

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



Estudio del comportamiento dinámico de muros de ductilidad limitada mediante ensayo de modelos a escala reducida en mesa vibradora

INFORME DE SUFICIENCIA

Para optar el Título Profesional de

INGENIERO CIVIL

CÉSAR AUGUSTO DE LA CRUZ DEL ÁGUILA

Lima - Perú

2014

INDICE

RESUMEN	3
LISTA DE CUADROS	5
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE SIMBOLOS Y DE SIGLAS	9
INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES	12
1.1 ANTECEDENTES	12
1.2 OBJETIVOS	12
1.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE MUROS DE DUCTILIDAD LIMITADA	12
CAPÍTULO II: ANÁLISIS DIMENSIONAL	14
2.1 TEORÍA DE ANÁLISIS DIMENSIONAL	14
2.1.1 Leyes de similitud	15
2.2 DIMENSIONES DEL MODELO PROTOTIPO	19
2.3 MICROCONCRETO	20
2.3.1 Agregados	20
2.3.2 Mezcla	25
2.4 ESCALAMIENTO DE MODELOS	27
CAPÍTULO III: ANÁLISIS TEORICO	32
3.1 GENERALIDADES	32
3.1.1 Consideraciones generales para el análisis	32
3.2 CÁLCULO DE LA CAPACIDAD TEÓRICA	33
3.2.1 Verificación por flexocompresión	33
3.2.2 Verificación por corte	35
3.2.3 Cálculo de rigidez	37
CAPÍTULO IV: PARTE EXPERIMENTAL	38
4.1 LABORATORIO Y EQUIPOS DE ENSAYO	38
4.1.1 Programa de cómputo para envío de señales a la mesa vibradora	38
4.1.2 Control de ensayo y registro de resultados	39
4.2 CONSTRUCCIÓN DE LOS ESPECÍMENES	40
4.3 RESISTENCIA DEL CONCRETO	45
4.3.1 Objetivo	45
4.3.2 Técnicas de ensayo	45
4.3.3 Resultados obtenidos	48

4.4	ENSAYO DINÁMICO DE ESPECÍMENES EN MESA VIBRADORA	49
4.4.1	Objetivos	49
4.4.2	Técnica de ensayo	49
4.4.3	Calibración de mesa vibradora	55
	CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS	56
5.1	GENERALIDADES	56
5.2	ENSAYO DE VIBRACIÓN LIBRE	56
5.3	ENSAYO CON REGISTRO SÍSMICO	62
5.3.1	Resultados de los ensayos	63
5.4	EVALUACIÓN DE RESULTADOS	76
	CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
6.1	CONCLUSIONES	77
6.2	RECOMENDACIONES	79
	BIBLIOGRAFÍA	80
	ANEXO I: PROGRAMA DE CÓMPUTO	82

RESUMEN

En nuestro país se realizan estudios experimentales de diferentes sistemas estructurales, principalmente en base a ensayos con cargas laterales cíclicas, los cuales pueden no reflejar correctamente el comportamiento dinámico real de las edificaciones ante una carga sísmica debido a la influencia de la velocidad de carga en la rigidez y en la resistencia. Por este motivo se consideró el ensayo en mesa vibradora (Laboratorio de Estructuras – CISMID), el cual permite la aplicación de cargas sísmicas a los modelos a ensayar, los cuales deben ser a escala reducida debido a las dimensiones de la mesa vibradora.

El sistema estructural de muros de ductilidad limitada tiene un amplio uso en nuestro país; al respecto se han venido realizando diversas investigaciones, principalmente mediante ensayos con cargas laterales cíclicas, por lo que la realización de ensayos dinámicos permitirá una mejor comprensión de su comportamiento real frente a un sismo.

El presente trabajo estudia el comportamiento experimental de los denominados muros de ductilidad limitada ante la aplicación de cargas sísmicas dinámicas en una mesa vibradora, empleando para ello modelos a escala reducida.

En el primer capítulo se presentan los principales objetivos de este informe que incluyen la generación de un programa que permita la aplicación de ondas sísmicas en la mesa vibradora del laboratorio de estructuras del Cismid y el análisis tanto teórico como experimental de muros a escala construidos con el sistema de muros de ductilidad limitada.

En el segundo capítulo se presenta la teoría de análisis dimensional que permite trabajar con modelos a escala reducida, así como también se determinan los factores a utilizar durante los ensayos y las dimensiones de los modelos a ensayar.

En el tercer capítulo se determina la capacidad teórica de los muros motivo de estudio, en función de las características de los materiales empleados en la fabricación de los modelos.

El cuarto capítulo describe la parte experimental, incluyendo la descripción del programa generado además de los procedimientos de construcción y de ensayo de los modelos a escala.

Finalmente, el quinto capítulo muestra los resultados obtenidos de los ensayos, los cuales debido a las condiciones de los ensayos no logran alcanzar el nivel de falla, pero sin embargo muestran la reducción inicial de la rigidez del modelo. Entre las principales conclusiones del estudio se considera la factibilidad de la realización de este tipo de ensayos presentando diversas consideraciones a tener en cuenta en futuras investigaciones. Por otra parte, con respecto a los muros se observa una reducción notoria de su rigidez ante cargas menores, por lo que se recomienda tener en cuenta este punto al definir su rigidez efectiva.

