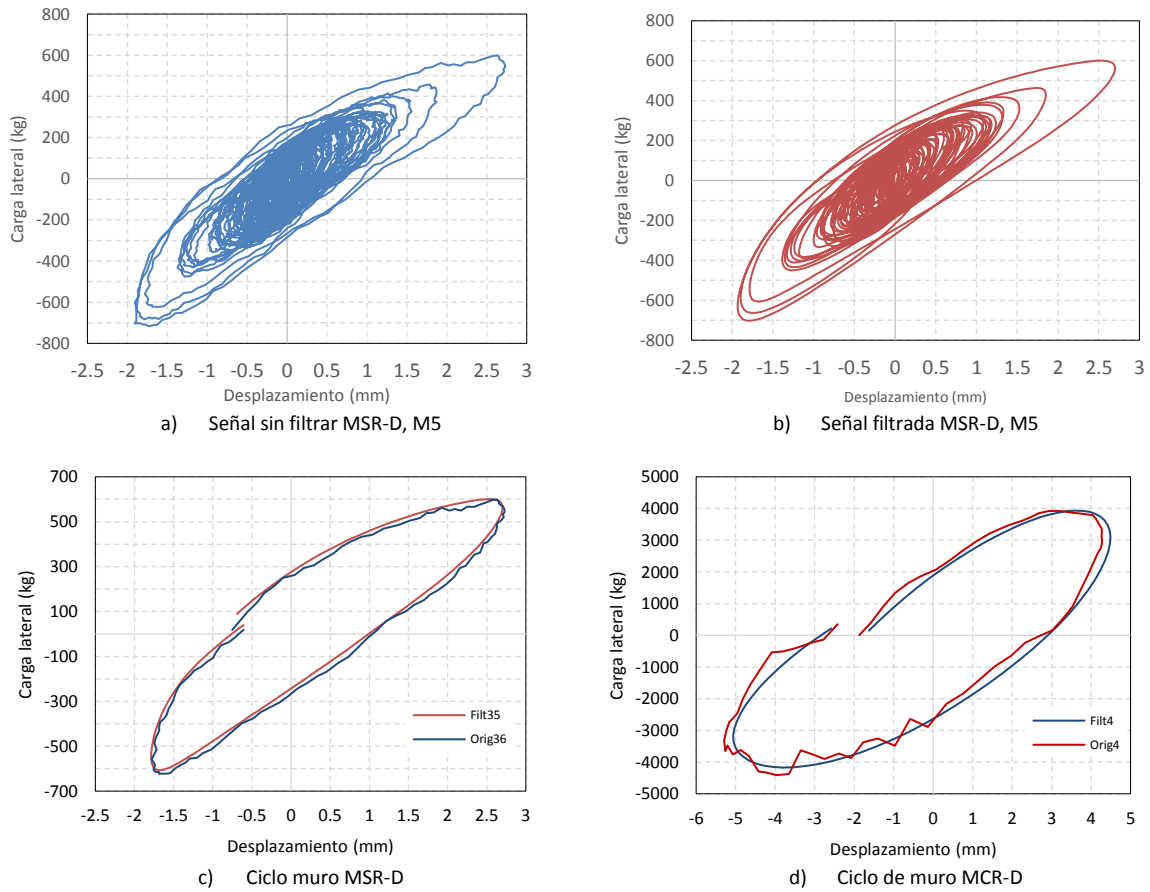


Figura 5.2 Comparación de señales filtradas y no filtradas

5.3 Fuerza lateral efectiva

La fuerza lateral sobre el espécimen se obtuvo de acuerdo a (Carrillo, 2010); en la cual menciona dos procedimientos para obtener la fuerza lateral: utilizando la celda de carga o a partir de la ecuación de movimiento.

Para nuestro caso se utilizó la celda de carga colocada justo antes de la conexión articulada (en el lado del espécimen). La celda mide la fuerza lateral que actúa sobre el espécimen debido a la fuerza inercial de la masa adicional del dispositivo. Adicional a esta fuerza se debe incluir la fuerza inercial de la masa del sistema de conexión entre la celda de carga y el espécimen, la masa de la viga de carga y la masa del espécimen que contribuye a la fuerza inercial. Por lo tanto la fuerza lateral efectiva se puede calcular como (Carrillo, 2010):

$$F_{esp}(t) = -[F_{cc}(t) + \ddot{X}_{abs(VC)}(t)(m_3\psi_2 + m_4 + m_5 + m_6 + m_7\psi_1)] \quad (17)$$

donde:

F_{cc} = fuerza medida por la celda de carga,

$\ddot{X}_{abs(VC)}$ = aceleración absoluta medida en la viga de carga,

ψ_2 =Fracción de la masa del sistema de conexión entre la celda de carga y el espécimen,

m_3 = masa del sistema de conexión articulado (rótulas, viga de conexión y celda de carga),
 m_4 = masa de la viga de carga,
 m_5 = masa de los bloques de plomo colocados sobre la viga de carga para proporcionar el esfuerzo vertical,
 m_6 = masa de la losa del espécimen
 m_7 = masa del espécimen
 ψ_1 = Fracción de la masa del espécimen (m_7) que contribuye a la masa efectiva ($\psi_1=0.5$)

Tabla 5-2 Pesos del sistema

| Peso asociado modelos MSR y MCR dinámicos (kg) | |
|--|---------|
| $m1$ | 6912.00 |
| $m2$ | 1953.01 |
| $m3$ | 432.82 |
| $m4$ | 670.09 |
| $m5$ | 1333.00 |
| $m6$ | 129.23 |
| $m7$ | 112.89 |
| ψ_1 | 0.5 |
| ψ_2 | 0.5 |

5.4 Modelo MSR-D

5.4.1 Evaluación de daño y falla

El ensaye se llevó a cabo en dos días; en la tabla 5-3 se muestra la descripción y número de movimientos para el ensaye del muro; realizándose los movimientos del 1 al 4 y al día siguiente los movimientos restantes.

Los movimientos M1 y M2 se usaron para obtener el periodo de vibrar del muro, los movimientos se aplicaron a una aceleración de 50 cm/s² o gal; la diferencia entre los movimientos fue la masa adicional (lingotes de plomo), colocada encima de la viga de carga; estos movimientos no presentaron daño significativo al muro debido a su baja aceleración.

El movimiento M3 y M4 fue una señal senoidal de 125 gal a 1500 gal en incrementos de 125 gal, con cinco ciclos en cada incremento; en el movimiento M3 el muro se agrietó en forma vertical cercano a los castillos, la cual continuó hasta aproximadamente un tercio de altura en ambos extremos del muro continuando la grieta y pasando por el centro del panel del muro en forma horizontal. En el movimiento M4 se pudo observar el mismo patrón de agrietamiento que en el movimiento anterior. En el movimiento de ruido blanco M5 no se observó la generación de nuevas grietas en el panel y los castillos del muro. El movimiento M6 generó grietas en el sentido contrario de las que ya presentaba

el muro, formándose un patrón de agrietamiento en forma de “H”, y presentándose algunos pequeños desprendimientos de tabique de la zona central del muro.

En el movimiento M7 de ruido blanco a 30 gal se generaron grietas en otras zonas de la parte central del muro con desprendimiento de tabiques quedando en algunos de ellos agujeros; se presentaron nuevas grietas en la parte de los castillos y también para algunas grietas de los movimientos anteriores se observó su prolongación.

En el movimiento M8 de 35 gal se presentaron fisuras en forma horizontal a la mitad de la altura en los castillos, así también las grietas tenían ancho mayor al observado en el registro anterior; también hubo más desprendimientos de las piezas de tabique y se generó un agujero.

En los movimientos M9 y M10, que fueron la repetición 1 y 2, respectivamente, del movimiento M8, se observó un pandeo en la parte central del castillo, formándose un bloque del panel del muro, también en la zona central del muro se hicieron más grandes los agujeros desprendiéndose algunas piezas de tabique, las cuales se quedaron atoradas entre las grietas generando que estas ya no se cerraran. En la parte inferior del castillo cercano a la conexión con la viga de desplante se presentó el desprendimiento del concreto del recubrimiento aproximadamente a dos hiladas de altura. El patrón final de agrietamiento se mantuvo en forma de “H” generándose mayor agrietamiento en la parte central del panel y laterales como se muestra en las imágenes de la figura 5.3.

Tabla 5-3 Registros de movimientos muro MSR-D

| Número de prueba | Nombre | Descripción |
|------------------|--------|---|
| 1 | M1 | 50 gal de aceleración sin masa adicional sobre viga de acoplamiento |
| 2 | M2 | 50 gal de aceleración con masa adicional sobre viga de acoplamiento |
| 3 | M3 | 125 a 1500 gal al 100% |
| 4 | M4 | 125 a 1500 gal al 125% |
| 5 | M5 | Ruido Blanco 10 gal RMS 20 s de registro |
| 6 | M6 | Ruido Blanco 20 gal RMS 30 s de registro |
| 7 | M7 | Ruido Blanco 30 gal RMS 30 s de registro |
| 8 | M8 | Ruido Blanco 35 gal RMS 30 s de registro |
| 9 | M9 | Ruido Blanco 35 gal RMS 30 s de registro, repetición 1 |
| 10 | M10 | Ruido Blanco 35 gal RMS 30 s de registro, repetición 2 |

Durante la sujeción de la viga de carga con la losa del muro MSR-D aparecieron unas pequeñas fisuras en la parte superior del muro (entre las dos primeras hiladas de tabique) con la unión de la dala y el muro en forma casi horizontal; las cuales durante la aplicación del primer registro de movimiento de la mesa vibradora prolongaron apreciablemente; las fisuras no se repararon con ningún material.

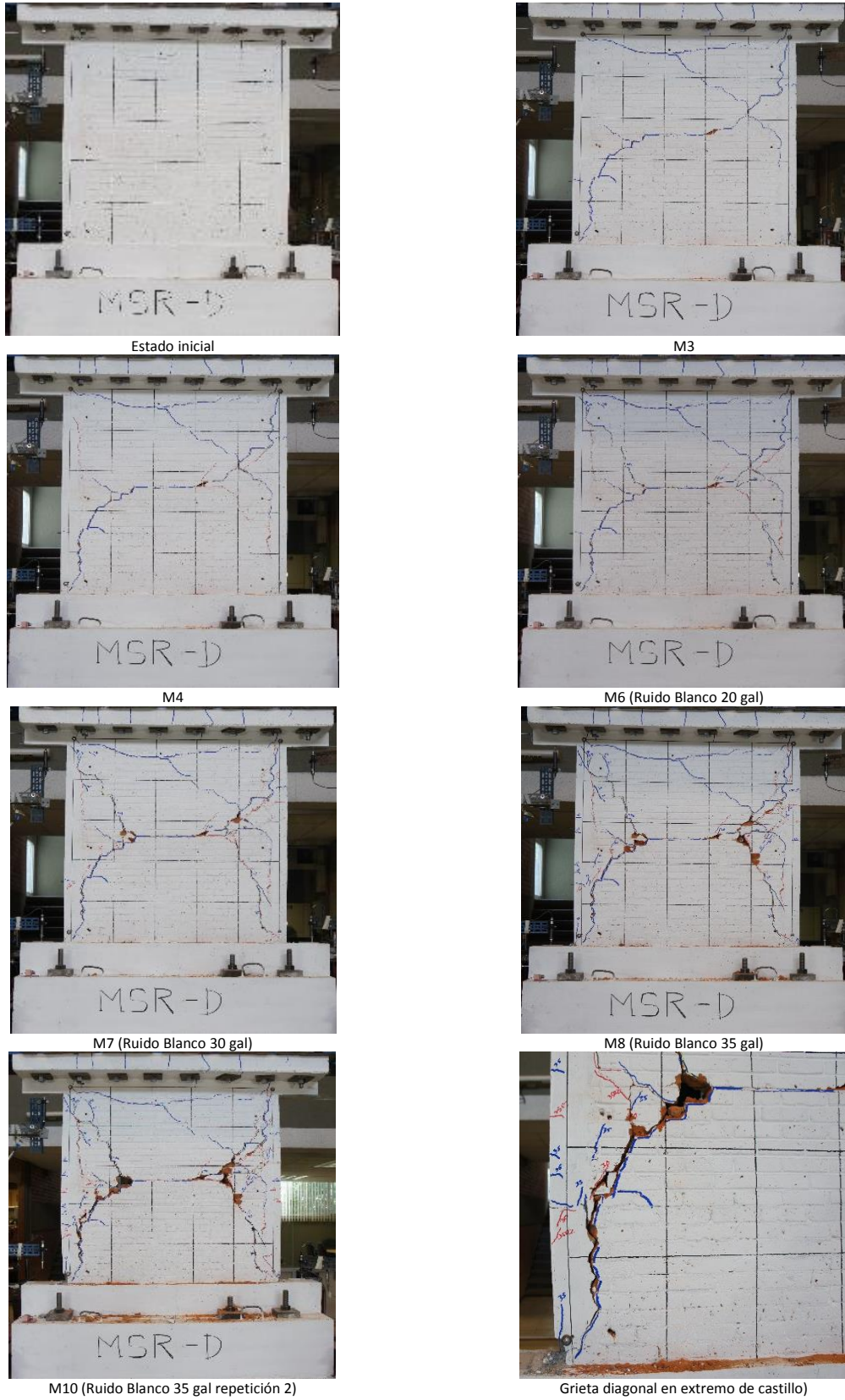


Figura 5.3 Fotografías del estado de daño muro MSR-D

5.4.2 Comportamiento histerético

En la figura 5.4 se muestra la curva de histéresis del muro MSR-D, se filtraron las señales de fuerza y desplazamiento con el programa DEGTRA; se muestran los histeréticos por movimiento del M3 al M10 y también se muestra la curva envolvente. Los valores obtenidos de la curva envolvente se muestran a continuación: una carga de agrietamiento de 1,248 kg a una distorsión de 0.00028 mm/mm, la resistencia máxima que se alcanzó fue de 2,141 kg a distorsión de 0.01 mm/mm, y una carga última de 1,260 kg a una distorsión de 0.024 mm/mm, en el lado positivo; una carga de agrietamiento de 1,855 kg a una distorsión de 0.0026 mm/mm, la resistencia máxima que se alcanzó fue de 2,349 kg a distorsión de 0.009 mm/mm, y una carga última de 2,063 kg a una distorsión de 0.019 mm/mm, en el lado negativo.

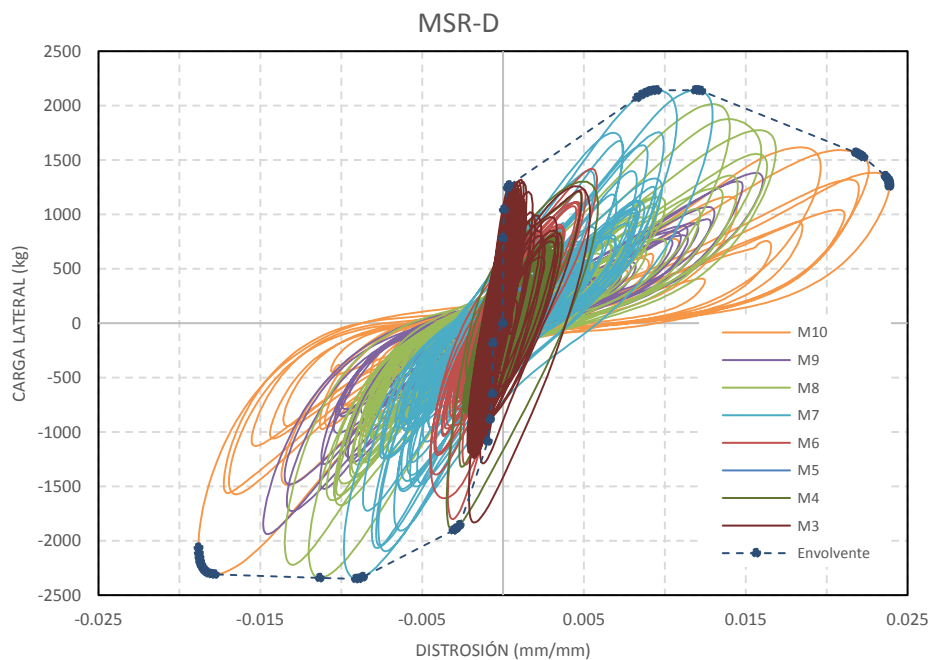


Figura 5.4 Curva de histéresis muro MSR-D

5.5 Modelo MSR-E

5.5.1 Evaluación de daño y falla

Durante el ensaye del muro en el ciclo $0.5V_{mR}$ en la primera rama casi al llegar a la carga objetivo, el gato hidráulico tuvo una vibración, lo cual llevó a que se aplicara una carga mayor en dicha rama y esto hizo que se agrietara el muro en diagonal; se logró controlar la vibración del gato hidráulico casi al instante; en los ciclos subsecuentes se llevaron a cabo con normalidad y cumpliendo con la razón de aplicación de carga y distorsión, alcanzando los puntos de carga y distorsión correspondiente a la historia de carga.

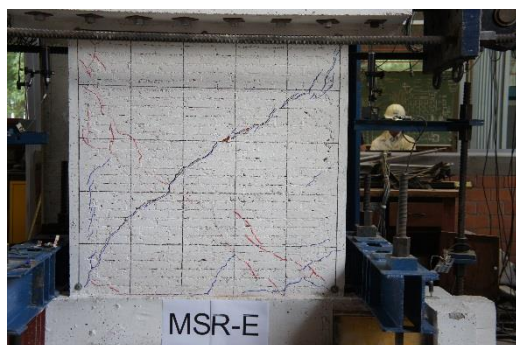
Durante el ensayo se registraron dos grandes grietas con una inclinación cercana a 45° (azul) y otra cercana a 30° (roja) las cuales se presentaron a un desplazamiento de 0.002. Las grietas diagonales penetraron en los extremos inferior y superior de los castillos (del lado donde se ubicó el gato hidráulico); en el extremo superior se registró una gran cantidad de grietas inclinadas, se presentó desconchamiento del concreto y se pudo observar en esa zona que el acero longitudinal presentaba un doblez. Se alcanzó el valor de distorsión de ciclo de 0.008, la evaluación del daño se muestra en la figura 5.5.



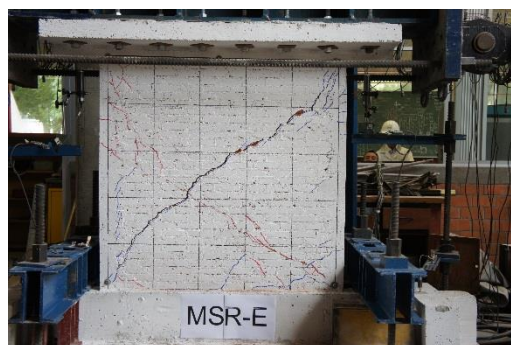
Estado inicial



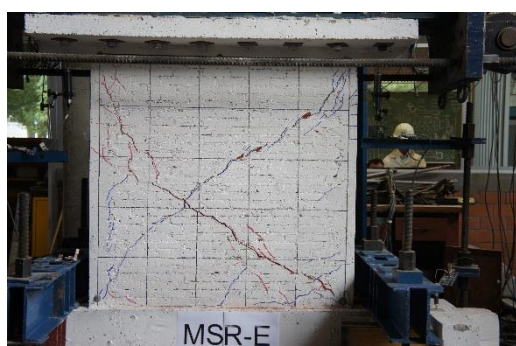
$\gamma = 0.002$



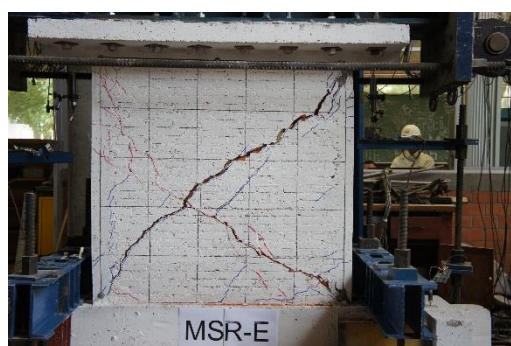
$\gamma = 0.004$



$\gamma = 0.006$



$\gamma = 0.008$ (primer ciclo)



$\gamma = 0.008$ (repetición)



Grietas diagonales en extremos de castillos

Figura 5.5 Fotografías del estado de daño muro MSR-E

5.5.2 Comportamiento histérico

En la figura 5.6 se muestra la curva de histéresis del muro MSR-E. Se obtuvo para los ciclos positivos una carga de agrietamiento de 1,736 kg a una distorsión de 0.0005 mm/mm, la carga máxima fue de 3,803 kg con una distorsión de 0.0055, y una carga última de 1,483 kg con distorsión 0.0085 mm/mm. Para el ciclo negativo la carga de agrietamiento fue de 2,881 kg con distorsión de 0.00046 mm/mm, carga máxima 3413 kg con una distorsión de 0.0015 mm/mm y una carga última de 2546 kg con distorsión 0.009 mm/mm.

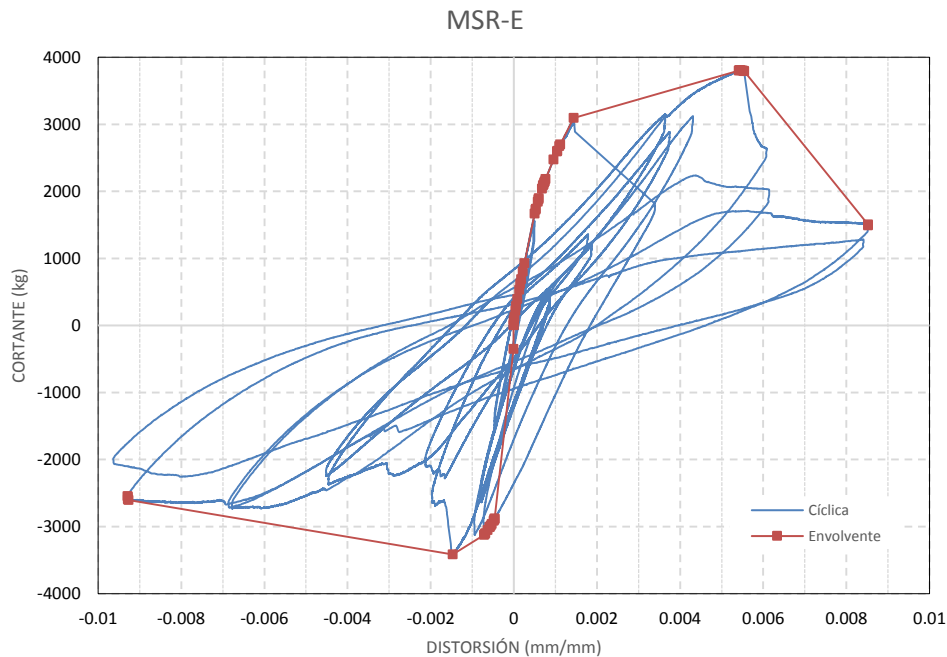


Figura 5.6 Curva de histéresis muro MSR-E

5.6 Modelo MSR-M

5.6.1 Evaluación de daño y falla

Para el ensaye del muro MSR-M se realizó un primer ciclo de carga de 0 a $0.25V_{mR}$, en el cual tuvo un comportamiento elástico lineal, el segundo ciclo fue controlado por distorsión hasta llevarlo a la falla. En el desarrollo del ensaye se observó que en el primer ciclo de carga no se presentó ninguna fisura en el muro, durante el segundo ciclo se presentó el primer agrietamiento diagonal en una inclinación a

45°, la grieta penetró en los castillo a una altura aproximada de 20 cm (seis hiladas de tabique) en ambos extremos; se formaron dos paneles triangulares del muro en lo cual se pudo observar que el panel superior se desplazó aproximadamente 2 cm con respecto al panel inferior; en la figura 5.7 se muestra el desarrollo y evolución del daño durante el ensaye.

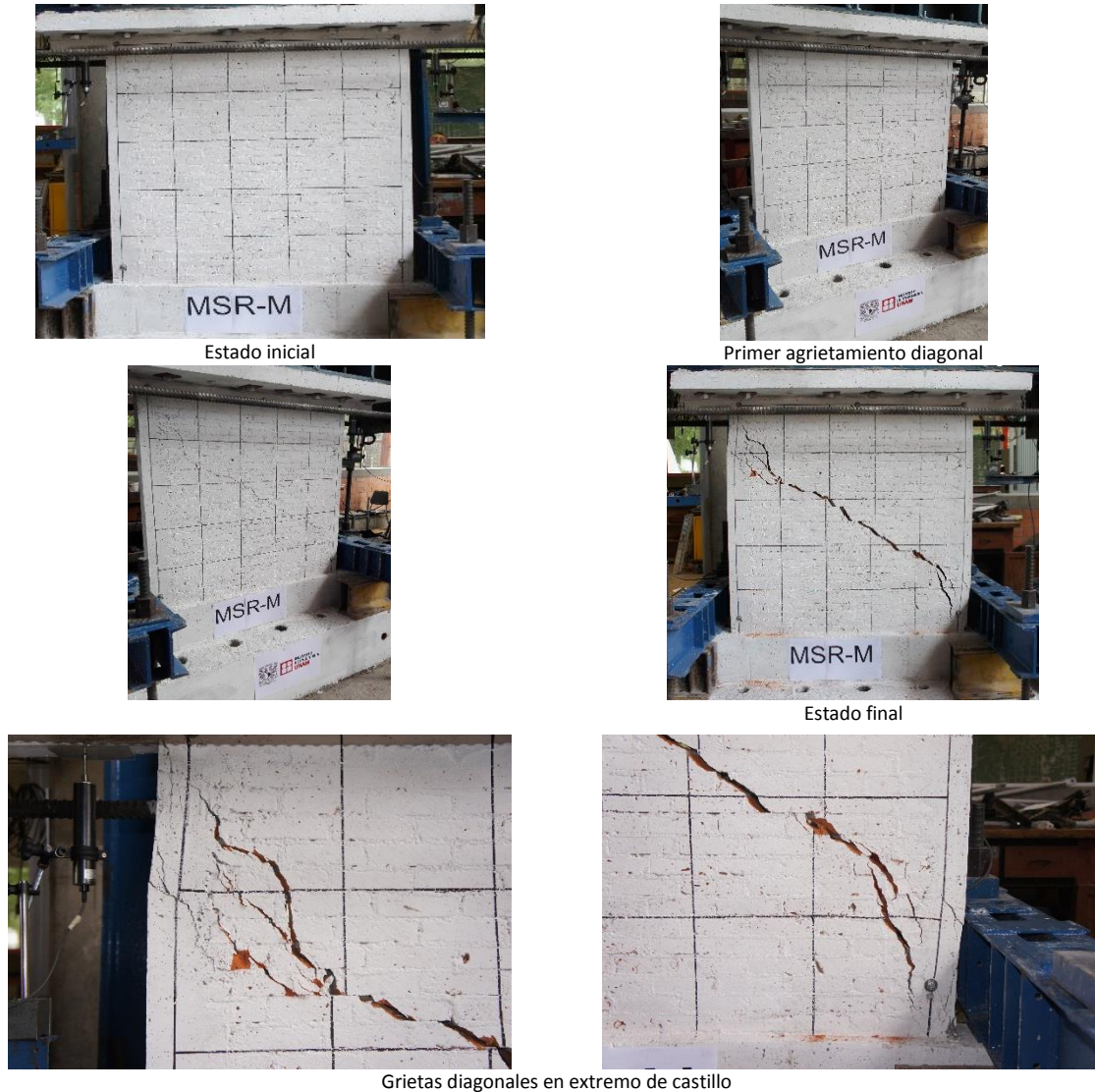


Figura 5.7 Fotografías del estado de daño muro MSR-M

5.6.2 Comportamiento monotónico

La curva monotónica del muro MSR-M se presenta en la figura 5.8. Se realizó un ciclo de carga y descarga a un valor de 1,500 kg, antes de aplicar la carga monotónica. Se alcanzó un valor de carga máxima de 2,846 kg a una distorsión de 0.001 mm/mm; y una carga última de 1,911 kg a una distorsión de 0.0201 mm/mm.

El comportamiento monotónico no resultó como se había esperado. Se supuso que esta curva debería mostrar resistencia por arriba de la envolvente de ensaye cíclico. Sin embargo, esto no fue así. Por esta

razón la cura monotónica no pudo usarse como envolvente (Backbone) del modelo IMK para ajustar los parámetros.

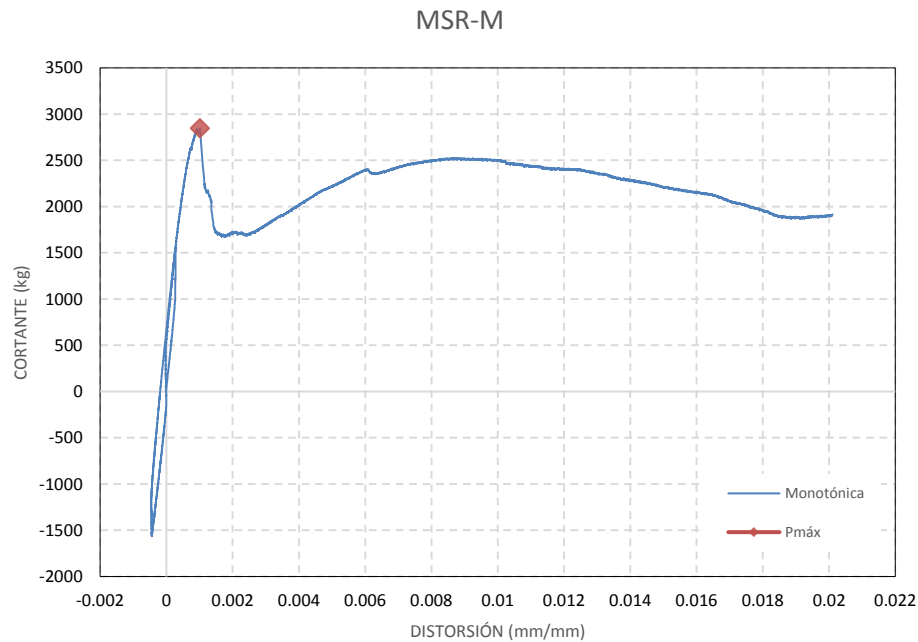


Figura 5.8 Curva monotónica muro MSR-M

5.7 Modelo MCR-D

5.7.1 Evaluación de daño y falla

El ensayo del muro MCR-D se llevó a cabo en un día; en la tabla 5-4 se muestra la descripción y número de movimientos para el ensayo del muro, llevándose a cabo un total de 10 movimientos de ruido blanco desde 5 gal hasta 95 gal con incrementos de 10 gal.

En los movimientos de ruido blanco del M2 1 al M2 3 no presentó daño alguno teniendo un comportamiento elástico.

En el movimiento M2 4 de ruido blanco a 35 gal se presentó el primer agrietamiento en el muro, formándose dos grietas en forma horizontal una a lo largo de la tercera junta del panel de mampostería y la otra en la hilada ocho con una longitud aproximada de 30 cm, prolongándose esta última en diagonal hasta el centro del muro hasta la grieta de la hilada tres; ambas grietas se localizaron en las hiladas donde se ubicaba el refuerzo horizontal.

En el movimiento de ruido blanco de 45 gal M2 5, se formó una grieta en forma diagonal en la parte inferior derecha del muro la cual atravesó algunas piezas de los tabiques, además se generaron unas pequeñas grietas horizontales de longitud aproximada de 12 cm en la parte izquierda del muro.

En el movimiento M2 6 de ruido blanco de 55 gal, el muro presentó una grieta diagonal a 45° en todo el panel del muro. En el movimiento M2 7 de ruido blanco de 65 gal, algunas grietas que ya tenía el muro se prolongaron y se formaron grietas horizontales nuevas a la altura de la hilada donde se

encontraba el quinto refuerzo horizontal, además de unas grietas verticales en la parte inferior del muro entre el panel y el castillo derecho.

En el movimiento M2 8 de ruido blanco de 75 gal, se presentó una grieta en el castillo izquierdo en la parte inferior la cual fue la prolongación de la grieta que se ubicaba en la tercera hilada, desprendiendo algunos fragmentos del recubrimiento del castillo; en el castillo izquierdo se continuaron las grietas verticales entre el panel del muro y el castillo.

En el movimiento M2 9 de ruido blanco de 85 gal, se formaron unas grietas en la parte inferior del muro entre la base del muro y la viga de cimentación de aproximadamente 40 cm de longitud, una de cada lado del muro; se desprendieron algunos pedazos pequeños de tabique en la parte inferior izquierda y se prolongaron unas grietas que ya tenía el muro.

En el movimiento M2 10 de ruido blanco de 95 gal se formó una grieta a 45° en el centro del panel del muro, que fue la continuación de grietas a de movimientos anteriores con esta misma inclinación; en la parte inferior izquierda se desprendieron pedazos de tabique y el concreto del castillo, las barras longitudinales del castillo se pandearon.

En la figura 5.9 se muestra el desarrollo y la evolución del daño durante el ensaye.

Tabla 5-4 Registros de movimientos muro MCR-D

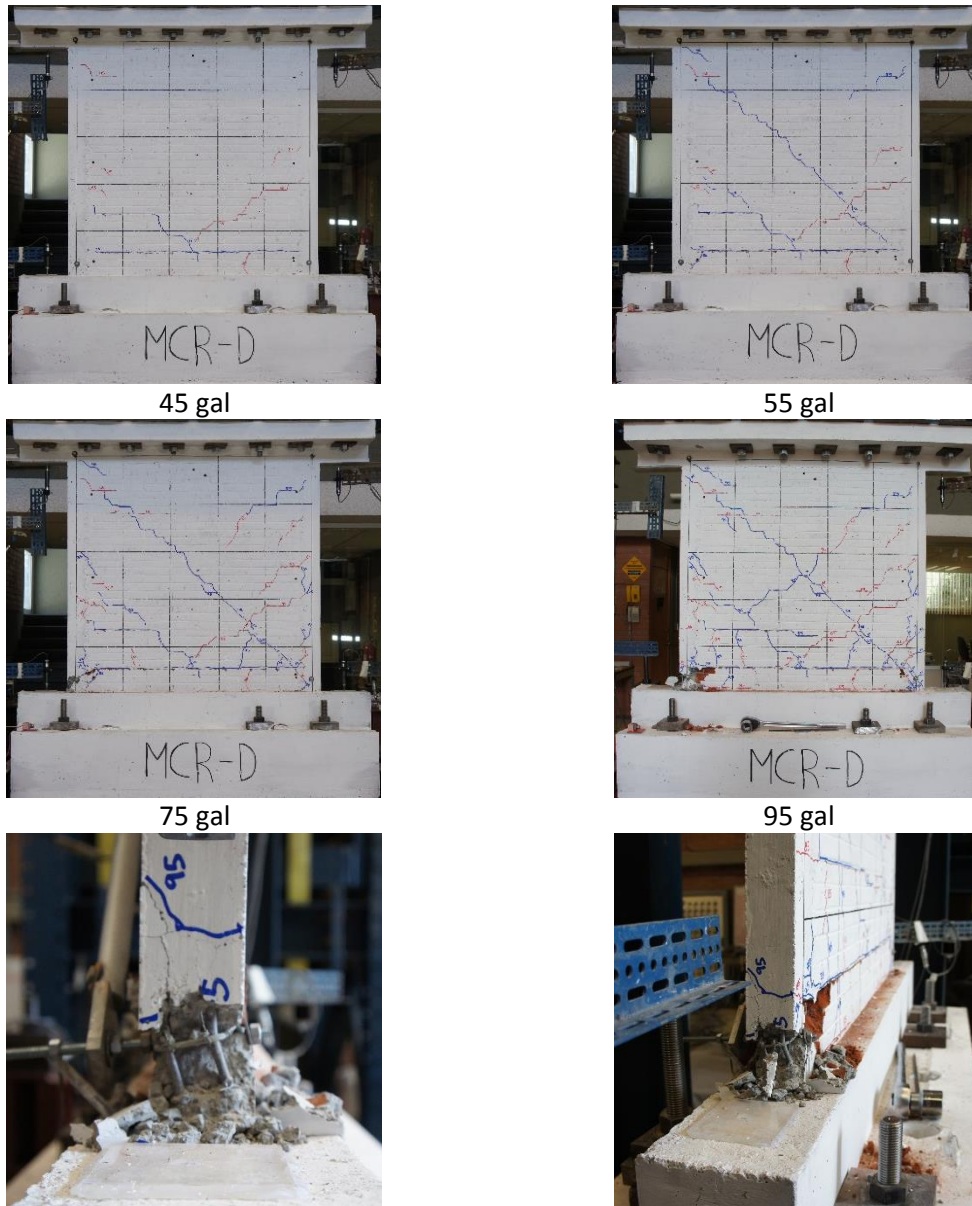
| Número de prueba | Nombre | Descripción |
|------------------|--------|--|
| 1 | M2 1 | Ruido Blanco 5 gal RMS 30 s de registro |
| 2 | M2 2 | Ruido Blanco 15 gal RMS 30 s de registro |
| 3 | M2 3 | Ruido Blanco 25 gal RMS 30 s de registro |
| 4 | M2 4 | Ruido Blanco 35 gal RMS 30 s de registro |
| 5 | M2 5 | Ruido Blanco 45 gal RMS 20 s de registro |
| 6 | M2 6 | Ruido Blanco 55 gal RMS 30 s de registro |
| 7 | M2 7 | Ruido Blanco 65 gal RMS 30 s de registro |
| 8 | M2 8 | Ruido Blanco 75 gal RMS 30 s de registro |
| 9 | M2 9 | Ruido Blanco 85 gal RMS 30 s de registro |
| 10 | M2 10 | Ruido Blanco 95 gal RMS 30 s de registro |



Estado inicial



35 gal



Daño en castillo inferior. Pandeo de acero longitudinal de castillo

Figura 5.9 Fotografías del daño del muro MCR-D

5.7.2 Comportamiento histerético

En la figura 5.10 se muestra la curva de histéresis del muro MCR-D, las señales de fuerza y desplazamiento se filtraron con el programa DEGTRA; se muestran los histeréticos por cada movimiento M2 1 al M2 10 y también se muestra la envolvente positiva y negativa. Los valores obtenidos de la curva envolvente se muestran a continuación: carga de agrietamiento 2,437 kg a una distorsión de 0.0008 mm/mm, la carga máxima que alcanzó (resistencia) fue de 4,361 kg a una distorsión 0.0064 mm/mm, carga última de 3,274 kg a una distorsión de 0.0085 mm/mm en el sentido positivo; carga de agrietamiento 2,076 kg a una distorsión de 0.00086 mm/mm, carga máxima de 4,173

kg a una distorsión de 0.0030 mm/mm y una carga última de 3,163 kg a una distorsión de 0.0074 mm/mm en el sentido negativo.