LISTA DE CUADROS

Cuadro N° 2.1.- Factores de escala	17
Cuadro N° 2.2.- Factores de escala (relación de Cauchy) considerando las propiedades del concreto.....	18
Cuadro N° 2.3.- Análisis granulométrico comparativo de muestras de arena disponibles	22
Cuadro N° 2.4.- Muestra de arena 1 tamizado por la malla # 8	23
Cuadro N° 2.5.- Huso granulométrico arena	24
Cuadro N° 2.6.- Análisis granulométrico arena combinada.....	24
Cuadro N° 2.7.- Proporciones de mezcla	26
Cuadro N° 2.8.- Factores de escala completos y simplificados.....	27
Cuadro N° 2.9.- Factores de escala variables independientes.....	28
Cuadro N° 2.10.- Factores de escala variables dependientes	28
Cuadro N° 2.11.- Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo	31
Cuadro N° 3.1.- Capacidad por flexocompresión prototipo	34
Cuadro N° 3.2.- Capacidad por flexocompresión modelo a escala	35
Cuadro N° 3.3.- Capacidad al corte.....	37
Cuadro N° 4.1.- Cálculo de módulo de elasticidad del microconcreto.....	48
Cuadro N° 4.2.- Cargas aplicadas sobre los muros	49
Cuadro N° 4.3.- Niveles de aceleración aplicados	55
Cuadro N° 5.1.- Rigidez de muros por vibración libre.	61
Cuadro N° 5.2.- Cargas verticales aplicadas a los muros ensayados	62
Cuadro N° 5.3.- Aceleraciones máximas aplicadas durante los ensayos.....	63
Cuadro N° 5.4.- Aceleraciones máximas - Muro M1 - Carga vertical = 10.07 kg	65
Cuadro N° 5.5.- Amplificación de la aceleración - Muro M1 - Carga vertical = 10.07 kg ..	65
Cuadro N° 5.6.- Degradación de la rigidez - Muro M1 - Carga vertical = 10.07 kg.....	66
Cuadro N° 5.7.- Fuerza vs deformación - Muro M1 -Carga vertical = 10.07 kg.....	66
Cuadro N° 5.8.- Aceleraciones máximas - Muro M1 - Carga vertical = 26.57 kg	67
Cuadro N° 5.9.- Amplificación de la aceleración - Muro M1 - Carga vertical = 26.57 kg ..	67
Cuadro N° 5.10.- Degradación de la rigidez - Muro M1 - Carga vertical = 26.57 kg.....	67
Cuadro N° 5.11.- Fuerza vs deformación - Muro M1 -Carga vertical = 26.57 kg.....	68
Cuadro N° 5.12.- Aceleraciones máximas - Muro M2 - Carga vertical = 29.27 kg	69
Cuadro N° 5.13.- Amplificación de la aceleración - Muro M2 - Carga vertical = 29.27 kg	69
Cuadro N° 5.14.- Degradación de la rigidez - Muro M2 - Carga vertical = 29.27 kg.....	69
Cuadro N° 5.15.- Fuerza vs deformación - Muro M2 -Carga vertical = 29.27 kg.....	70
Cuadro N° 5.16.- Aceleraciones máximas - Muro M2 - Carga vertical = 37.67 kg	71
Cuadro N° 5.17.- Amplificación de la aceleración - Muro M2 - Carga vertical = 37.67 kg	71
Cuadro N° 5.18.- Degradación de la rigidez - Muro M2 - Carga vertical = 37.67 kg.....	71
Cuadro N° 5.19.- Fuerza vs deformación - Muro M2 -Carga vertical = 37.67 kg.....	72

Cuadro N° 5.20.- Aceleraciones máximas - Muro M3 - Carga vertical = 37.67 kg	73
Cuadro N° 5.21.- Amplificación de la aceleración - Muro M3 - Carga vertical = 37.67 kg	73
Cuadro N° 5.22.- Degradación de la rigidez - Muro M3 - Carga vertical = 37.67 kg.....	74
Cuadro N° 5.23.- Fuerza vs deformación - Muro M3 -Carga vertical = 37.67 kg.....	75
Cuadro N° 5.24.- Rigidez teórica vs experimental.....	76