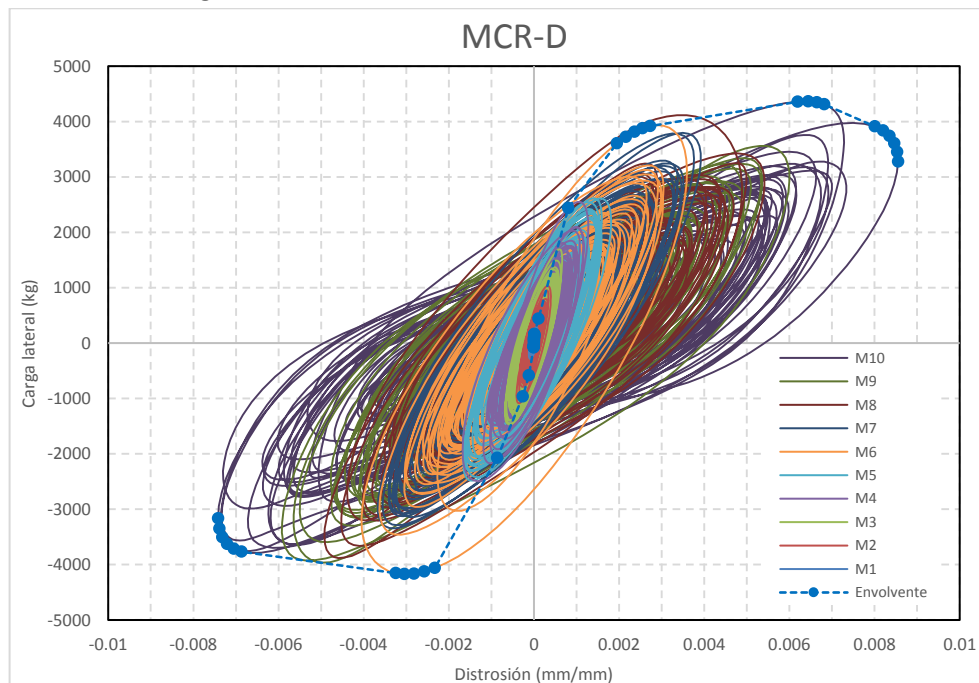


Figura 5.10 Curva de histéresis muro MCR-D

5.8 Modelo MCR-E

Debido a que se tuvo un problema en el ensaye del muro con refuerzo de ensaye monotónico MCR-M, y teniendo solo dos muros con refuerzo se decidió que el muro restante se ensayaría de manera monotónica y utilizarían los datos del muro a escala 1:2 ensayado por (Flores y Guzman, 2015); el cual fue ensayado en el laboratorio de estructuras del CENAPRED.

Este modelo sirvió para verificar la facilidad constructiva e identificar los posibles problemas al reproducir a escala 1:2 la construcción del muro de mampostería y comprobar la factibilidad de usar piezas recortadas de tabique de tamaño normal, así como de construir un muro con alambres de 4 mm (5/32 pulg) de diámetro colocado horizontalmente en juntas de 6 mm de espesor. (Flores y Guzman, 2015)

5.8.1 Evaluación de daño y falla

Siguiendo la historia de carga se aplicaron ciclos controlados por fuerza hasta el agrietamiento del muro, seguidos de ciclos controlados por desplazamiento.

El primer ciclo de carga se llevó, en la etapa positiva (ciclo +1, empujando al muro hacia el Oeste) hasta un cortante de 0.6 t en donde se midió un desplazamiento horizontal de losa de +0.185 mm que representa una distorsión de +0.00015. Con el primer ciclo se pudo calcular el valor de rigidez lateral del modelo resultando de 32 t/cm.

Posteriormente se completó el ciclo negativo -1 (jalando al muro hacia el Este) hasta -0.6 t y se repitió el ciclo, seguido de los ciclos completos 2, 3 y 4, para cargas de ± 0.6 , ± 1.2 y ± 1.2 t. En el quinto ciclo se presentó el primer agrietamiento inclinado a una carga de +2.4 t, y llegado a una distorsión de +0.0013 mm/mm.

Se continuó con el ensaye realizando hasta el ciclo ± 21 . En el ciclo -18 se identificó un corrimiento a la altura de la junta de la primera hilada, junta que había sido identificada previamente al ensaye por contar con una grieta horizontal a lo largo de ella. Este efecto se produjo durante la construcción del modelo donde posiblemente se flexionó el muro fuera del plano en maniobra para cimbrar las primeras mitades de los castillos (Flores y Guzman, 2015).

5.8.2 Comportamiento histérico

Como se mencionó anteriormente nuestro espécimen se perdió y se sustituyó por el de (Flores y Guzman, 2015).

En la figura 5.11 se muestra la curva de histéresis del espécimen MCR-E y la envolvente para ambos ciclos positivo y negativo; se puede notar que se exhibió ciclos de histéresis estables y amplios lo cual es consistente con ensayos de muros de mampostería con piezas macizas de arcilla hechas de forma artesanal. El agrietamiento inicial se dio para una carga de 2,400 kg, la carga máxima alcanzada resultó de 5,080 kg en los ciclos positivos y de -4,700 kg en los ciclos negativos (Flores y Guzman, 2015).

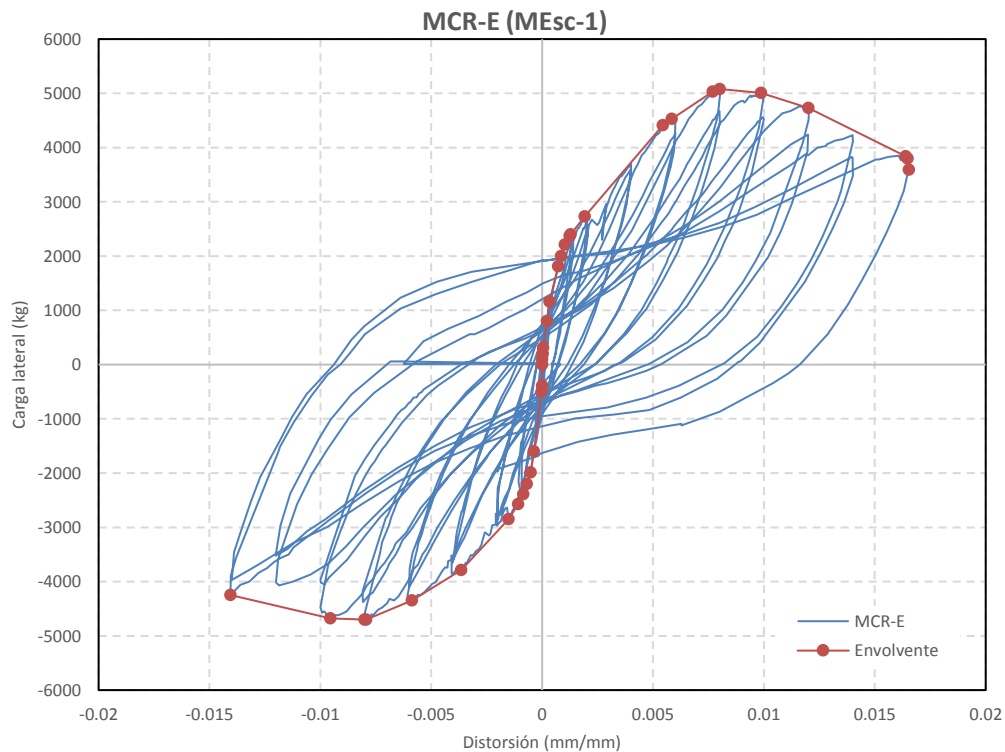


Figura 5.11 Curva de histéresis del muro MCR-E (MEsc-1 (Flores y Guzman, 2015)).

5.9 Modelo MCR-M

5.9.1 Evaluación de daño y falla

Para el muro MCR-M se realizó un ciclo de carga a $0.25 V_{mR}$ no se presentó agrietamiento en el muro, después del ciclo de carga se aplicó la carga monótona creciente controlada por desplazamiento hasta llevar a la falla el muro. El patrón de agrietamiento que se presentó durante la aplicación de la carga fue el siguiente: se presentó una grieta horizontal por deslizamiento en la junta (segunda hilada) en la parte inferior del muro la cual se prolongó y penetró en el castillo del lado derecho, en el lado izquierdo a partir aproximadamente de la mitad de la longitud del muro la fisura siguió por la pieza de mampostería una hilada continuo horizontal y después continuo horizontal hasta llegar al castillo sin penetrar y continuo hasta $2/5$ partes de altura del muro; se observó una grieta inclinada del lado izquierdo del muro a través de las juntas y posteriormente en las piezas de mampostería.



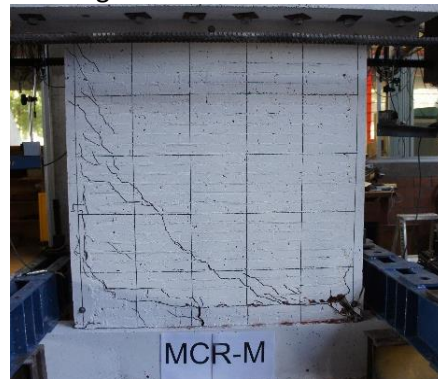
Estado inicial



Agrietamiento horizontal



Agrietamiento inclinado



Estado final



Levantamiento de muro con cimentación



Grieta diagonal en castillo (parte inferior)

Figura 5.12 Fotografías del estado de daño muro MCR-M

5.9.2 Comportamiento monotónico

La figura 5.13 muestra la curva monotónica del muro MCR-D, se realizó un ciclo de carga y descarga a un valor de 1500 kg, antes de aplicar la carga monotónica. Se obtuvo un valor de carga máxima de 5,153 kg a una distorsión de 0.0062 mm/mm y una carga última de 4,736 kg a una distorsión de 0.0190 mm/mm

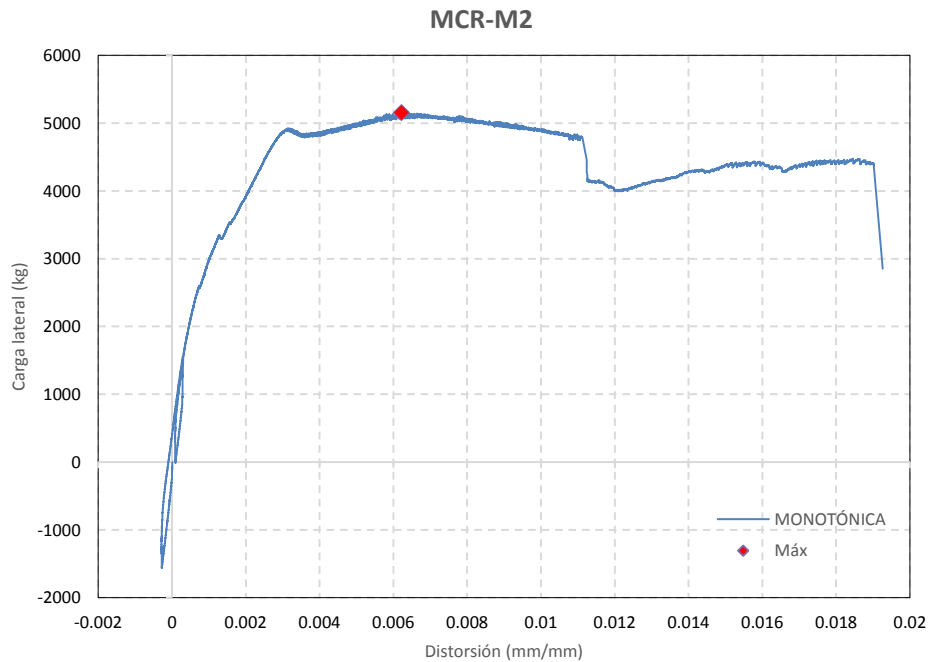


Figura 5.13 Curva monotónica muro MCR-D

El comportamiento del muro estuvo dominado por flexión. Este comportamiento a flexión se explica porque la condición de frontera del muro en curvatura doble, no se produjo en el ensaye pseudo-estático. Lo anterior significa que la curva monotónica obtenida no fue apropiada para usarse como curva principal (Backbone).

6. OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA EL MODELO IMK

6.1 Introducción

Se realizó la calibración y obtención de los parámetros para el modelo IMK de los muros MSR y MCR dinámicos y estáticos; se utilizó el software OpenSees el cual tiene implementado el modelo histerético IMK de pico orientado.

Como una medida de comparación entre los modelos histerético experimental y simulación se usó la energía disipada en los muros, la cual se calculó con el área comprendida dentro de los ciclos histeréticos de carga lateral-desplazamiento.

Se obtuvieron para el modelo IMK de pico orientado dos energías. En la primera se utilizaron los parámetros de deterioro cíclico (λ_s , λ_c , λ_a y λ_k) valores de 10,000 (asignándole estos valores no tendría degradación y así se puede comparar con la energía experimental); y los parámetros de la rigidez inicial, K_0 , fuerza y desplazamiento máximo (δ_c , F_c) y el punto de la fuerza y desplazamiento último (δ_u , F_u), para los valores de la envolvente simplificada.

Para el cálculo de la segunda energía se utilizaron los valores del modelo histerético de pico orientado IMK que se muestran en las tablas correspondientes a cada muro, y se utilizó la curva principal simplificada modificada.

La energía disipada del modelo de pico orientado IMK se obtuvo mediante la utilización de los parámetros de los modelos de cada muro, y a los valores de los parámetros de deterioro cíclico (λ_s , λ_c , λ_a y λ_k) se les asignó un valor de 10,000; con este valor el modelo no tendría degradación y se podría tener una comparación de la energía con el modelo experimental.

6.2 Curva principal (Backbone curve)

La obtención experimental de las curvas monotónicas tuvo distintos inconvenientes como ya se mencionó, por lo que fue necesario incluir la curva monotónica en el proceso de ajuste de los parámetros

La curva principal o backbone se obtuvo a partir de la envolvente de la curva histerética de cada muro sin y con refuerzo; la curva se simplificó a una curva trilineal. Para obtener los parámetros para el modelo histerético IMK, el punto de la fuerza y desplazamiento máximo (δ_c , F_c) y el punto de fuerza y desplazamiento último (δ_u , F_u) son los mismo de la envolvente original, para el punto de fluencia (δ_y , F_y) se determina con las condiciones siguientes:

1. Área hasta la fluencia: $\frac{F_y \delta_y}{2} = a(\delta_y)$ donde $a(\delta_y)$ es el área bajo la curva de la envolvente original hasta la deformación δ_y

2. Área del punto de fluencia al punto de resistencia: $\frac{(F_y+F_c)}{2}(\delta_c - \delta_y) = a(\delta_c) - a(\delta_y)$

despejando F_y de la primera condición y sustituyéndola en la segunda se tiene

$$R = \left(\frac{a(\delta_y)}{\delta_y} + \frac{F_c}{2} \right) (\delta_c - \delta_y) - (a(\delta_c) - a(\delta_y))$$

donde $R = 0$ cuando se cumplen ambas condiciones.

Se utiliza una búsqueda binaria para hacer $R(\delta_y) = 0$ para valores de δ_y en el rango de $[0, \delta_c]$.

Se ha visto que R tienen un máximo en ese rango de modo que para evitar que en la búsqueda δ_y tienda a δ_c , el límite superior de la búsqueda se dejó como $\delta_y/3$.

En la figura 6.1 se muestra las características del cálculo de las áreas para la obtención de la curva trilineal simplificada.

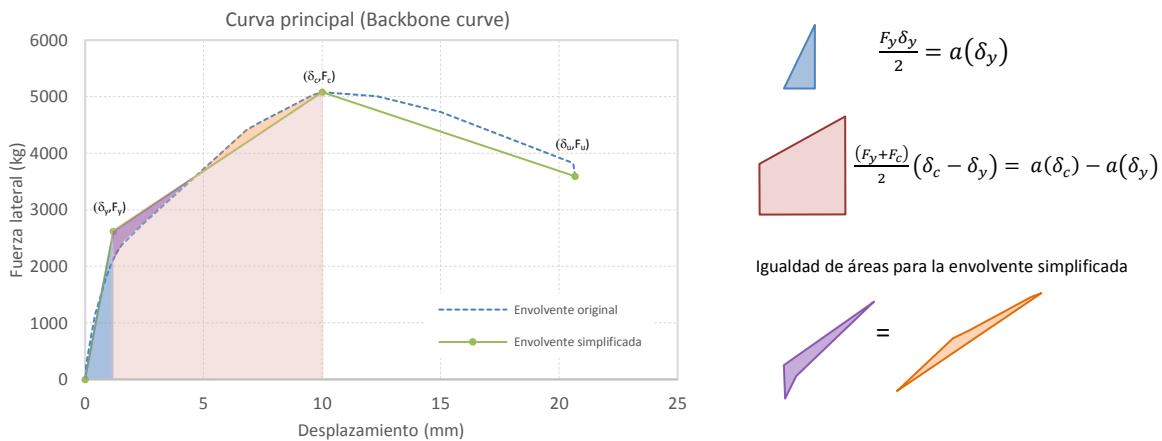


Figura 6.1 Envolvente simplificada y curva principal

Una vez obtenida la curva principal simplificada de la envolvente principal se decidió modificar la curva simplificada multiplicando el punto de desplazamiento y fuerza máximo (δ_c, F_c) y la fuerza última (F_u) por un factor ffc (factor de fuerza resistencia máxima) y ffu (factor de fuerza resistencia última), respectivamente, estos factores aplicaron para los cuatro muros; los valores variaron de 1.1 a 1.3. En la tabla 6-1 se muestran los factores de modificación de la curva trilineal modificada.

Tabla 6-1 Parámetros de modificación de envolvente trilineal

| Parámetro\Muro | MSR-D | MSR-E | MCR-D | MCR-E |
|--|-------|-------|-------|-------|
| ffc (factor de fuerza resistencia máxima) | 1.25 | 1.15 | 1.2 | 1.1 |
| ffu (factor de fuerza resistencia última) | 1.2 | 1.3 | 1.15 | 1.25 |

6.2.1 Modificación de la curva principal

La curva monotónica representa la respuesta que se obtendría para un elemento ensayado bajo carga monotónica y la envolvente cíclica encierra las fuerzas y los desplazamientos bajo cargas cíclicas; la envolvente cíclica varía de acuerdo al historial de carga cíclica aplicada, como se muestra en la figura 6.2 y la curva principal deriva de las envolventes cíclicas que se basan típicamente en protocolos de carga estandarizados. Para el análisis estático no lineal, donde los efectos cíclicos de la carga sísmica no se modelan directamente en el análisis, los modelos de componentes no lineales deben definirse en función de la envolvente cíclica degradada. Para el análisis dinámico no lineal, la elección de las curvas de los componentes dependerá de cómo se modela la degradación cíclica. El modelado directo de la degradación cíclica comienza con una curva monotónica que se degrada a medida que avanza el análisis.

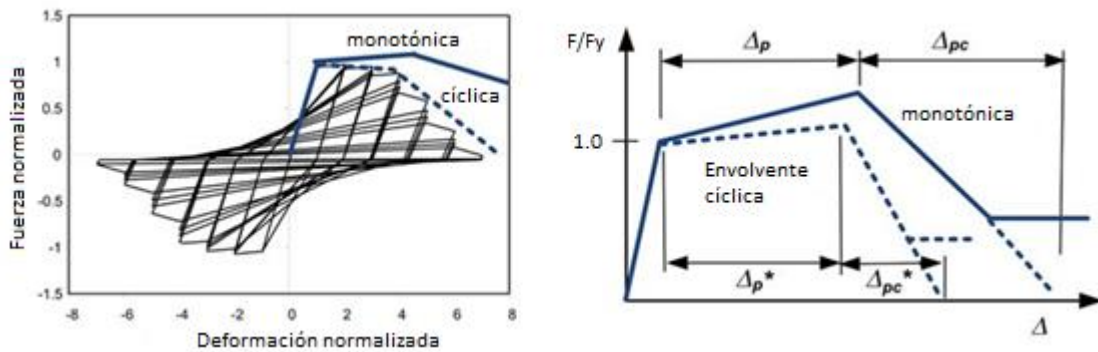


Figura 6.2 Curva envolvente y cíclica (Deierlein, 2010).

6.3 Muro MSR-D IMK

Se muestran los resultados de los parámetros calibrados del modelo histerético de pico orientado IMK para el muro sin refuerzo dinámico (MSR-D).

La calibración del modelo histerético se llevó a cabo con los resultados obtenidos de los ensayos y de la curva principal, se muestran los parámetros en la tabla 6-2. Se ocupó el programa OpenSees, en el cual se tiene implementado el modelo histerético de pico orientado IMK para producir el modelo numérico de histéresis con degradación.

6.3.1 Parámetros de la curva principal (Backbone)

Tabla 6-2 Parámetros del muro MSR-D para modelo IMK

| Muro MSR-D IMK | | | | | | | | | | | | |
|----------------|---------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------|-------|-------|
| Parámetro : | K_0 | α_s^+ | α_s^- | F_y^+ | F_y^- | λ_s | λ_c | λ_A | λ_k | C_s | C_c | C_A |
| Valor: | 1216.04 | 0.092 | 0.092 | 988.46 | -988.46 | 2800 | 3800 | 5000 | 1500 | 1 | 1 | 1 |
| Parámetro : | C_k | δ_p^+ | δ_p^- | δ_{pc}^+ | δ_{pc}^- | F_{Res}^+ | F_{Res}^- | δ_u^+ | δ_u^- | D^+ | D^- | |
| Valor: | 1 | 14.06 | 14.06 | 102.63 | 102.63 | 0 | 0 | 117.50 | 117.50 | 1 | 1 | |

6.3.1 Modelo histerético IMK MSR-D

En la figura 6.3 se muestra la comparativa de los modelos histerético obtenidos experimentalmente y la generada por OpenSees. Se puede observar que en los primeros ciclos se presenta un buen ajuste

entre las dos curvas, en los ciclos posteriores se nota una disminución de la resistencia y cambio de la pendiente de descarga; lo cual demuestra que los parámetros obtenidos son buenos para la simulación.

En la figura 6.4 se muestra un comparativo ciclo a ciclo de la histéresis experimental y del modelo IMK (ciclos 15 y 25) en la imagen comparativa del ciclo 15 se muestra que el ciclo obtenido de forma experimental presenta un cierto estrechamiento en el centro de ciclo y el ciclo de OpenSees en más grueso. También se presenta un cambio en la pendiente de la rigidez de descarga y alcanza la fuerza del ciclo experimental. En la comparativa del ciclo 25 el ciclo de histéresis experimental es más estrecho y se puede observar un cambio de pendiente en la rigidez de descarga antes de cruzar el eje horizontal, así también que la pendiente recarga se observa dos cambios de pendiente, también se observa que la fuerza básica se degradó.

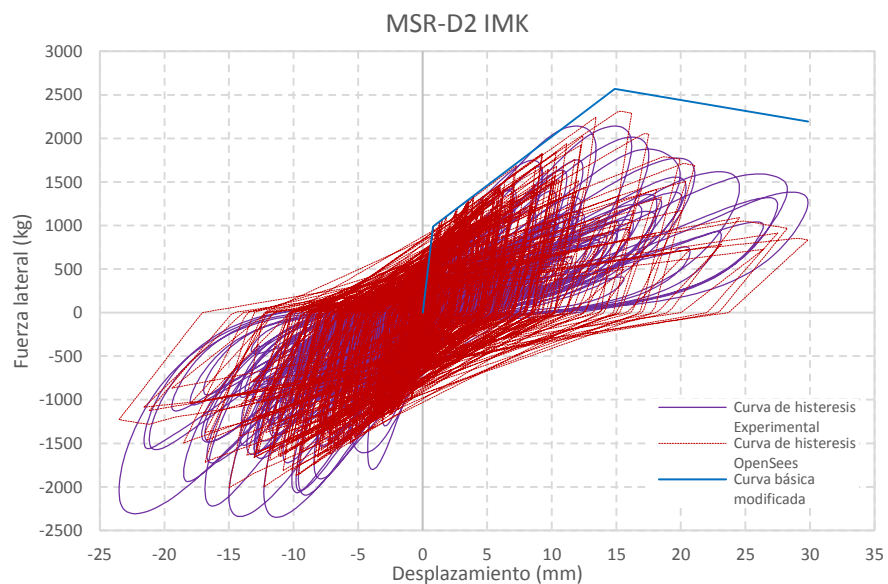


Figura 6.3 Comparativa de respuesta histerética experimental y simulación muro MSR-D

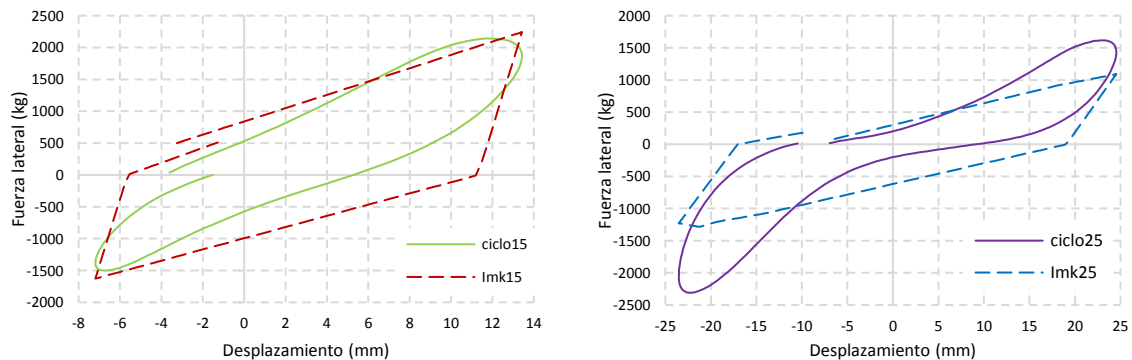


Figura 6.4 Comparativa de ciclos histeréticos muro MSR-D

6.3.2 Energía disipada acumulada del muro MSR-D

Adicionalmente, como una medida de comparación entre el comportamiento exhibido entre ambas curvas de histéresis, se calculó la energía disipada acumulada de la curva experimental y la curva analítica del modelo IMK, la energía se calculó con el área comprendida dentro de los ciclos histéreticos.

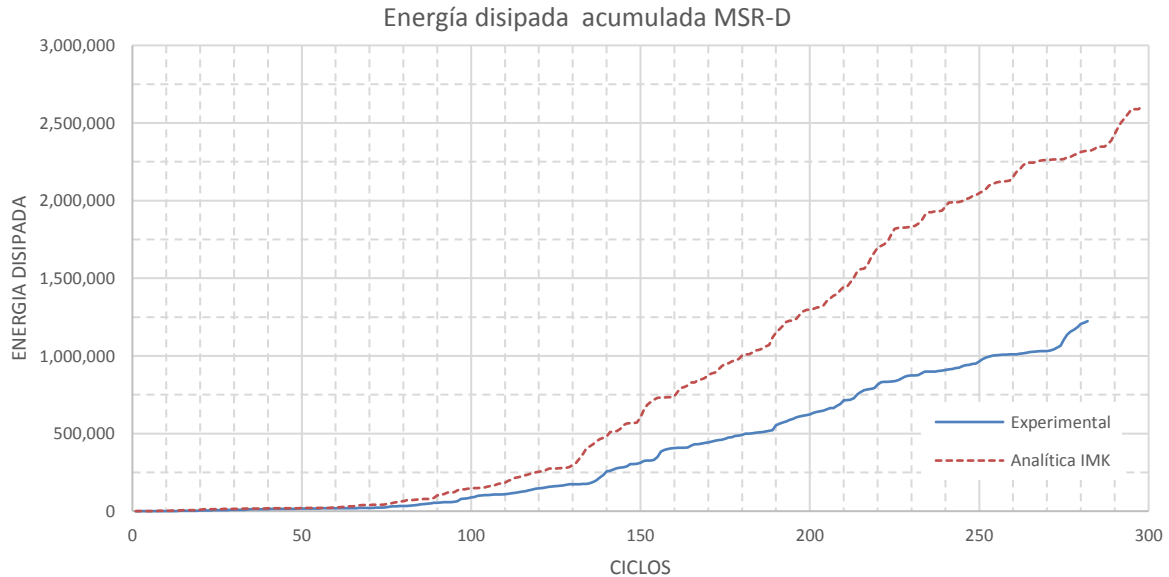


Figura 6.5 Energía disipada acumulada, curva experimental y analítica IMK muro MSR-D

En la gráfica 6.5 se puede observar que la energía histéretica disipada del modelo analítico del modelo IMK es mayor a la energía histéretica experimental una proporción de 2.14.

6.4 Muro MSR-E IMK

La tabla 6-3 muestra los parámetros calibrados para el modelo histéretico de pico orientado IMK del muro sin refuerzo estático (MSR-E).

La calibración del modelo histéretico se llevó a cabo con los resultados obtenidos del ensaye y la curva principal; con la ayuda del software OpenSees se fue calibrando el modelo histéretico.

6.4.1 Parámetros de la curva principal

Tabla 6-3 Parámetros del muro MSR-E para modelo IMK

| Muro MSR-E IMK | | | | | | | | | | | | |
|----------------|---------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------|-------|-------|
| Parámetro : | K_0 | α_s^+ | α_s^- | F_y^+ | F_y^- | λ_s | λ_c | λ_A | λ_K | C_s | C_c | C_A |
| Valor: | 2795.34 | 0.102 | 0.102 | 2960.77 | -2960.77 | 180 | 160 | 450 | 4000 | 1 | 1 | 1 |
| Parámetro : | C_K | δ_p^+ | δ_p^- | δ_{pc}^+ | δ_{pc}^- | F_{Res}^+ | F_{Res}^- | δ_u^+ | δ_u^- | D^+ | D^- | |
| Valor: | 1 | 4.94 | 4.94 | 8.70 | 8.70 | 0 | 0 | 14.70 | 14.70 | 1 | 1 | |

6.4.2 Modelo hysterético IMK MSR-E

En la figura 6.6 se muestra la comparativa del modelo hysterético obtenido de forma experimental y el analítico con el OpenSees; se puede observar que en los primeros ciclos se ajustan bien las dos curvas, y en los ciclos finales se tiene una diferencia en cuanto a la fuerza con los ciclos analíticos; también se aprecia en los del sentido negativo en la zona de la rama de endurecimiento por deformación que los ciclos experimentales están por debajo de la fuerza de agrietamiento y los ciclos analíticos llegan a la envolvente negativa. El comportamiento hysterético del muro MSR-E se debe a que al inicio del ensaye se tuvo problema con el actuador.

Se realizó el comparativo ciclo a ciclo de histéresis experimental y analítico del muro MSR-E (ciclos 11 y 13) que se muestra en la figura 6.7; en la gráfica del ciclo 11 se aprecia un buen ajuste entre los dos ciclos, en la rama de carga del lado positivo hasta llegar a la fuerza máxima del ciclo. En la pendiente de la rama de descarga se nota una pequeña deferenca entre ellas y la pendiente de recarga en el lado negativo donde se puede observar un incremento en el ciclo analítico y también llega a una fuerza mayor que la presentada experimentalmente, y la rama de descarga presenta la misma pendiente.

En el ciclo 25 de la figura 6.4 se observa la degradación de la fuerza básica en el ciclo analítico y un cierto cambio en la pendiente de carga positivo. La pendiente de descarga tiene la misma pendiente, y en la rama de recarga se tienen diferente pendiente; y la rama de descarga en el lado negativo tiene la misma pendiente.

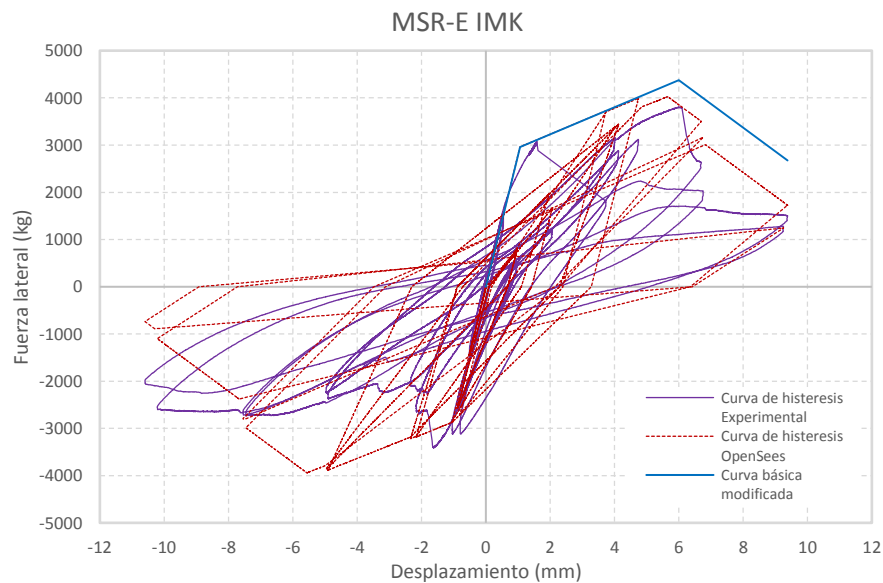


Figura 6.6 Comparativa de respuesta hysterética experimental y simulación muro MSR-E

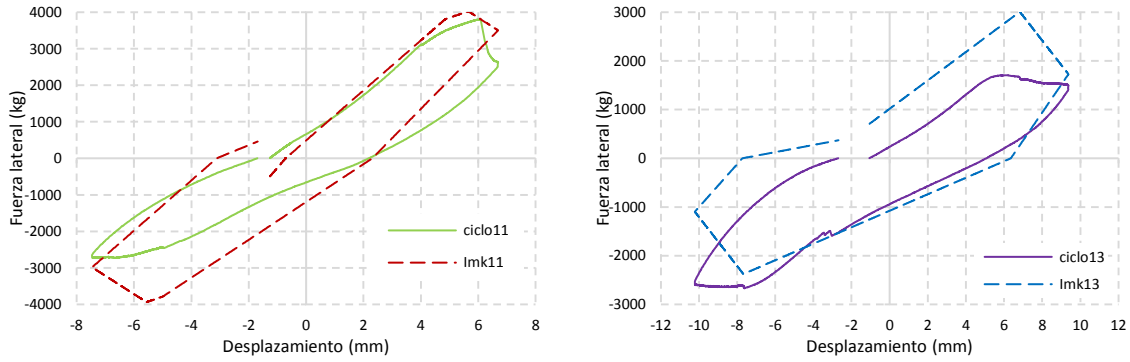


Figura 6.7 Comparativa de ciclos histeréticos muro MSR-E

6.4.3 Energía disipada acumulada del muro MSR-E

En la gráfica 6.8 se muestra la energía histerética del modelo experimental y analítico IMK en la cual se observa que la energía analítica es ligeramente mayor una razón de 1.37.

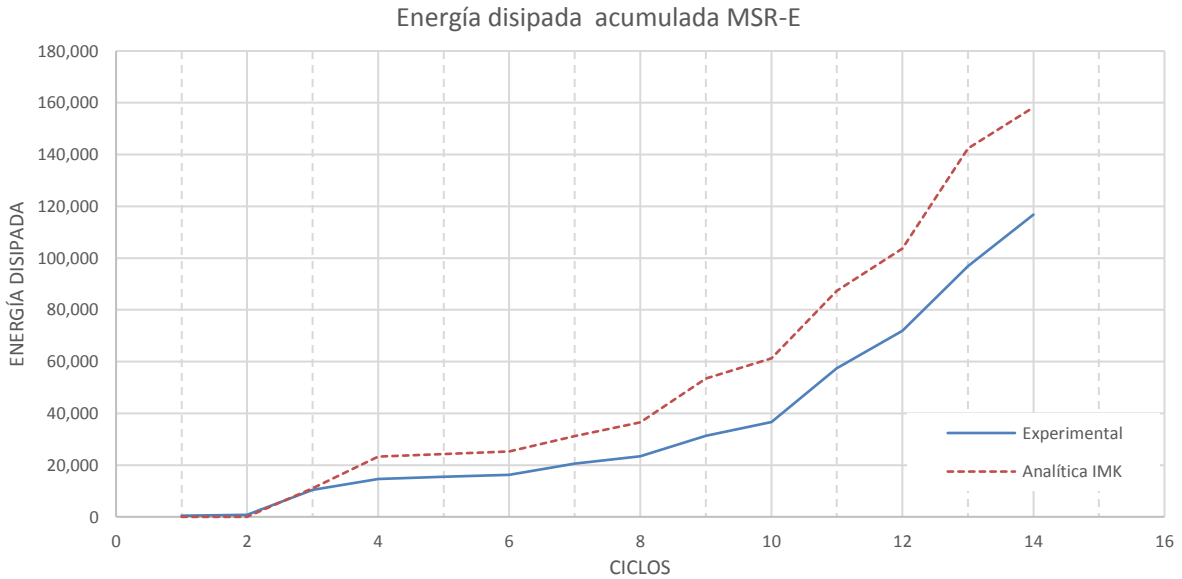


Figura 6.8 Energía disipada acumulada curva experimental y analítica IMK muro MSR-E

6.5 Muro MCR-D IMK

Se muestran los resultados de los parámetros calibrados de modelos histerético de pico orientado IMK para el muro con refuerzo dinámico MCR-D.

La calibración del modelo histerético se llevó a cabo con los resultados obtenidos del ensaye y de la curva principal, se dan los parámetros que se muestran en la tabla 6-4. Se utilizó el programa OpenSees para la calibración del modelo.