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 2.1.- Dimensiones de muro prototipo	19
Figura N° 2.2.- Análisis granulométrico de arena tamizada	23
Figura N° 2.3.- Análisis granulométrico arena combinada	25
Figura N° 2.4.- Gráfico esfuerzo vs deformación unitaria promedio de las mezcla de concreto consideradas	26
Figura N° 2.5.- Dimensiones de modelo a escala	29
Figura N° 2.6.- Ensayo de malla de refuerzo del modelo a escala.....	30
Figura N° 2.7.- Grafico esfuerzo deformación malla de refuerzo del modelo	30
Figura N° 3.1.- Diagrama de interacción prototipo	34
Figura N° 4.1.- Mesa vibradora	38
Figura N° 4.2.- Detalle de ingreso de datos	39
Figura N° 4.3.- Detalle de encofrado.....	40
Figura N° 4.4.- Encofrado y refuerzo de la cimentación	41
Figura N° 4.5.- Refuerzo de muros.....	41
Figura N° 4.6.- Vaceado del cimiento.....	42
Figura N° 4.7.- Vista lateral de encofrado	42
Figura N° 4.8.- Vaceado del muro (primera etapa).....	43
Figura N° 4.9.- Vaceado del muro (parte intermedia).....	43
Figura N° 4.10.- Vaceado del muro (etapa final).....	44
Figura N° 4.11.- Vibrado de la cimentación.....	44
Figura N° 4.12.- Toma de muestras de concreto	45
Figura N° 4.13.- Ensayo de compresión y muestra ensayada	46
Figura N° 4.14.- Ensayo de tracción indirecta	47
Figura N° 4.15.- Falla de espécimen	47
Figura N° 4.16.- Gráfico de esfuerzo vs deformación unitaria del microconcreto en muro M1	48
Figura N° 4.17.- Detalle de fijación de los muros a la mesa vibradora	50
Figura N° 4.18.- Detalle de masas aplicadas. Se colocaron listones alrededor de las masas para evitar movimientos laterales.	51
Figura N° 4.19.- Detalle de cargas. Se observa que las masas colocadas están cubiertas con tapas de madera para evitar el movimiento vertical de las mismas.....	51
Figura N° 4.20.- Detalle de cargas adicionales aplicadas sobre la plataforma.....	51
Figura N° 4.21.- Ubicación de sensores en el muro	52
Figura N° 4.22.- Vista general de los sensores	53
Figura N° 4.23.- Detalle de acelerómetros en la parte superior del muro.....	53
Figura N° 4.24.- Detalle de transductor (canal 4).....	54
Figura N° 4.25.- Detalle de transductores	54

Figura N° 4.26.- Detalle de transductor lateral (canal 7)	54
Figura N° 5.1.- Muro M1 - Vibración libre 1 - Acelerómetro 1	57
Figura N° 5.2.- Muro M1 - Vibración libre 1 - Acelerómetro 2.....	57
Figura N° 5.3.- Muro M1 - Vibración libre 2 - Acelerómetro 1.....	58
Figura N° 5.4.- Muro M1 - Vibración libre 2 - Acelerómetro 2.....	58
Figura N° 5.5.- Muro M2 - Vibración libre 1 - Acelerómetro 1.....	58
Figura N° 5.6.- Muro M2 - Vibración libre 1 - Acelerómetro 2.....	59
Figura N° 5.7.- Muro M2 - Vibración libre 2 - Acelerómetro 1.....	59
Figura N° 5.8.- Muro M2 - Vibración libre 2 - Acelerómetro 2.....	59
Figura N° 5.9.- Muro M3 - Vibración libre 1 - Acelerómetro 1.....	60
Figura N° 5.10.- Muro M3 - Vibración libre 1 - Acelerómetro2.....	60
Figura N° 5.11.- Muro M3 - Vibración libre 2 - Acelerómetro 1.....	60
Figura N° 5.12.- Muro M3 - Vibración libre 2 - Acelerómetro 2.....	61
Figura N° 5.13.- Registro sísmico aplicado	63
Figura N° 5.14.- Degradación de la rigidez - Muro M1 -Carga vertical = 10.07 kg	66
Figura N° 5.15.- Degradación de la rigidez - Muro M1 -Carga vertical = 26.57 kg	68
Figura N° 5.16.- Fuerza vs deformación - Muro M1	68
Figura N° 5.17.- Degradación de la rigidez - Muro M2 -Carga vertical = 29.27 kg	70
Figura N° 5.18.- Degradación de la rigidez - Muro M2 -Carga vertical = 37.67 kg	72
Figura N° 5.19.- Fuerza vs deformación - Muro M2	72
Figura N° 5.20.- Degradación de la rigidez - Muro M3 -Carga vertical = 37.67 kg	74
Figura N° 5.21.- Fuerza vs deformación - Muro M3	75

LISTA DE SIMBOLOS Y DE SIGLAS

a	: Aceleración
A	: Área
A_c	: Área de corte en la dirección analizada
A_v	: Área del refuerzo a lo largo de la sección de corte
$\beta\%$: Porcentaje de amortiguamiento
C_N	: Número de Cauchy
D.L.	: Decremento Logarítmico
E	: Módulo de elasticidad
E_c	: Módulo de elasticidad del concreto
E_s	: Modulo de elasticidad del acero
ε	: Deformación unitaria
ε_c	: Deformación unitaria del concreto a la rotura
f	: Frecuencia
f_y	: Esfuerzo de fluencia del acero
f'_c	: Resistencia a la compresión del concreto
F	: Fuerza
G	: Modulo de corte
H	: Longitud del muro
I	: Momoento de inercia del muro en la base alrededor de un eje perpendicular al plano
K_o	: Rigidez teórica
L	: Longitud
λ	: Factor de escala de la longitud
m	: masa
M	: Momento
M.F.	: Módulo de fineza
Nu	: Carga axial
ρ	: Densidad
ρ_h	: Cuantía de refuerzo horizontal del muro
σ	: Esfuerzo
t	: tiempo