6.5.1 Parámetros de la curva principal

Tabla 6-4 Parámetros del muro MCR-D para modelo IMK

| Muro MCR-D IMK | | | | | | | | | | | | |
|----------------|---------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------|-------|-------|
| Parámetro : | K_0 | α_s^+ | α_s^- | F_y^+ | F_y^- | λ_s | λ_c | λ_A | λ_K | C_s | C_c | C_A |
| Valor: | 2548.71 | 0.103 | 0.103 | 3474.05 | -3474.05 | 1300 | 1700 | 1800 | 800 | 1 | 1 | 1 |
| Parámetro : | C_K | δ_p^+ | δ_p^- | δ_{pc}^+ | δ_{pc}^- | F_{Res}^+ | F_{Res}^- | δ_u^+ | δ_u^- | D^+ | D^- | |
| Valor: | 1 | 6.69 | 6.69 | 29.74 | 29.74 | 0 | 0 | 37.78 | 37.78 | 1 | 1 | |

6.5.2 Modelo histerético IMK

En la figura 6.9 se muestra la comparativa de los modelos histeréticos obtenidos experimentalmente y generada por OpenSees. Se puede observar que se presentan un buen ajuste entre las dos curvas, los ciclos del modelo analítico presentan un pequeño estrechamiento. Se puede apreciar que representa bien la rigidez de descarga así como la degradación de la fuerza básica.

En la figura 6.10 se muestra un comparativo ciclo a ciclo experimental y analítico modelo IMK (ciclos 37 y 90) del muro MCR-D; en la gráfica del ciclo 90 se observa un buen ajuste en los ciclos, tienen similar pendiente en la rama de carga, la fuerza básica del ciclo histerético analítico IMK es ligeramente mayor que el experimental y la rama de recarga tienen la misma pendiente.

En el ciclo 37 de la gráfica 6.10 el ciclo histerético analítico presenta la degradación de la fuerza básica. La pendiente de descarga del lado positivo presenta semejante pendiente al ciclo experimental, la rama de recarga presenta una pendiente similar al experimental y la degradación de la fuerza básica del lado negativo.

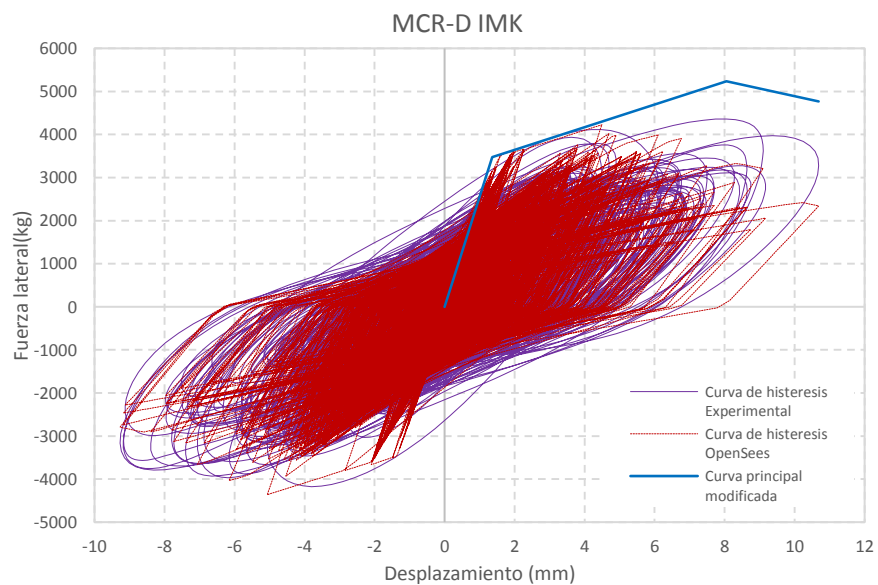


Figura 6.9 Comparativa de respuesta histerética experimental y simulación, muro MCR-D

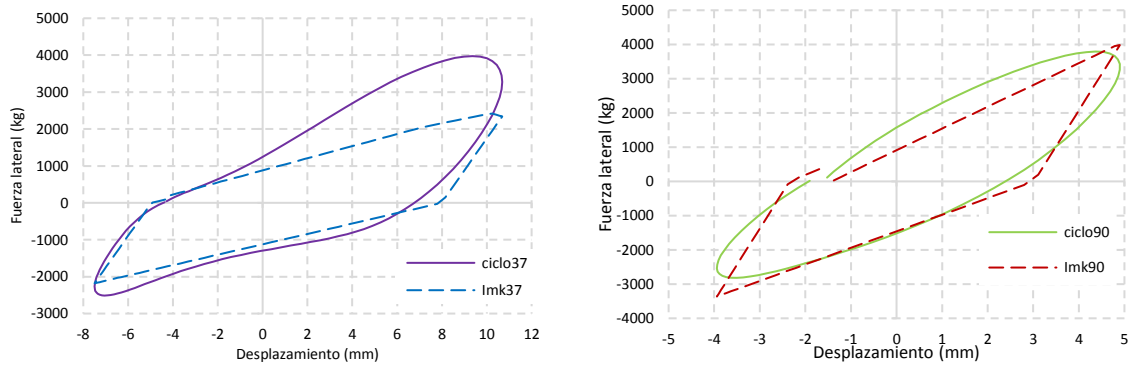


Figura 6.10 Comparativa de ciclos histeréticos muro MCR-D

6.5.3 Energía disipada acumulada muro MCR-D

En la gráfica 6.11 se muestra la energía histerética del modelo experimental y analítico IMK en la cual se observa que la energía analítica es menor a la experimental en una razón de 0.71.

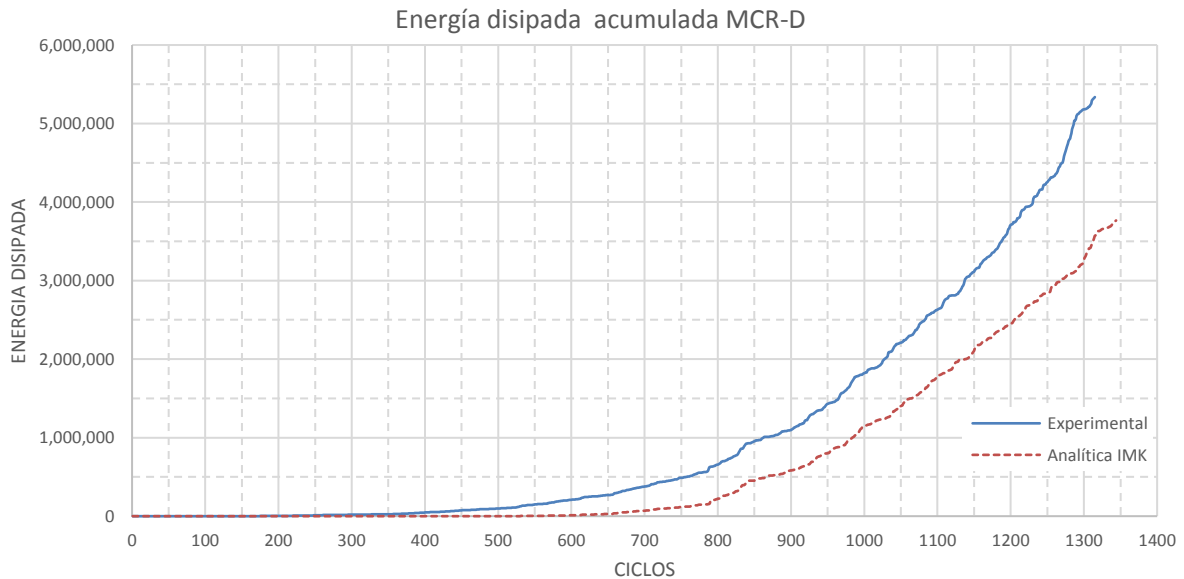


Figura 6.11 Energía disipada acumulada curva experimental y analítica muro MCR-D

6.6 Muro MCR-E IMK

La tabla 6-5 muestra los parámetros calibrados para el modelo histerético de pico orientado IMK del muro con refuerzo con ensaye estático (MCR-E).

La calibración del modelo histerético se llevó a cabo con los resultados obtenidos del ensaye y la curva principal con la ayuda del software OpenSees fue calibrado el modelo histerético.

6.6.1 Parámetros de la curva principal

Tabla 6-5 Parámetros del muro MCR-E para modelo IMK

| Muro MCR-E IMK | | | | | | | | | | | | |
|----------------|---------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------|-------|-------|
| Parámetro : | K_0 | α_s^+ | α_s^- | F_y^+ | F_y^- | λ_s | λ_c | λ_A | λ_K | C_S | C_C | C_A |
| Valor: | 2213.72 | 0.152 | 0.152 | 2619.92 | -2619.92 | 400 | 750 | 450 | 260 | 1 | 1 | 1 |
| Parámetro : | C_k | δ_p^+ | δ_p^- | δ_{pc}^+ | δ_{pc}^- | F_{Res}^+ | F_{Res}^- | δ_u^+ | δ_u^- | D^+ | D^- | |
| Valor: | 1 | 8.83 | 8.83 | 128.03 | 128.03 | 0 | 0 | 138.04 | 138.04 | 1 | 1 | |

6.6.2 Modelo histérico IMK

En la figura 6.12 se muestra la comparativa de la respuesta histérica experimental y analítica del muro MCR-E se puede apreciar que los parámetros obtenidos se ajustan bien al modelo IMK y reproducen de buena manera el ciclo histérico; también se observa que existe una diferencia en las ramas de descarga de ambos lados positivo y negativo lo cual el comportamiento experimental presenta un pequeño estrechamiento de los lazos de histéresis, en los ciclos finales está pendiente son similares en ambos casos; también se aprecia que en los ciclos de repetición de la prueba experimental se reproducen muy bien en el modelo analítico.

En la figura 6.13 se muestra la comparativa de ciclo a ciclo de histéresis experimental y del modelo analítico IMK (ciclo 15 y 20); en la gráfica del lado izquierdo del ciclo 15 se observa que el ciclo de histéresis experimental tiene estrechamiento en la parte central y el ciclo de histéresis del modelo de pico orientado IMK se muestra más amplio; se aprecia también el cambio en la rigidez de descarga y recarga; la energía disipada en el ciclo histérico del modelo de pico orientado IMK es mayor al ciclo histérico experimental.

En la gráfica del lado derecho, ciclo 20 se muestra que el ciclo de histéresis tiene el mismo ancho lo cual reproduce bien el modelo analítico; Las curvas de descarga y recarga tienen la misma pendiente para ambos sentidos del ciclo, por lo cual se tiene la misma cantidad de energía disipada.

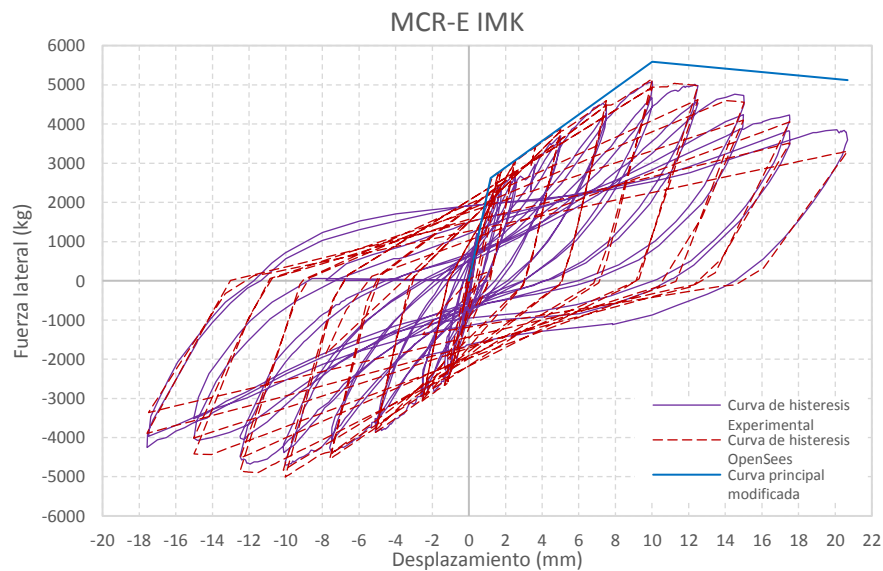


Figura 6.12 Comparativa de respuesta histérica experimental y simulación muro MCR-E

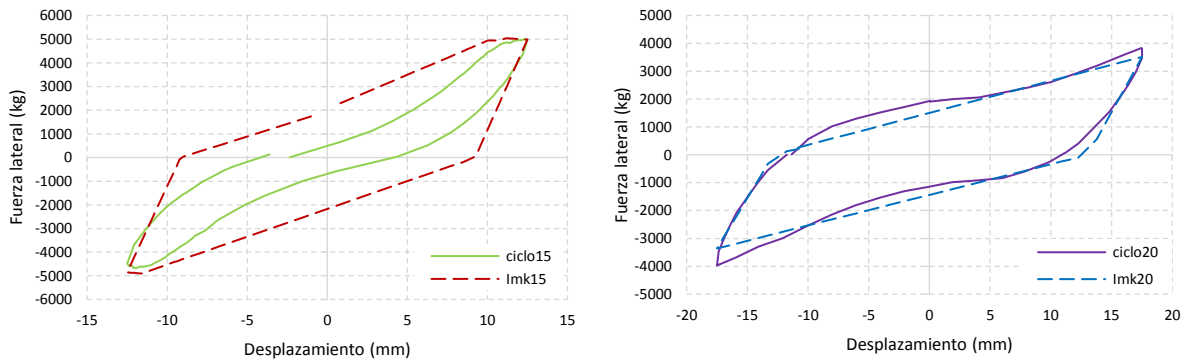


Figura 6.13 Comparativa de ciclos histeréticos muro MCR-E

6.6.3 Energía disipada acumulada del muro MCR-E

En la gráfica 6.14 se muestra la energía histerética del modelo experimental y analítico IMK en el cual se observa que la energía analítica es mayor en una razón de 1.59.

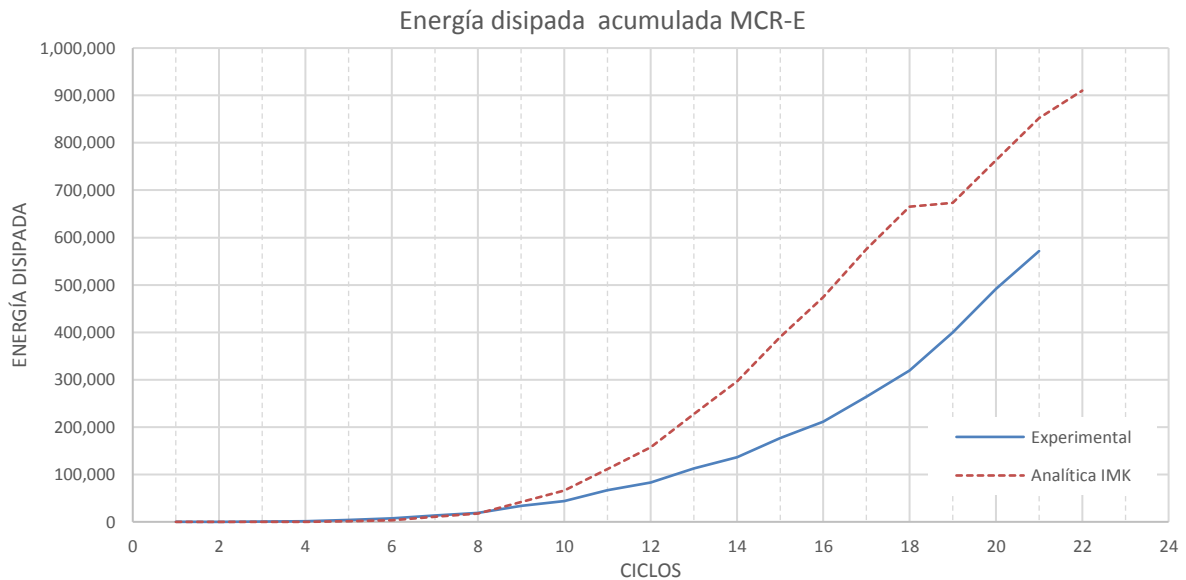


Figura 6.14 Energía disipada acumulada curva experimental y analítica muro MCR-E

6.7 Resumen de los parámetros obtenidos para el modelo IMK

En la tabla 6-6 se muestra el resumen de los parámetros del modelo histerético IMK calibrado para cada uno de los muros con y sin refuerzo, MCR y MSR y ensayado de manera cuasi-estática y dinámica. Se muestra una diferencia entre los valores del parámetro de deterioro cíclico ($\lambda_s, \lambda_c, \lambda_A$ y λ_R) de los muros ensayados de forma cuasi-estática y dinámica, así también como en la energía disipada acumulada de forma experimental.

Tabla 6-6 Resumen de los parámetros del modelo histerético de pico orientado IMK

| Parámetro : | Valores de los especímenes | | | |
|--|----------------------------|------------|------------|------------|
| | Muro MSR-E | Muro MSR-D | Muro MCR-E | Muro MCR-D |
| K₀ (kg/m) | 2795.34 | 1216.04 | 2213.72 | 2548.71 |
| α_s⁺ | 0.102 | 0.092 | 0.152 | 0.103 |
| α_s⁻ | 0.102 | 0.092 | 0.152 | 0.103 |
| F_y⁺ (kg) | 2960.77 | 988.46 | 2619.92 | 3474.05 |
| F_y⁻ (kg) | -2960.77 | -988.46 | -2619.92 | -3474.05 |
| λ_s | 180 | 2800 | 400 | 1300 |
| λ_c | 160 | 3800 | 750 | 1700 |
| λ_A | 450 | 5000 | 450 | 1800 |
| λ_K | 4000 | 1500 | 260 | 800 |
| C_s | 1 | 1 | 1 | 1 |
| C_c | 1 | 1 | 1 | 1 |
| C_A | 1 | 1 | 1 | 1 |
| C_K | 1 | 1 | 1 | 1 |
| δ_p⁺ (mm) | 4.94 | 14.06 | 8.83 | 6.69 |
| δ_p⁻ (mm) | 4.94 | 14.06 | 8.83 | 6.69 |
| δ_{pc}⁺ (mm) | 8.70 | 102.63 | 128.03 | 29.74 |
| δ_{pc}⁻ (mm) | 8.70 | 102.63 | 128.03 | 29.74 |
| F_{Res}⁺ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| F_{Res}⁻ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| δ_u⁺ (mm) | 14.70 | 117.50 | 138.04 | 37.78 |
| δ_u⁻ (mm) | 14.70 | 117.50 | 138.04 | 37.78 |
| D⁺ | 1 | 1 | 1 | 1 |
| D⁻ | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Energía experimental | 117,582 | 1,223,934 | 571,562 | 5,340,958 |
| Relación de energía modelo IMK sin degradación/energía experimental | 1.87 | 2.84 | 1.95 | 0.95 |
| Relación de energía con degradación | 1.37 | 2.14 | 1.59 | 0.71 |

7. CONCLUSIONES

7.1 RESUMEN

Se realizó el ensaye de seis muros de mampostería confinada cuadrados a escala reducida 1:2; se llevaron a cabo dos series una serie sin refuerzo horizontal (MSR) y otra serie con refuerzo horizontal (MCR), de cada serie se ensayó un muro de manera monotónica, uno cuasi-estática y uno dinámica.