- μ : Coeficiente de fricción
- V_n : Resistencia nominal al corte del muro
- V_c : Resistencia del concreto a la fuerza cortante
- V_s : Resistencia al corte aportado por el refuerzo horizontal

INTRODUCCIÓN

El presente informe tiene como principal objetivo el estudio del comportamiento experimental de los muros de ductilidad limitada bajo la acción de cargas sísmicas dinámicas, empleando para ello la teoría de análisis dimensional la cual nos permite generar modelos a escala reducida que podrán ser ensayados en la mesa vibradora disponible en los laboratorios de la facultad (Cismid).

Con esta investigación se busca tener un mejor entendimiento del comportamiento dinámico de los muros de ductilidad limitada tomando en cuenta que pese a su comportamiento frágil este sistema es ampliamente utilizado en nuestro país. Así mismo, considerando que los ensayos con cargas laterales cíclicas no reflejan el comportamiento dinámico real de las estructuras ante una carga sísmica se busca presentar herramientas que permitan el uso de la mesa vibradora disponible la cual por sus dimensiones requiere que los modelos sean a escala reducida.

Para alcanzar los objetivos trazados se evalúa la teoría de análisis dimensional tomando las herramientas que nos permiten escalar los modelos a ensayar así como las principales consideraciones a tomar en cuenta como las leyes de similitud a aplicar y las características de los materiales a usar. Una vez definidos estos puntos se realiza un análisis teórico de los especímenes (3 muros independientes) que nos permite tener un primer acercamiento de los resultados esperados y se procede a presentar el proceso constructivo, la parte experimental del estudio y los principales resultados obtenidos.

Los especímenes ensayados no fueron llevados a la falla debido a las limitaciones de aplicación de masas en la parte superior de los muros; sin embargo, se observa entre otras cosas una degradación inicial de la rigidez de los muros que amerita mayores estudios. Así mismo, se presenta las principales dificultades al realizar este tipo de ensayo y se deja disponibles herramientas, como el programa de cómputo para el envío de señales a la mesa vibradora, que podrán ser de utilidad en posteriores investigaciones

CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES

1.1 ANTECEDENTES

Desde hace algunos años en el país se viene construyendo edificios con el sistema estructural de muros de ductilidad limitada, el cual tiene características particulares en su diseño y construcción. Con respecto a la normatividad, este sistema estructural fue incluido con una adenda a la norma E-060 (2006) y posteriormente en el acápite 21.10 “Edificaciones con Muros de Ductilidad Limitada” en la actual norma E-060 (2009).

Las investigaciones realizadas referentes a este sistema se basan principalmente en la aplicación de cargas laterales cíclicas. En la presente investigación se estudia dicho sistema mediante la aplicación de cargas sísmicas dinámicas, usando el simulador de sismos (mesa vibradora) del Laboratorio de Estructuras del CISMID.

1.2 OBJETIVOS

Objetivo Principal

- Estudio del comportamiento experimental de muros de ductilidad limitada bajo cargas sísmicas dinámicas, mediante ensayo a escala reducida en mesa vibradora.

Objetivos Secundarios

- Análisis teórico del comportamiento y comparación con las respuestas experimentales
- Implementación de sistema (programa de cómputo) para realizar ensayos en mesa vibradora.

1.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE MUROS DE DUCTILIDAD LIMITADA

En el sistema de muros de ductilidad limitada, las resistencia sísmica y de cargas de gravedad en ambas direcciones se encuentra dada por muros delgados de concreto con un espesor mínimo de 10 cm, reforzados con malla electrosoldada en el eje del muro. Dicha malla se caracteriza por tener una mayor resistencia que el acero convencional pero menor ductilidad. En los extremos del muro se utiliza acero vertical convencional en una sola hilera, no empleándose extremos confinados.

Este sistema se denomina de ductilidad limitada ya que, a pesar que se espera

una mayor resistencia del conjunto, al someterse a esfuerzos por encima de su capacidad se produciría una falla frágil debida principalmente a las características del refuerzo empleado.

CAPÍTULO II: ANÁLISIS DIMENSIONAL

2.1 TEORÍA DE ANÁLISIS DIMENSIONAL

Las técnicas de estudio experimental son una herramienta importante para el estudio del comportamiento de los diferentes sistemas estructurales, tanto para verificar las respuestas obtenidas con técnicas analíticas como para resolver dudas existentes y proveer nuevas herramientas de análisis. Las pruebas de laboratorio pueden ser llevadas a cabo con especímenes de diferentes escalas, considerándose por lo general más confiables los resultados obtenidos de modelos a escala real; sin embargo, los ensayos a escala real pueden tener diversas limitaciones, como la necesidad de grandes espacios de laboratorio, la capacidad de los equipos de ensayo y los costos de construcción y ensayo de los especímenes. Los experimentos a escala reducida pueden ser usados para sobrellevar estas limitaciones; sin embargo, debe tenerse un especial cuidado con los resultados y de ser posible debe compararse la eficacia de los ensayos con resultados de modelos a escala real.

La elección del tamaño o escala de los modelos a ensayar depende principalmente de la capacidad de los equipos para realizar los ensayos (aplicación de cargas y medición de resultados) y del espacio disponible en el laboratorio. Otros factores de interés al elegir la escala de los modelos son el factor económico y el tiempo que se dispone. Este último es relativo, ya que el tiempo necesario para construir un modelo a escala reducida puede ser mayor al empleado para construir un modelo a escala real, ya que este último puede tener sistemas constructivos establecidos (encofrados, personal calificado) que permitirían una fácil construcción, mientras que un modelo a escala reducida requiere adecuar tanto los materiales como el sistema constructivo en sí.

En los ensayos a escala reducida es difícil simular con precisión las condiciones del prototipo objeto de estudio, debido a los errores inducidos durante el ensayo; asimismo las propiedades mecánicas y las condiciones experimentales pueden llegar a diferir del modelo real. Así la confiabilidad de los resultados obtenidos depende en gran parte de la habilidad de reproducir en los modelos a escala las principales características del prototipo y las acciones que lo afectan. Las leyes de similitud permiten la correlación de los factores más importantes que afectan al comportamiento del modelo, pudiendo a partir de la escala del modelo y de las propiedades de los materiales considerados definir las masas y cargas a ser aplicadas durante el ensayo, así como también los factores de escala a aplicar a

los resultados obtenidos.

2.1.1 Leyes de similitud

Al realizar un experimento se pueden encontrar una serie de variables que describen las condiciones y el comportamiento del sistema, pudiendo clasificarse en dos tipos, variables dependientes e independientes. Las variables independientes son las que en general describen las condiciones del sistema y determinan el comportamiento del mismo tales como dimensiones o características de los materiales empleados. Las variables dependientes son las que describen este comportamiento y son las que interesa determinar tales como deformaciones, esfuerzos, etc.

La relación entre las condiciones iniciales y los resultados obtenidos en un ensayo a escala reducida y un modelo a escala real está dada por una serie de factores que se aplican a dichas variables y que permiten, a partir de los datos obtenidos en el ensayo a escala reducida, escalarlos (mediante una multiplicación directa de las variables con sus respectivos factores de escala) para obtener resultados como si se tratase de un ensayo a escala real.

En los ensayos a escala reducida, en principio podemos conocer los factores de escala que afectan a las variables independientes por medición directa, pero no se conocen los factores para las variables dependientes que son de mayor interés para el estudio del comportamiento del modelo. El teorema de Buckingham-Vaschy, permite generar estos factores a partir de las variables independientes considerando una ley de similitud inicial. Así, dependiendo de los objetivos del ensayo se establece una relación adimensional dada en la que se introducen algunas variables independientes y una sola variable dependiente, de donde se puede deducir directamente el factor correspondiente a dicha variable dependiente y a partir de ésta deducir los factores restantes.

Dependiendo del ensayo a realizar y de las condiciones de laboratorio se debe definir la ley de similitud apropiada a utilizar. En el caso de tener materiales similares, se pueden considerar tres tipos de leyes de similitud, teniendo como variable independiente inicial el factor de escala de la longitud (λ).

a) Ley con masa predominante

Cuando el efecto de las cargas de gravedad juega un papel importante, es conveniente considerar un factor de masa λ^3 . Al considerar esta ley de similitud,

la distribución de masas del prototipo es similar a la del modelo a escala y no hay necesidad de adicionar más masa. Sin embargo, el tiempo es afectado con un factor de escala λ , lo cual puede complicar las condiciones de ensayo, en particular al usar métodos de ensayo dinámicos como los ensayos en mesa vibradora. Sin embargo, esto es menos relevante al realizar ensayos pseudodinámicos.

b) Ley con tiempo predominante

En este caso se considera un factor de escala de 1 para el tiempo, y es más adecuado cuando los efectos de las cargas de gravedad pueden ser despreciados. Esta ley se justifica en el hecho de que al mantenerse los valores de frecuencia, se puede obtener información cualitativa observando el comportamiento de la estructura ante un sismo dado. Sin embargo, se introducen distorsiones en la respuesta inelástica de los especímenes, ya que las fuerzas aplicadas no son proporcionales a los desplazamientos. En el caso de emplear ensayos dinámicos, es necesario aplicar una masa adicional, ya que el factor de escala de la masa es menor.

c) Ley con aceleración predominante

En los anteriores casos, la aceleración a ser aplicada debe ser multiplicada por un factor para reproducir los efectos a escala real. Sin embargo, la aceleración de la gravedad no puede ser escalada. Así, si los efectos debidos a la gravedad son importantes, entonces se considera la aplicación de un factor de 1 a la aceleración, lo cual permite simular tanto las fuerzas gravitacionales como las inerciales. En este caso es necesario adicionar masa al modelo, así como comprimir el tiempo. Sin embargo, es un método ideal para ensayos pseudodinámicos.

En la siguiente tabla se muestran los factores a aplicar a las variables que intervienen en el ensayo para escalarlas, dependiendo de la ley de similitud considerada.