- Se obtuvo la envolvente cíclica de las curvas de histéresis de cada muro con y sin refuerzo.
- La envolvente cíclica se simplificó a una curva trilineal; se utilizaron el punto de la fuerza y desplazamiento máximo (δ_c, F_c), el punto de fuerza y desplazamiento último (δ_u, F_u), el punto de fluencia cambio de rigidez (δ_y, F_y) y esta se obtuvo con el área bajo la curva de la envolvente.
- Se modificó la envolvente trilineal simplificada multiplicando la fuerza máxima F_c y fuerza última F_u por los factores ffc (factor de fuerza de resistencia máxima) y ffu (factor de fuerza de resistencia última); el modelado de la degradación cíclica comienza con la curva principal (backbone) y degrada hasta la envolvente cíclica.
- Para la calibración del modelo histerético IMK generado con OpenSees se utilizaron los desplazamientos en lugar de las distorsiones.
- La relación de degradación es definida por el parámetro β_i , el cual depende de la energía histerética disipada en el paso de ciclos y referente capacidad de energía disipada expresada por $\lambda F_y \delta_y$.
- El parámetro de la capacidad de disipación de energía de referencia que se maneja en el modelo Ibarra Medina Krawinkler expresado como $E_t = \gamma F_y \delta_y$ que se modifica utilizando el parámetro δ_p ; debido a que las rotaciones son adimensionales.
- Con los modelos de los muros calibrados en esta investigación y con la información con que se cuenta de dos modelos ensayados previamente en la mesa vibradora del Instituto de Ingeniería de la UNAM, se puede realizar la modelación analítica de esos modelos y comparar la respuesta de las estructuras analítica y experimental y realizar análisis no lineal de estructuras de mampostería.

Se desea realizar el modelo analítico del modelo de tres niveles ensayado previamente en la mesa vibradora por (Flores y otros, 2016).

7.2 CONCLUSIONES

La predicción teórica no represento los resultados experimentales en los muros MSR-D y MSR-E porque en ambos ensayes se presentaron ciertas circunstancias durante sus ensayes que no permitió que se desarrollara la predicción teórica del muro, sin embargo, en el estudio lo que se trató de obtener fue la degradación histerética del muro para la posterior calibración con el modelo IMK.

La curva monotónica no fue representativo y se desechó porque debería mostrar la resistencia por arriba de la envolvente cíclica, con base en la envolvente cíclica de los muros se realizó un ajuste para obtener la curva principal sin degradación histerética y está se ocupó para la obtención de los parámetros del modelo IMK.

Comparando las curvas histeréticas experimental analítica se concluye que los parámetros obtenidos se ajustan bien al modelo IMK y reproducen de buena manera el ciclo histerético.

El ensaye estático de muros a escala comparado con ensayos estáticos de muros a tamaño natural permite concluir que los parámetros obtenidos de los muros a escala se deberán multiplicar por 2.

Se obtuvieron los parámetros para cada muro, sin embargo, se requieren valores promedio que reproduzcan cualquier muro, se recomienda utilizar los valores de la tabla 6-6.



Figura 7.1 Modelo ensayado previamente en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Flores y otros 2016)

8. BIBLIOGRAFÍA

- Alcocer S. M., Meli R., Sánchez T. A., y Flores L. E. (1994). *"Comportamiento ante cargas laterales de sistemas de muros de mampostería confinada con diferentes grados de acoplamiento a flexión"*. México: Cuaderno de Investigación No. 17, Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Alcocer S. M., Murià D. (1999). *"Comportamiento dinámico de muros de mampostería confinada"*. Instituto de ingeniería. México: Informe No. SID 616, UNAM.
- Carrillo, J. (2010). "Evaluación del comportamiento a cortante de muros de concreto para vivienda por medio de ensayos dinámicos". *Tesis de doctorado*. Posgrado de ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Chacón W. D. (2009). *"Torsión accidental en estructuras con aislamiento de base"*. Facultad de Ingeniería Civil. ESPE: Sede: SANGOLQUÍ.
- Deierlein, G. R. (2010). "Nonlinear Structural Analysis For Seismic Desing". *NEHRP Seismic Desing Technical Brief No. 4*.
- Flores E L, Pérez Gavilán J J, Durán R. (2016). *"Ensayo de dos estructuras de mampostería confinada de tres niveles a escala 1:2, variando el refuerzo horizontal"*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.
- Flores L.E., Guzman L. A. (2015). *"Construcción y ensayo de un muro de mampostería confinada con refuerzo horizontal escala 1:2"*. CENAPRED, Informe Interno, Centro Nacional de Prevención de Desastres, 35 pp.
- Flores, L. y. (2001). *Estudio analítico de estructuras de mampostería confinada"*. Sistema Nacional de Protección Civil, Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Gobierno del Distrito Federal (GDF, 2. (s.f.). *"Normas Técnicas complementarias para el diseño y construcción de estructuras de mampostería"*. Gaceta Oficial del Distrito Federal.
- Ibarra L. F., Krawinkler H. (2003). "Global collapse of frame structures under seismic excitations". *PhD Dissertation, Department of CEE, Stanford University*.
- Ibarra L. F., Medina R. A., Krawinkler H. (2005). "Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 34(12), 1489-1511.
- Lignos, D. (2008). *"Sidesway collapse of deteriorating structural systems under seismic excitations"*. Submitted to the department of civil and environmental engineering and the committee on graduate studies of Stanford university.
- Maganti, J. D. (2014). "Calibration of a hysteretic model for glass fiber reinforced gypsum wall panels". *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 347-355.
- NMX-C-464-ONNCCE-2010. (2010). *Norma Mexicana, industria de a construcción - Mampostería - Determinación de la resistencia a compresión diagonal y módulo de elasticidad de pilas de mampostería de arcilla o de concreto- métodos de ensayo*.
- Ordaz M., Montoya C. (2005). DEGTRA:NET. Instituto de Ingeniería UNAM.
- Picón R. R. A. (2003). *Modelo simplificado para el comportamiento dinámico de pórticos con vigas plana-columna de concreto armado considerando el deslizamiento entre el refuerzo y el concreto en las juntas*. Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería.

Rahnama M., Krawinkler H. (1993). "Effects of soft soil and hysteretic model on seismic demands".
John A. Blume, Earthquake Engineering Center Report No. 108. Department of CEE, Stanford University.

slideshare. (6 de Septiembre de 2015). *MODELOS DE HISTERESIS - OTANI TRADUCCION PERSONAL BACH: RONALD J. PURCA 2012.* Obtenido de <https://www.slideshare.net/ronaldpurca3/modelos-de-histeresis-drotani-traduccin-personal>

Takeda T., Sozen M. A, Nielsen N. N. (1970). "Reinforced concrete response to simulated earthquakes".
ASCE Journal of the Structural Division, 2557-2573.

APENDICE A. RESULTADOS DE LOS ENSAYES DE MATERIALES

Se realizaron diferentes ensayos de los materiales utilizados en la construcción de los especímenes, para determinar sus propiedades mecánicas; llevándose a cabo muestreo de cilindros de concreto de castillos, dalas y losas, así como pilas, muretes, piezas de mampostería y muestras cúbicas de mortero.

Los especímenes, tanto pilas, muretes como cilindros de concreto, fueron instrumentaron para obtener las gráficas esfuerzo-deformación, y así obtener los módulos de elasticidad correspondiente; fueron instrumentados utilizando un sistema de medición óptico (Cámara OPTOTRAK) y se utilizaron sensores de LED, las señales tanto del MTS como de la cámara se alinearon utilizando el software ALINREG.

Para las muestras de pilas se utilizaron dos LED que se adhirieron utilizando silicón, colocados en la superficie de los tabiques a una distancia aproximada de 12 cm; en los muretes se utilizaron cuatro LED adheridos de la misma forma, colocadas sobre las diagonales de la probeta.

A.1 Compresión de cilindros de concreto

Se obtuvieron muestras del concreto en cilindros de 10 cm diámetro x 20 cm de altura y 15 cm de diámetro x 30 cm de altura (castillos dalas y losas, cimentación) para los diferentes especímenes y tipos de ensayos. De las muestras ensayadas solo de la del concreto de los castillos se obtuvo el módulo de elasticidad.

El ensaye de los cilindros de concreto se realizó de la siguiente manera:

- En los cilindros de concreto de la cimentación, dala y losa se aplicó la carga a una razón de 25 ton/min y 7 ton/min, respectivamente.
- Para los cilindros de concreto de los castillos se aplicó una precarga de 2 toneladas a una velocidad de 2 ton/min, después se aplicaron tres ciclos de carga y descarga que van de las 2 toneladas hasta 6 toneladas con una velocidad de 7 ton/min, esto para el cálculo del módulo de elasticidad del concreto; posterior a los ciclos se le aplicó una carga final hasta la falla de los cilindros de concreto.

Los ensayos se realizaron en la máquina universal del laboratorio de estructuras y materiales del Instituto de Ingeniería.

En la Tabla A.0-1 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de los cilindros de concreto, en los cilindros de concreto de la cimentación, dala y losa solo se obtuvo la resistencia del concreto; en los cilindros de los castillos se obtuvo el módulo de elasticidad. En la figura A.1 se muestran las gráficas esfuerzo-deformación del concreto de los castillos de los especímenes.

Tabla A.0-1 Resultados ensaye cilindros de concreto

| MURO | Nombre | Descripción | Peso Vol. t/m ³ | Carga kg | Esfuerzo | Esfuerzo | Módulo de | Mód de |
|--------|-------------|--------------------------|-------------------------------|-------------|------------------------------|--|---|---|
| | | | | | f_c' kg/cm ² | promedio f_c' kg/cm ² | elasticidad E (kg/cm ²) | Elasticidad promedio E (kg/cm ²) |
| MCR | MD1A | Base de muro | 2.21 | 74258.7 | 432 | | | |
| | MD0 | Base de muros | 2.20 | 76298.3 | 438 | | | |
| | MD1B | Base de muro | 2.20 | 77176.4 | 425 | | | |
| | MCR-1A | Mitad inferior castillos | 2.02 | 16235.9 | 203 | 161 | 245,273.73 | 153367 |
| | MCR-1B | Mitad inferior castillos | 1.99 | 14878.6 | 182 | | 144,611.92 | |
| | MCR-1C | Mitad inferior castillos | 2.02 | 15369 | 192 | | 132,700.34 | |
| | MCR-2A | Mitad superior castillos | 2.02 | 10534.5 | 131 | | 111,899.58 | |
| | MCR-2B | Mitad superior castillos | 2.03 | 10447.6 | 133 | | 165,581.50 | |
| | MCR-2C | Mitad superior castillos | 2.02 | 9797.17 | 125 | | 120,133.23 | |
| | MD0A | Dala y losa | 1.99 | 24760.8 | 309 | | | |
| MD1 A | Dala y losa | 2.06 | 28169.4 | 352 | | | | |
| MSR | MSR1 | Base de muro | 2.21 | 64453.6 | 370 | | | |
| | MSR0 A | Base de muros | 2.19 | 74529.8 | 422 | | | |
| | MSR0 B | Base de muro | 2.25 | 66633 | 367 | | | |
| | MSR-1A | Mitad inferior castillos | 2.04 | 12862.1 | 161 | 157 | 148,586.24 | 136033 |
| | MSR-1B | Mitad inferior castillos | 2.10 | 13696.7 | 174 | | 149,788.99 | |
| | MSR-1C | Mitad inferior castillos | 1.99 | 12681.6 | 155 | | 138,827.60 | |
| | MSR-2A | Mitad superior castillos | 2.03 | 11821.9 | 148 | | 125,568.70 | |
| | MSR-2B | Mitad superior castillos | 2.08 | 11956.6 | 152 | | 131,263.77 | |
| | MSR-2C | Mitad superior castillos | 2.07 | 12009.5 | 153 | | 122,161.43 | |
| MSR1 A | Dala y losa | 2.09 | 25641.6 | 326 | | | | |
| MSR0 A | Dala y losa | 2.02 | 10740.6 | 131 | | | | |

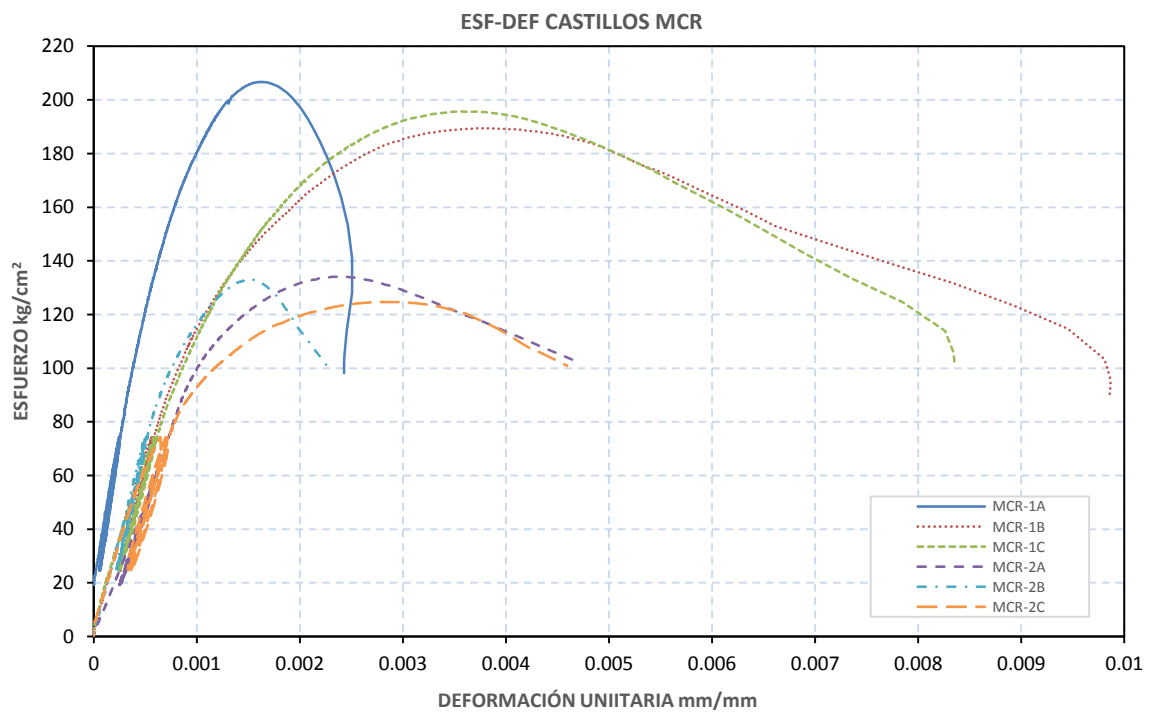
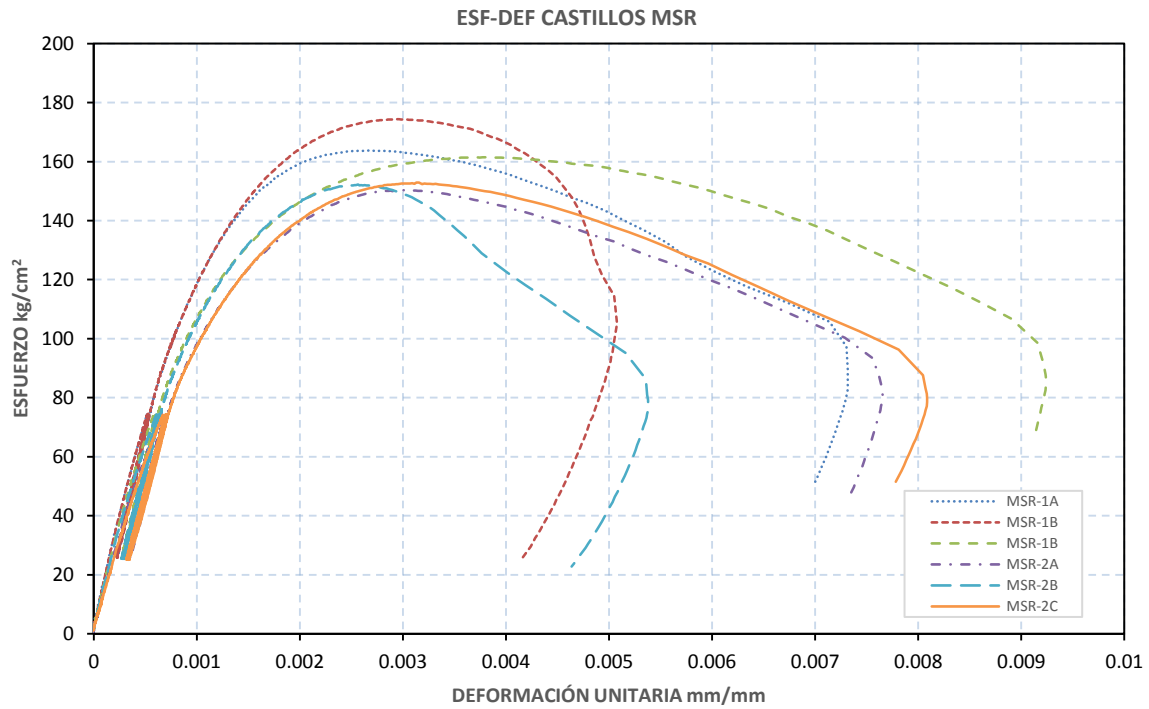


Figura A.1 Grafica esfuerzo-deformación cilindros de concreto (MSR y MCR)

Los valores promedio obtenidos de los ensayos son los siguientes $f'_c = 249 \text{ kg/cm}^2$, módulo de elasticidad $E_c = 144,699 \text{ kg/cm}^2$.



Figura A.2 Ensayo de cilindros de concreto a compresión

A.2 Compresión en pilas de mampostería

Durante la construcción de los especímenes se realizaron muestras de pilas y muretes, construidos con los mismos materiales y mortero; las pilas se hicieron con seis hiladas de tabiques colocadas una sobre otra como establece la norma (NMX-C-464-ONNCCE-2010, 2010), teniendo una relación de esbeltez promedio de 3.71, las pilas se cabecearon en sus extremos con yeso cemento.

De los resultados obtenidos se obtuvo el valor del esfuerzo a compresión f'_m promedio y el módulo de elasticidad de la mampostería E_m ; en la tabla A.0-2 se muestran los resultados obtenidos.

$$f'_m = \frac{\overline{f}_m}{1 + 2.5c_m} \quad (\text{A. 1})$$

Donde:

\overline{f}_m resistencia media a compresión de las pilas, corregida por su relación altura a espesor y referida al área bruta; y

c_m coeficiente de variación de la resistencia a compresión de las pilas de mampostería, que en ningún caso se tomara inferior 0.15.

Tabla A.0-2 Resultados ensaye pilas a compresión

| Muro | Pila | Carga, kg | Esfuerzo nominal, f kg/cm ² | Esfuerzo promedio, \bar{f}_m kg/cm ² | Coefficiente de variación | Módulo Elasticidad, E_m kg/cm ² | Módulo Elasticidad promedio, \bar{E}_m |
|-------|----------|--------------|---|--|---------------------------|---|--|
| MCR-M | MCR-M1 | 3840 | 52.89 | 67.56 | 0.16 | 7538 | 20764.35 |
| | MCR-M2 | 5000 | 66.64 | | | | |
| | MCR-M3 | 5160 | 71.67 | | | | |
| | MCR-M2-B | 5930 | 79.04 | | | | |
| MCR-E | MCR-E1 | 5470 | 75.34 | 63.97 | 0.17 | 20734 | 21336.53 |
| | MCR-E2 | 3818 | 54.38 | | | | |
| | MCR-E3 | 4292 | 62.18 | | | | |
| MSR-E | MSR-E1 | 3318 | 45.70 | 46.34 | 0.04 | 11673 | 10850.88 |
| | MSR-E2 | 3444 | 48.24 | | | | |
| | MSR-E3 | 3192 | 45.08 | | | | |
| MSR-M | MSR-M1 | 3329 | 46.24 | 46.63 | 0.01 | 8851 | 11405.09 |
| | MSR-M2 | 3267 | 47.33 | | | | |
| | MSR-M3 | 3391 | 46.33 | | | | |

Aplicando la ecuación (A. 1, el esfuerzo de diseño resultó de $f'_m = 36.9 \text{ kg/cm}^2$.

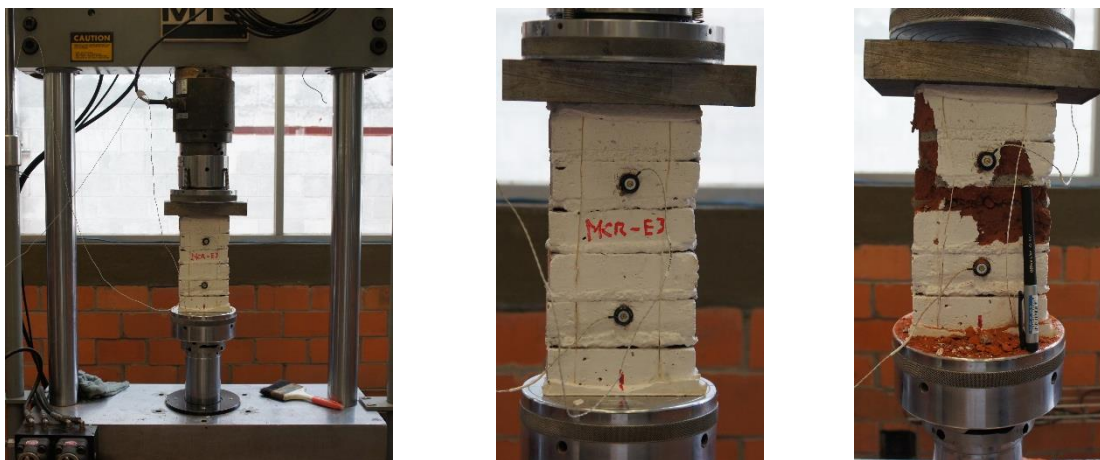


Figura A.3 Ensayo de pilas a compresión

A.3 Compresión diagonal en muretes

Los muretes tuvieron una forma cuadrada una y media pieza de largo en la base por cinco hiladas de altura; se cabecearon de acuerdo a (NMX-C-464-ONNCCCE-2010, 2010) con yeso-cemento; para la distribución de la carga sobre los muretes se colocaron dos cabezales de acero. Los muretes se

instrumentaron utilizando bases de plástico adheridas con silicón donde se colocaron los Led's, como se muestra en la figura A.4 ; la carga se aplicó a través de una de sus diagonales.

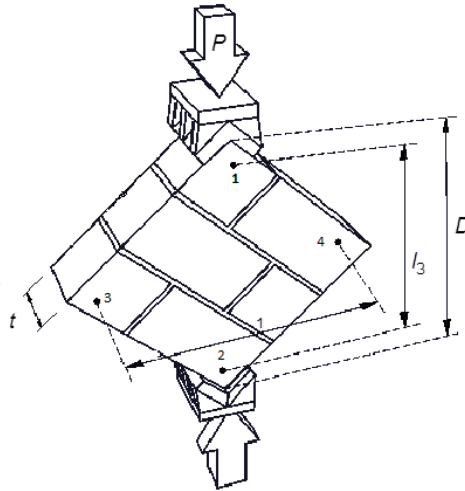


Figura A.4 Ubicación de Led en muretes

$$v_m^* = \frac{\overline{v_m}}{1 + 2.5C_v} \quad (\text{A. 2})$$

EL esfuerzo cortante de diseño se calculó utilizando la ecuación A. 2, teniendo un valor de diseño de $v_m' = 6.4 \text{ kg/cm}^2$. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla A.0-3 .

Tabla A.0-3 Resultados ensaye muretes a compresión diagonal

| MURO | Murete | Carga P, kg | Esfuerzo nominal, v kg/cm ² | Esfuerzo promedio, $\overline{v_m}$ kg/cm ² | Coefficiente de variación | Mód. de cortante, G_m kg/cm ² | Mód. de cortante promedio, $\overline{G_m}$ kg/cm ² |
|-------|---------|-------------|--|--|---------------------------|--|--|
| MCR-M | MCR-M1B | 2249 | 14.96 | 16.2 | 0.13 | 6039 | 10140 |
| | MCR-M2 | 2876 | 18.65 | | | 14382 | |
| | MCR-M3 | 2382 | 14.93 | | | 9999 | |
| MCR-E | MCR-E1 | 2755 | 18.23 | 14.6 | 0.24 | 14577 | 10902 |
| | MCR-E2 | 1694 | 11.44 | | | 10305 | |
| | MCR-E3 | 2142 | 13.99 | | | 7825 | |
| MSR-E | MSR-E1 | 1349 | 8.65 | 8.3 | 0.05 | 5536 | 6123 |
| | MSR-E2 | 1192 | 7.84 | | | 5118 | |
| | MSR-E3 | 1324 | 8.39 | | | 7715 | |
| MSR-M | MSR-M1 | 1159 | 7.55 | 8.6 | 0.11 | 3704 | 4382 |
| | MSR-M2 | 1415 | 8.97 | | | 3858 | |
| | MSR-M3 | 1433 | 9.41 | | | 5584 | |



Figura A.5 Ensayo de muretes a compresión diagonal

A.4 Compresión de piezas de mampostería

Se seleccionaron al azar 10 piezas de mampostería, se midieron y se ensayaron a compresión; los resultados se muestran en la tabla A.0-4

Tabla A.0-4 Resultados ensaye piezas de mampostería a compresión

| Muestra | Probeta | Dimensiones, cm | | | Peso, g | Peso Vol. t/m ³ | Carga kg | Área cm ² | Esfuerzo kg/cm ² | Esfuerzo promedio kg/cm ² |
|---------|---------|-----------------|------|------|---------|----------------------------|----------|----------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| | | L | b | e | | | | | | |
| MCR | 1 | 12.00 | 6.00 | 3.00 | 310 | 1.44 | 6153 | 72.00 | 85.46 | 92.81 |
| | 2 | 12.00 | 5.90 | 3.00 | 320 | 1.51 | 8356 | 70.80 | 118.02 | |
| | 3 | 11.90 | 6.00 | 3.00 | 340 | 1.59 | 5932 | 71.40 | 83.08 | |
| | 4 | 12.10 | 6.00 | 3.00 | 330 | 1.52 | 6075 | 72.60 | 83.68 | |
| | 5 | 12.00 | 5.90 | 3.00 | 335 | 1.58 | 6642 | 70.80 | 93.81 | |
| MSR | 1 | 11.90 | 6.00 | 2.90 | 335 | 1.62 | 7780 | 71.40 | 108.96 | 96.41 |
| | 2 | 12.00 | 5.90 | 3.00 | 345 | 1.62 | 5110 | 70.80 | 72.18 | |
| | 3 | 11.90 | 6.00 | 3.00 | 330 | 1.54 | 7200 | 71.40 | 100.84 | |
| | 4 | 12.00 | 5.90 | 3.00 | 330 | 1.55 | 7537 | 70.80 | 106.45 | |
| | 5 | 12.10 | 6.00 | 3.00 | 335 | 1.54 | 6796 | 72.60 | 93.61 | |

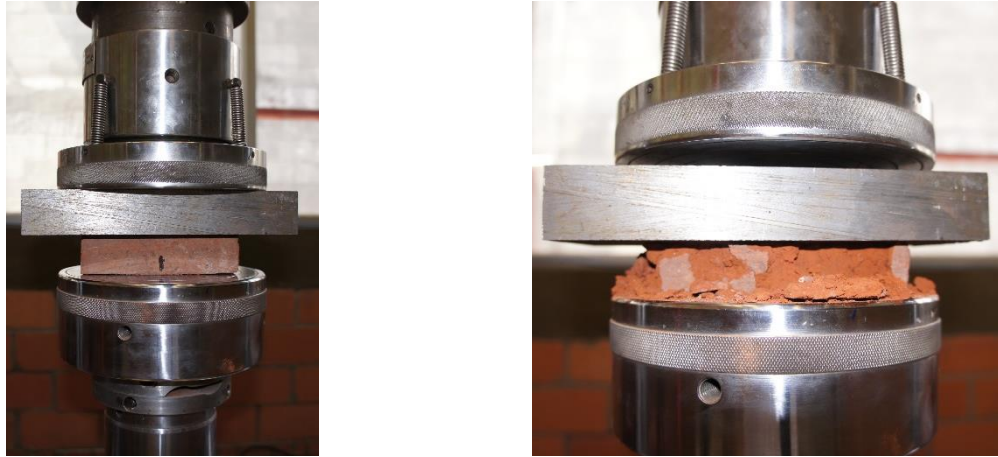


Figura A.6 Ensayo de piezas de mampostería

A.5 Compresión en cubos de mortero

Durante la construcción de los especímenes se obtuvieron muestras del mortero usado para pegar los tabiques, cada muestra consta de tres probetas cúbicas por cada mitad construida de los muros los cuales se ensayaron a compresión. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla A.0-5 .

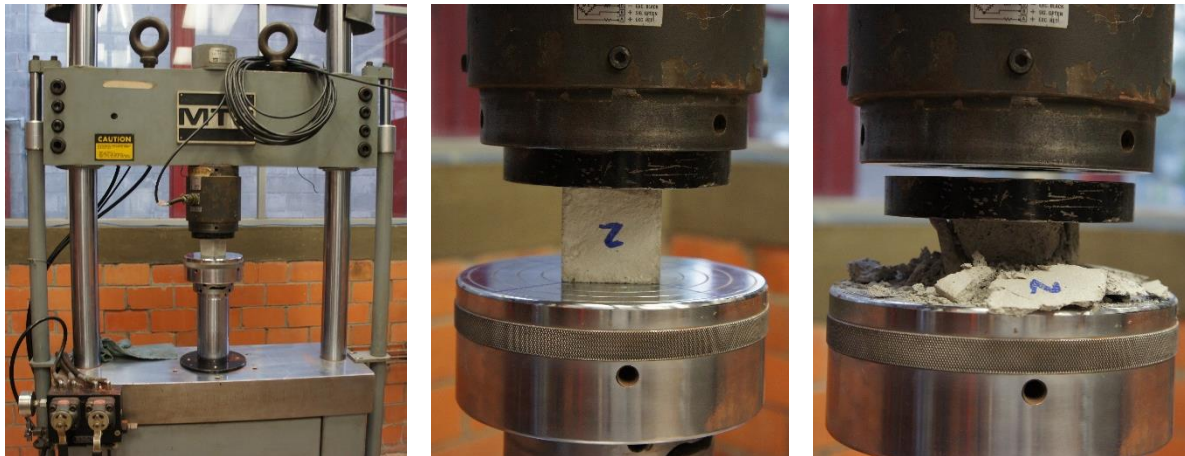


Figura A.7 Ensayo de cubos de mortero a compresión

Tabla A.0-5 Resultados ensaye cubos de mortero a compresión diagonal

| MURO | Muestra | Probeta | Edad, días | Dimensiones, cm | | | Peso, | Peso Vol. | Carga | Área | Esfuerzo | Esfuerzo promedio kg/cm ² |
|-------|----------------|---------|---------------|-----------------|------|------|-------|------------------|-------|-----------------|--------------------|--|
| | Nº | | | a | b | c | g | t/m ³ | kg | cm ² | kg/cm ² | |
| MCR-M | MCR-M | 1 | | 5.10 | 5.00 | 5.20 | 246.3 | 1.86 | 5506 | 25.50 | 215.92 | 176.05 |
| | 06-abr | 2 | 42 | 5.00 | 5.00 | 5.10 | 246.8 | 1.94 | 5705 | 25.00 | 228.20 | |
| | Mitad inferior | 3 | | 5.20 | 5.10 | 5.20 | 244.2 | 1.77 | 5508 | 26.52 | 207.69 | |
| | MCR-M | 4 | | 4.90 | 5.10 | 5.10 | 238.6 | 1.87 | 3318 | 24.99 | 132.77 | |
| | 20-abr | 5 | 28 | 5.20 | 5.00 | 5.00 | 238.4 | 1.83 | 3351 | 26.00 | 128.88 | |
| | Mitad superior | 6 | | 4.90 | 5.00 | 5.10 | 239.1 | 1.91 | 3500 | 24.50 | 142.86 | |
| MCR-E | MCR-E | 1 | | 5.00 | 5.00 | 5.10 | 237.6 | 1.86 | 4456 | 25.00 | 178.24 | 151.20 |
| | 17-abr | 2 | 31 | 5.10 | 5.10 | 5.20 | 237.3 | 1.75 | 4493 | 26.01 | 172.74 | |
| | Mitad inferior | 3 | | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 237 | 1.90 | 4468 | 25.00 | 178.72 | |
| | MCR-E | 4 | | 5.10 | 5.20 | 5.10 | 241.7 | 1.79 | 3319 | 26.52 | 125.15 | |
| | 19-abr | 5 | 27 | 5.00 | 5.00 | 5.10 | 240.7 | 1.89 | 3384 | 25.00 | 135.36 | |
| | Mitad superior | 6 | | 5.10 | 5.00 | 5.10 | 239.3 | 1.84 | 2983 | 25.50 | 116.98 | |
| MSR-M | MSR-M | A | | 5.00 | 5.00 | 5.10 | 230 | 1.80 | 6500 | 25.00 | 260.00 | 196.97 |
| | 09-may | B | 23 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 235 | 1.88 | 6614 | 25.00 | 264.56 | |
| | Mitad inferior | C | | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 245 | 1.96 | 6340 | 25.00 | 253.60 | |
| | MSR-M | D | | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 225 | 1.80 | 3158 | 25.00 | 126.32 | |
| | 11-may | E | 21 | 5.00 | 5.00 | 4.90 | 230 | 1.88 | 3253 | 25.00 | 130.12 | |
| | Mitad superior | F | | 5.00 | 4.90 | 5.00 | 225 | 1.84 | 3607 | 24.50 | 147.22 | |
| MSR-E | MSR-E | A | | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 235 | 1.88 | 4032 | 25.00 | 161.28 | 184.07 |
| | 15-may | B | 17 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 245 | 1.96 | 4207 | 25.00 | 168.28 | |
| | Mitad inferior | C | | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 240 | 1.92 | 4251 | 25.00 | 170.04 | |
| | MSR-E | D | | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 245 | 1.96 | 5066 | 25.00 | 202.64 | |
| | 17-may | E | 15 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 240 | 1.92 | 4965 | 25.00 | 198.60 | |
| | Mitad superior | F | | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 240 | 1.92 | 5089 | 25.00 | 203.56 | |

APÉNDICE B. MODELOS IMK EN OPENSEES (EJEMPLO)

OpenSees es un sistema abierto para la simulación de la respuesta sísmica de sistemas estructurales y geotécnicos, desarrollado como plataforma computacional para la investigación en ingeniería sísmica basada en desempeño. Posee capacidades avanzadas para la modelación y análisis de la respuesta no lineal de sistemas estructurales; dispone de un amplio rango de modelos de materiales, elementos y algoritmos de solución.

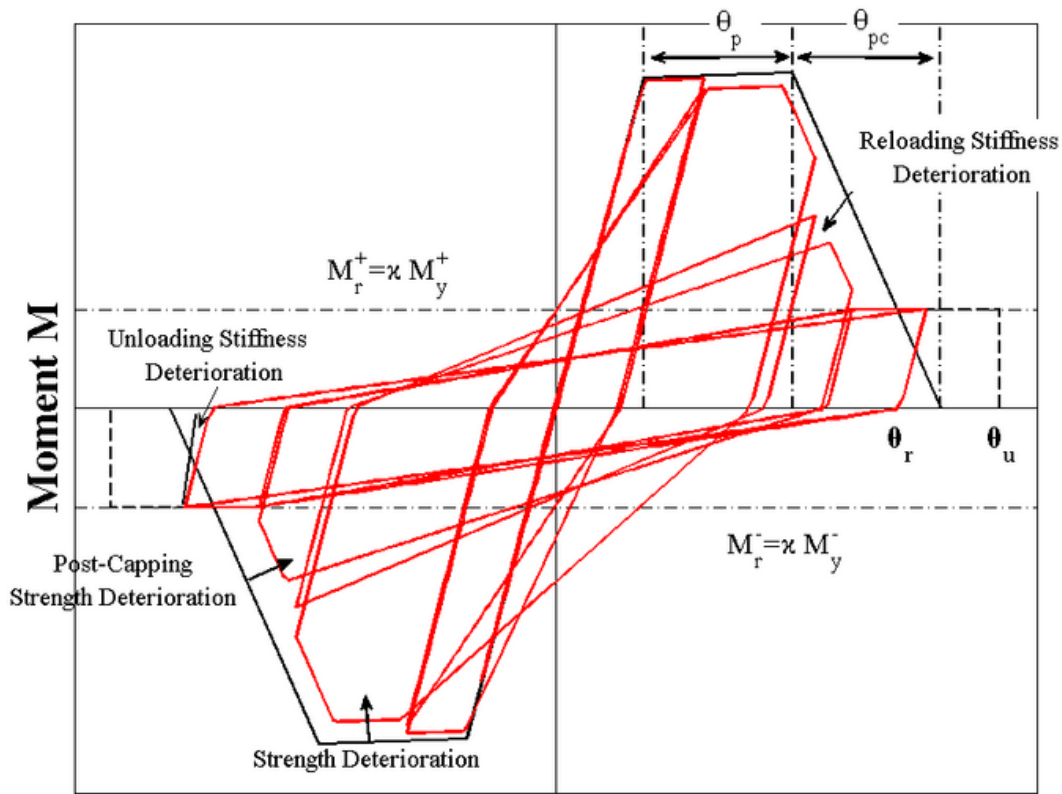
El lenguaje de interpretación llamado lenguaje TCL, originado del acrónimo en inglés “Tool Command Language” o lenguaje de herramientas de comando, ha sido utilizado para soporte de los comandos de OpenSees, los cuales son usados para la definición de la geometría del problema, estados de carga, formulación y solución. TCL es un lenguaje script (interpretación) provee útiles herramientas de programación, permite manipulación de variables, contiene estructuras básicas de control (if, while, for, foreach), evaluación de expresiones matemáticas y manipulación de archivos (Chacón W. D., 2009). (<https://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/2043>)