Cuadro N° 2.1.- Factores de escala

Unidad	Dimension	Factor de escala		
		masa predominante	tiempo predominante	aceleración predominante
Longitud	L	λ	λ	λ
Masa	M	λ^3	λ	λ^2
Tiempo	T	λ	1	$\lambda^{1/2}$
Esfuerzo	$ML^{-1}T^{-2}$	1	1	1
Velocidad	LT^{-1}	1	λ	$\lambda^{1/2}$
Aceleración	LT^{-2}	λ^{-1}	λ	1
Fuerza	MLT^{-2}	λ^2	λ^2	λ^2
Rigidez	MT^{-2}	λ	λ	λ
Frecuencia	T^{-1}	λ^{-1}	1	$\lambda^{-1/2}$

Fuente: NAM-SIMKIM, YOUNG-HAK KWAK, SUN PIL CHANG, Pseudo dynamic test on small scale steel models using the modified similitude law, 13WCEE – Canada 2004

Debido a las dificultades que implica la adición de masa a los modelos, la cual se ve significativamente incrementada al emplear las leyes basadas en el tiempo y en la aceleración, y considerando la complejidad de los mecanismos de soporte necesarios para adicionar dichas masas, que complicarían el proceso de ensayo además de introducir ruido en las respuestas obtenidas, se consideró el empleo de la ley con masa predominante, la cual no requiere la adición de masas al sistema, ya que el factor de reducción es máximo (λ^3)

La ley con masa predominante tiene como ley de similitud inicial el número de Cauchy ($C_N = \rho v^2/E$, donde ρ = densidad, v = velocidad y E = módulo de elasticidad), el cual al ser adimensional debe ser el mismo en el prototipo y en el modelo. Al considerarse materiales similares los factores de ρ y E se vuelven 1; sin embargo, si se consideran las diferencias existentes entre el material prototipo y el material empleado en el modelo, estos factores pueden variar, afectando las respuestas obtenidas del sistema. En la siguiente tabla se muestra las relaciones a ser consideradas en este caso:

Cuadro N° 2.2.- Factores de escala (relación de Cauchy) considerando las propiedades del concreto

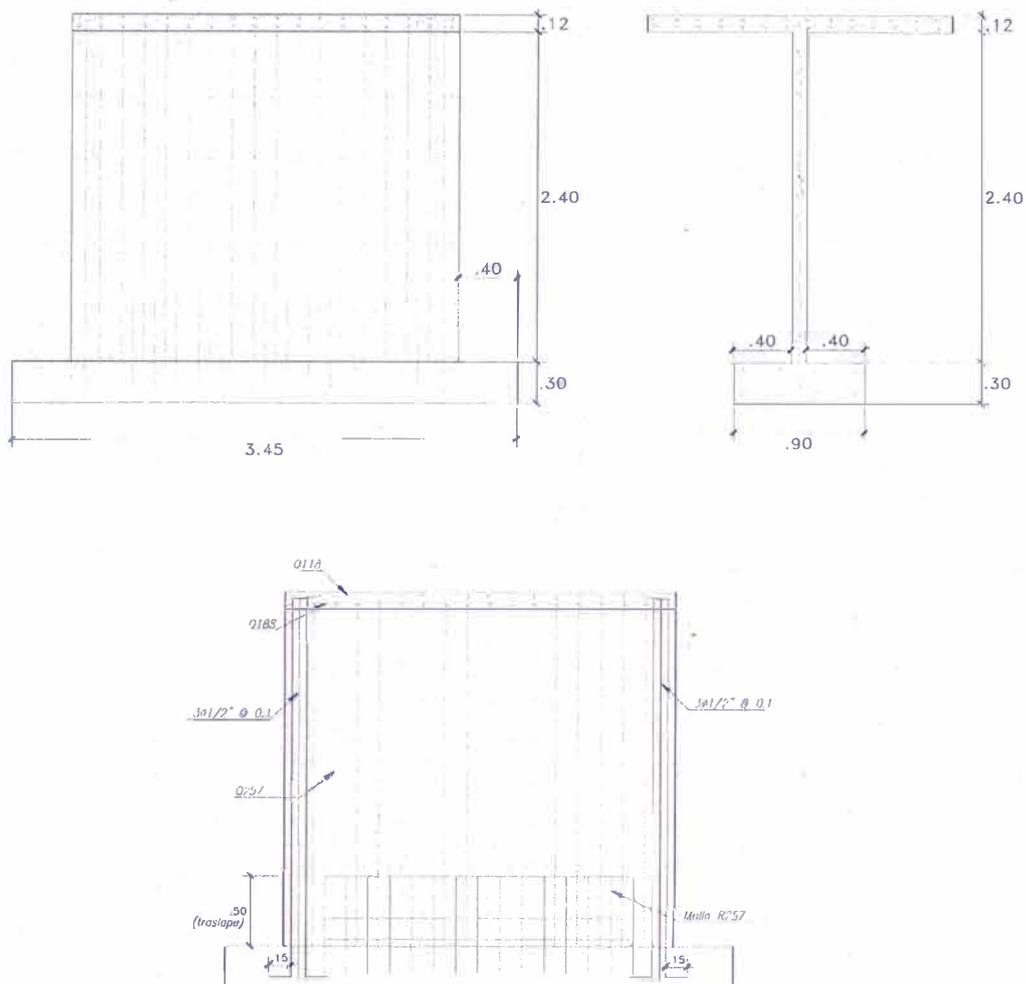
Unidad	Símbolo	Relación Cauchy
Longitud	L	$L_P = \lambda L_M$
Modulo de elasticidad	e	$E_P = e E_M$
Masa especifica	ρ	$\rho_P = \rho \rho_M$
Area	A	$A_P = \lambda^2 A_M$
Volumen	V	$V_P = \lambda^3 V_M$
Masa	m	$m_P = \rho \lambda^3 m_M$
Velocidad	v	$v_P = e^{1/2} \rho^{-1/2} v_M$
Aceleración	a	$a_P = e \rho^{-1} \lambda^{-1} a_M$
Fuerza	F	$F_P = e \lambda^2 F_M$
Momento	M	$M_P = e \lambda^3 M_M$
Esfuerzo	σ	$\sigma_P = e \sigma_M$
Deformación unitaria	ε	$\varepsilon_P = \varepsilon_M$
Tiempo	t	$t_P = \lambda e^{-1/2} \rho^{1/2} t_M$
Frecuencia	f	$f_P = \lambda^{-1} e^{1/2} \rho^{-1/2} f_M$

Fuente: PAULO CANDEIAS, A. CAMPOS COSTA, EMA COELHO, Shaking table tests of 1:3 reduced scale models of four unreinforced masonry buildings, 13WCEE – Canada 2004

Donde L, e y ρ son los factores que relacionan al modelo a ensayar con el prototipo y que se aplican para la longitud, el módulo de elasticidad del material considerado y la densidad del mismo.

2.2 DIMENSIONES DEL MODELO PROTOTIPO

Como modelo prototipo de referencia se consideró una serie de muros que fueron ensayados en el laboratorio de estructuras del CISMID en una investigación previa (Medina, G. 2005) en la cual se empleó un sistema de ensayo pseudodinámico. Las dimensiones y características del muro seleccionado son:



Fuente: Medina, G. 2005, Estudio del comportamiento experimental a escala natural de muros y módulo de concreto reforzados con malla electrosoldada, Tesis de Grado, FIC – UNI

Figura N° 2.1.- Dimensiones de muro prototipo

En la presente investigación se proyectó la construcción de 03 muros a escala reducida basándose en las características del modelo prototipo mencionado anteriormente considerando algunas modificaciones por cuestiones de facilidad constructiva. Así en el modelo no se construyó la losa de concreto en la parte

superior y no se colocaron dowells debido a que las dimensiones del modelo permitían colocar todo el acero de refuerzo vertical antes del vaciado de la base del muro.

El prototipo fue ensayado aplicándole una carga cíclica hasta alcanzar la falla. Se consideró representar este muro para estudiar su comportamiento ante la aplicación de cargas dinámicas en la mesa vibradora. Para determinar la escala a emplearse en los ensayos se consideró entre otros factores la capacidad de la mesa vibradora (la cual tiene un área de 1m x 1.2m y una capacidad de carga de 500 kg), y la posibilidad de un posterior ensayo de una estructura de 5 pisos con la misma escala, por lo que se tomó en cuenta también la distancia entre la superficie de la mesa y el techo (2m). De estas principales consideraciones, se determinó que la relación de escala entre el modelo y el prototipo sería de uno a siete (1/7).

2.3 MICROCONCRETO

Al construir modelos a escala reducida se deben tomar consideraciones particulares en cuanto a las propiedades de los materiales, los cuales son más importantes si se desea estudiar el comportamiento inelástico del sistema. El concreto en las estructuras a escala real es una combinación de cemento, agua, agregado grueso, agregado fino y aditivos. En el caso del microconcreto se debe introducir una variación en cuanto al agregado, debiendo reemplazarse el agregado grueso y fino por una combinación adecuada de agregados (dependiendo de la escala), que permita la construcción del espécimen, considerando tanto el espesor de los elementos estructurales a construir como el espaciamiento entre el refuerzo de los mismos, sin afectar en forma considerable el comportamiento final del concreto.

2.3.1 Agregados

El agregado tiene un rol importante en el comportamiento del concreto, por lo que una adecuada selección y empleo del mismo dará un concreto de las propiedades requeridas. Para determinar las características de los agregados debe considerarse su buen comportamiento en la mezcla, además de las dimensiones máximas y mínimas de los mismos que permitan la construcción del espécimen motivo de estudio.

Al considerar un factor de escala $\lambda = 7$, el espesor de los muros en el modelo está dado por la división del espesor del muro prototipo (0.15 m) entre 7, obteniéndose un espesor de muro del modelo de 0.021m. En general con fines constructivos se recomienda que el tamaño máximo de los agregados sea menor a $1/5$ del espesor del elemento, por lo que el tamaño máximo de los agregados debía ser menor de $0.021\text{m}/5 = 0.0042\text{m} = 4.2 \text{ mm}$. Esto nos ubicaría entre las mallas N#4 (4.75 mm) y N#8 (2.36 mm), por lo que se consideró adecuado que los agregados empleados pasen la malla N#8 para cumplir con esta condición, reemplazándose el agregado grueso y fino del prototipo por una mezcla adecuada de arena.