El comando para construir el modelo de deterioro Ibarra-Medina-Krawinkler IMK de pico orientado (ModIMKpeakOriented Material) en el programa OpenSees, requieren ciertos parámetros los cuales se mencionan a continuación:

Comando: **uniaxialMaterial ModIMKPeakOriented \$matTag \$K0 \$as_Plus \$as_Neg \$My_Plus \$My_Neg \$Lamda_S \$Lamda_C \$Lamda_A \$Lamda_K \$c_S \$c_C \$c_A \$c_K \$theta_p_Plus \$theta_p_Neg \$theta_pc_Plus \$theta_pc_Neg \$Res_Pos \$Res_Neg \$theta_u_Plus \$theta_u_Neg \$D_Plus \$D_Neg**

| | | |
|----------------|--------------|--|
| \$matTag | | Etiqueta que identifica al material |
| \$K0 | K_0 | Rigidez elástica |
| \$as_Plus | α_s^+ | Relación de endurecimiento por deformación para una dirección de carga positiva |
| \$as_Neg | α_s^- | Relación de endurecimiento por deformación para una dirección de carga negativa |
| \$My_Plus | F_y^+ | Límite elástico efectivo para una dirección de carga positiva |
| \$My_Neg | F_y^- | Límite elástico efectivo para una dirección de carga negativa (valor negativo) |
| \$Lamda_S | λ_s | Parámetro de deterioro cíclico para el deterioro de la Resistencia [$E_t = \lambda_{s} * M_y$; establecer $\lambda_{s} = 0$ para desactivar el modo de deterioro] |
| \$Lamda_C | λ_c | Parámetro de deterioro cíclico para el deterioro de la resistencia posterior al punto de pico máximo [$E_t = \lambda_{c} * M_y$; establecer $\lambda_{c} = 0$ para desactivar el modo de deterioro] |
| \$Lamda_A | λ_A | Parámetro de deterioro cíclico para el deterioro acelerado de la rigidez de la recarga [$E_t = \lambda_{A} * M_y$; establecer $\lambda_{A} = 0$ para desactivar este modo de deterioro] |
| \$Lamda_K | λ_K | Parámetro de deterioro cíclico para el deterioro de la rigidez de descarga [$E_t = \lambda_{K} * M_y$; establecer $\lambda_{K} = 0$ para desactivar el modo de deterioro] |
| \$c_S | C_s | Razón de deterioro de la fuerza. El valor predeterminado es 1.0. |
| \$c_C | C_c | Razón de deterioro de la fuerza posterior al punto de pico máximo. El valor predeterminado es 1.0. |
| \$c_A | C_A | Razón de deterioro acelerado de la recarga. El valor predeterminado es 1.0. |
| \$c_K | C_K | Razón de deterioro de la rigidez de descarga. El valor predeterminado es 1.0. |
| \$theta_p_Plus | δ_p^+ | Rotación pre punto máximo para la dirección de carga positiva (frecuentemente indicada como capacidad de rotación plástica). |

| | | |
|----------------------------|-----------------|---|
| $\delta_{theta_p_Neg}$ | δ_p^- | Rotación pre punto máximo para la dirección de carga negativa (frecuentemente indicada como capacidad de rotación plástica) (debe definirse como un valor positivo) |
| $\delta_{theta_pc_Plus}$ | δ_{pc}^+ | Rotación pos-punto máximo para la dirección de carga positiva |
| $\delta_{theta_pc_Neg}$ | δ_{pc}^- | Rotación post-punto máximo para la dirección de carga negativa (debe definirse como un valor de carga positivo). |
| δ_{Res_Pos} | F_{Res}^+ | Relación de resistencia residual para la dirección de carga positiva. |
| δ_{Res_Neg} | F_{Res}^- | Relación de resistencia residual para la dirección de carga negativa (debe definirse como un valor de carga positivo). |
| $\delta_{theta_u_Plus}$ | δ_u^+ | Capacidad de rotación última para la dirección de carga positiva |
| $\delta_{theta_u_Neg}$ | δ_u^- | Capacidad de rotación última para la dirección de carga negativa (debe definirse como un valor de carga positivo). |
| δ_{D_Plus} | D^+ | Relación de deterioro cíclico en la dirección de carga positiva (este parámetro se usa para crear un comportamiento histerético asimétrico para el caso de vigas compuestas). Para la respuesta histerética simétrica usar 1.0. |
| δ_{D_Neg} | D^- | Relación de deterioro cíclico en la dirección de carga negativa (este parámetro se usa para crear un comportamiento histerético asimétrico para el caso de vigas compuestas). Para la respuesta histerética simétrica usar 1.0. |



Chord Rotation θ

Figura B.0.1 Modelo de histéresis IMK de pico orientado

APÉNDICE C. MODELO DE HISTÉRESIS DE TAKEDA

Serie de reglas para la construcción del modelo histerético de Takeda (Takeda T., Sozen M. A, Nielsen N. N., 1970)

1. Condición: La carga de agrietamiento P_{cr} , no se ha excedido en una dirección. La carga se invierte desde una carga P en la otra dirección. La carga P es menor que la carga de fluencia P_y .
Regla: La descarga sigue una línea recta desde la posición en la carga P hasta el punto que representa la carga de agrietamiento en la otra dirección.
Ejemplo: Segmento 3 de la figura 2.4 (b) (Sí la descarga ocurre antes de las deformaciones representadas por el segmento 2, las reglas no proporcionan ningún ciclo de histéresis.)
2. Condición: Una carga P_1 se alcanza en una dirección en la curva primaria de tal manera que P_1 es más grande que P_{cr} , pero más pequeña que la carga de fluencia P_y . La carga se invierte a $-P_2$ de forma que $P_2 < P_1$.
Regla: Descarga paralela a la curva de carga para ese medio ciclo.
Ejemplo: Segmento 5 paralelo al segmento 3 en la figura 2.4 (b)
3. Condición: Se alcanza una carga P_1 en una dirección de tal manera que P_1 es más grande que P_{cr} , pero no más grande que la carga de fluencia P_y . La carga se invierte a $-P_3$ de forma que $P_3 > P_1$.
Regla: La descarga sigue una línea recta que une el punto de retorno y el punto que representa el agrietamiento en la otra dirección.
Ejemplo: Segmento 10 b en la figura 2.4 (b).
4. Condición: uno o más ciclos de carga han ocurrido. La carga es cero.
Regla: La construcción de la curva de carga, conecta al punto con una carga cero hasta el punto alcanzado en el ciclo anterior, si ese punto se encuentra en la curva primaria o en una línea dirigida a un punto en la curva primaria. Si el ciclo de carga anterior no contiene dicho punto, vaya al ciclo anterior y continúe el proceso hasta que se encuentre dicho punto. Luego conecta ese punto con carga cero.
Excepción: Si no se ha excedido el punto de fluencia y si el punto de carga cero no está dentro de la proyección horizontal de la curva primaria para esa dirección de carga, conecte el punto de carga cero con el punto de fluencia para obtener la pendiente de la carga.
Ejemplo: Segmento 12 en la figura 2.4 (b) representa la excepción. Está dirigido al punto de fluencia más que al punto más alto en el segmento 2. EL segmento en la figura 2.4 (b) representa una aplicación de rutina, mientras el segmento 20 representa un caso en el que la curva de carga apunta al punto máximo del segmento 12.
5. Condición: La carga de fluencia P_y excede en una dirección.
Regla: La curva de descarga sigue la pendiente dada por la siguiente ecuación:

$$k_r = k_y \left(\frac{D_y}{D} \right)^{0.4}$$

k_r : Pendiente de la curva de descarga.

k_y : Pendiente de la línea que une el punto de fluencia en una dirección con el punto de agrietamiento en la otra dirección.

D : deflexión máxima obtenida en la dirección de carga.

D_y : Deflexión de fluencia.

Ejemplo: Segmento 4 figura 2.4 (c)

6. Condición: La carga de fluencia se excede en una dirección, pero la carga de agrietamiento no se excede en la dirección opuesta

Regla: La descarga sigue la regla 5. La carga en la otra dirección continua como una extensión de la línea de descarga hasta la carga de agrietamiento. Entonces, la curva de carga apunta al límite de fluencia.

Ejemplo: Segmento 4 y 5 en figura 2.4 (c)

7. Condición: uno o más ciclos de carga han ocurrido.

Regla: si el cuarto de ciclo inmediatamente anterior se mantuvo en un lado del eje de carga cero, descarga a la velocidad basada en las reglas 2, 3 y 5, cualquiera que sea el que dirigen el historial de carga anterior. Si el cuarto de ciclo inmediatamente anterior cruzo el eje de carga cero, descargar el 70% de la velocidad basada según las reglas 2, 3 y 5, cualquiera que sea el que rige en el historial de carga anterior, pero no en una pendiente más plana que la pendiente de carga inmediatamente anterior.

Ejemplo: Segmento 7 en figura 2.4 (b)

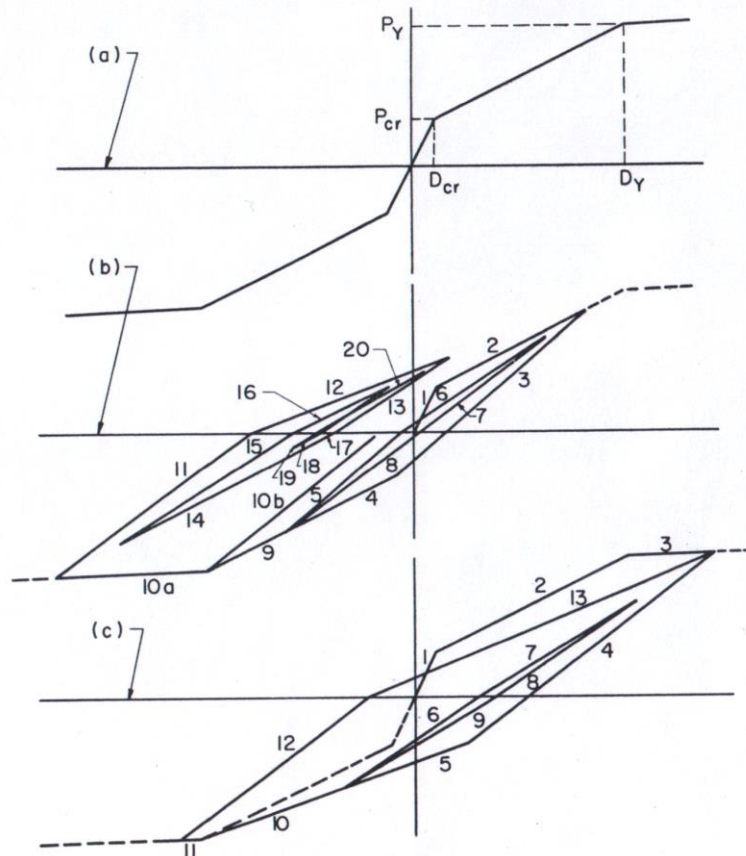


Figura C.0.1 Modelo histérico de Takeda

APENDICE D. DESFASE DE LAS SEÑALES DE LOS ENSAYES DINÁMICOS

Durante el procesamiento de los datos obtenidos en los ensayos dinámicos de los muros MSR y MCR para graficar la curva histerética de estos muros, se observó que la curva presentaba un orden inverso de como tendría que ir la curva; se empezaba a ascender por la parte inferior del ciclo y llegaba hasta la fuerza máxima del ciclo y regresaba por la parte superior del ciclo, esto se presentaba tanto para el lado positivo como negativo.

A partir de este detalle que se presentó en las curvas histeréticas se revisaron los datos, los cálculos para obtener la fuerza en el muro hasta que se encontró que los registros de la celda de carga (canal 49 de la instrumentación externa) y el acelerómetro con el cual se trabajó para obtener las fuerzas sobre el muro (canal 6 de la instrumentación externa) presentaban un desfase entre estos registros, como se muestra en la figura D.0.1; el desfase de las señales que se encontró fue de 14 pasos del registro de datos ($\Delta t=0.004$ o $0.056s$). En la figura D.0.2 se muestra el alineado de estos registros moviendo los 14 pasos en la serie de datos de la celda de carga.

Como una forma de corroborar el desfase de las señales se utilizó el programa Degtra (Ordaz M., Montoya C., 2005) en el cual tiene la opción alinear los registros, se selecciona en el numerador y denominador el registro para este caso fue celda de carga (canal 49) en el numerador y acelerómetro (canal 6) en el denominador, y con el botón de correlación cruzada y la opción de alinear registro sale una ventana en la que muestra el valor Tau Máx (tiempo de desfase entre las señales) y pregunta si se desea alinear el registro; verificando los datos ya alineados le aumenta al inicio del registro el número de pasos que están desfasadas las señales. En la imagen D.0.3 se muestra el alineado de los registros con el programa Degtra.

Con este ajuste que se encontró se realizaron los ajustes y se volvió a calcular la fuerza en el muro y se volvió a graficar la curva de histéresis de los muros y ya presentaba que el sentido de los ciclos iba por la parte superior hasta la fuerza máxima de cada ciclo y descargaba por la parte inferior del ciclo, así en ambos lados positivo y negativo.

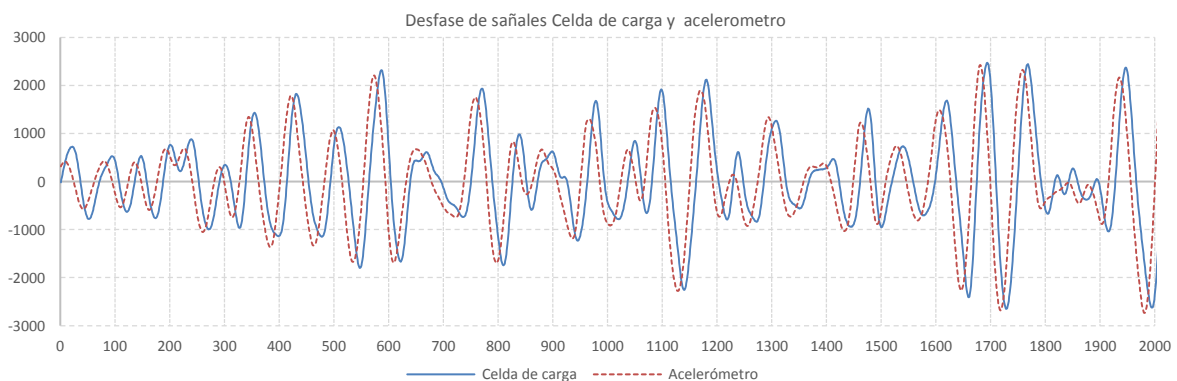


Figura D.0.1 Desfase entre señal celda de carga y acelerómetro

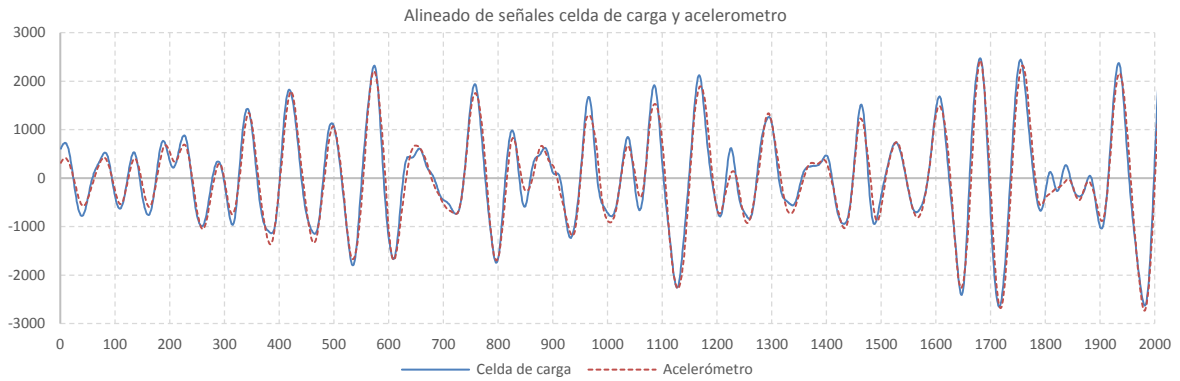


Figura D.0.2 Alineado de señal celda de carga y acelerómetro

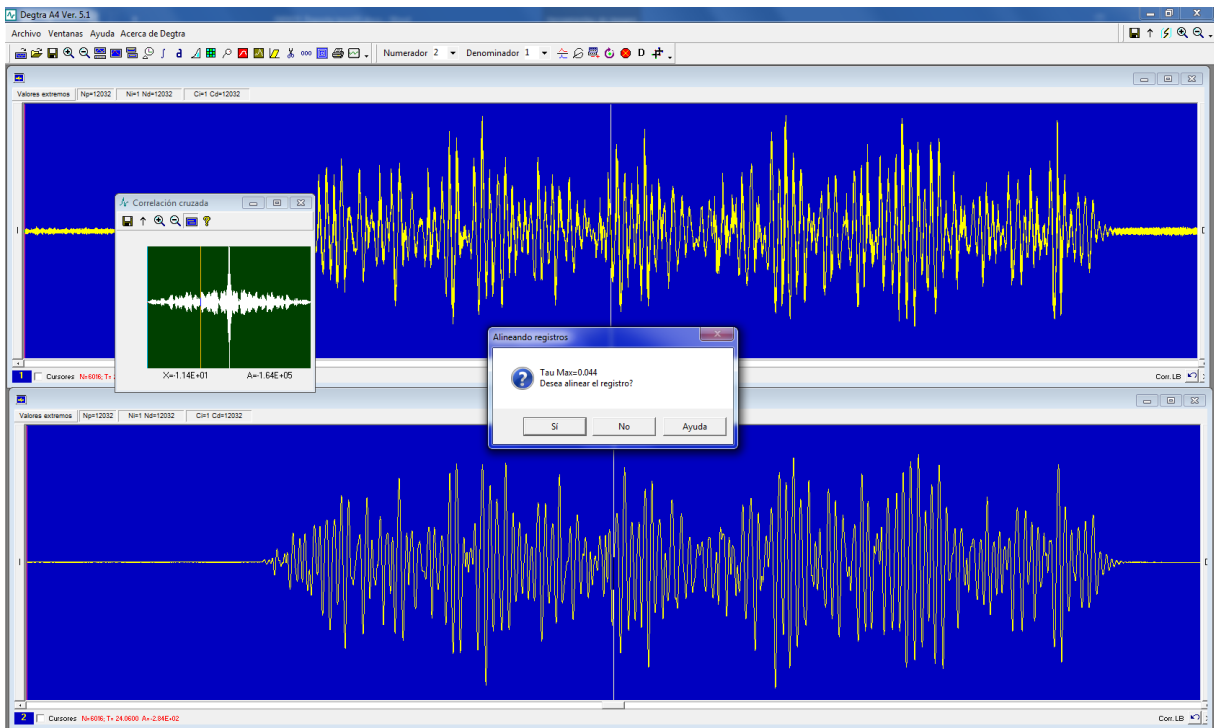


Figura D.0.3 Alineado de señales con DEGTRA