Otro elemento limitante es la presencia de materiales finos (que pasan la malla N#200), los cuales afectan la adherencia entre el agregado y la pasta, además de incrementar la demanda de agua en la mezcla, reduciendo la resistencia; así mismo algunas partículas inestables que se pueden encontrar a este nivel como esquistos, lentes de arcilla o partículas de baja densidad pueden producir ampollamiento y descascaramiento del concreto. Debido a esto se acostumbra limitar este material entre el 3% al 5% del agregado, asimismo se recomienda que no debe sobrepasar del 10% de agregado por debajo de N 100 (Wallace y Krawinkler, 1985). Un tercer parámetro a ser considerado en la obtención del agregado es el módulo de fineza, este es un concepto muy relevante establecido por Abrams y se define como la suma de los porcentajes retenidos acumulativos de la serie Standard hasta el Tamiz N# 100 y esta cantidad se divide entre 100. El sustento matemático del Módulo de Fineza (M.F.) reside en que es proporcional al promedio logarítmico del tamaño de partículas de una cierta distribución granulométrica. Debe tenerse muy en claro que es un criterio que se aplica tanto a la piedra como a la arena, pues es general y sirve para caracterizar cada agregado independientemente o la mezcla de agregados en conjunto.

La base experimental que apoya al concepto de Módulo de Fineza es que granulometrías que tengan igual M.F., independientemente de la gradación individual, requieren la misma cantidad de agua para producir mezclas de concreto de similar plasticidad y resistencia. En nuestro caso el agregado empleado estaba conformado únicamente de arena, por lo que se siguió las recomendaciones dadas para este material. Así en el caso de la arena el Modulo de Fineza recomendado es de 3, considerándose un valor mayor para un

material grueso y uno menor para un material fino. El empleo de una arena con un módulo de fineza menor implica una mayor necesidad de agua en la mezcla y una menor trabajabilidad, la cual es indispensable en este caso al tratarse de dimensiones pequeñas del modelo, por lo que se consideró apropiado emplear un módulo de fineza superior a 3.

Finalmente un último parámetro considerado en la selección del agregado se refiere a los husos granulométricos. Los estudios realizados y los husos existentes para mezclas de agregados (fino y grueso) para concreto, consideran la presencia de agregado grueso en los mismos, lo cual desfasaría la curva granulométrica del agregado empleado. Por esta razón se consideró como referencia el huso granulométrico correspondiente al agregado fino solamente.

2.3.1.1 Selección de agregados.

Para seleccionar la arena a ser empleada como agregado se hizo el análisis granulométrico a los distintos tipos de arena disponibles en el laboratorio, y se eligió de entre todas la arena con el mayor modulo de fineza (el cual iba a disminuir al tamizarlo por la malla N#8), y el menor porcentaje de material fino (que pasa la malla N#200). Los resultados de esta selección inicial se muestran en la siguiente tabla:

Cuadro N° 2.3.- Análisis granulométrico comparativo de muestras de arena disponibles

Malla #	Porcentaje retenido			
	Arena 1	Arena 2	Arena 3	Arena 4
4	1.6%	0.0%	3.7%	0.1%
8	11.9%	0.1%	13.0%	4.7%
16	23.8%	0.1%	18.6%	25.6%
30	30.2%	0.2%	22.2%	31.2%
50	19.0%	37.9%	17.5%	19.4%
100	9.5%	52.3%	11.5%	8.0%
200	3.4%	9.0%	7.7%	4.9%
resto	0.6%	0.8%	5.8%	6.0%

Modulo de Fineza	4.02	2.29	3.69	3.61
------------------	------	------	------	------

De las arenas disponibles se eligió la Arena 1, con un módulo de fineza de 4.02 y un porcentaje de finos de 0.6%. Como siguiente paso se procedió a tamizar dicha arena por la malla N#8 para obtener el tamaño máximo de agregado deseado, obteniéndose el siguiente análisis granulométrico:

Cuadro N° 2.4.- Muestra de arena 1 tamizado por la malla # 8

Malla #	porcentaje retenido	acumulado retenido
4	0.0%	0.0%
8	0.0%	0.0%
16	27.5%	27.5%
30	35.0%	62.5%
50	21.9%	84.4%
100	11.0%	95.3%
200	4.0%	99.3%
resto	0.7%	100.0%

M.F.	3.7
------	-----

Como se observa en la tabla, el módulo de fineza se mantiene alto, esto debido a la alta concentración de agregados en las mallas N#16 y N#30, lo cual era de esperarse, ya que estas mallas conformaban la zona central del agregado antes de ser tamizado. Para observar la distribución se procedió a hacer la gráfica de la misma y su comparación con los husos granulométricos correspondientes a la arena, según la Norma ASTM C-33.

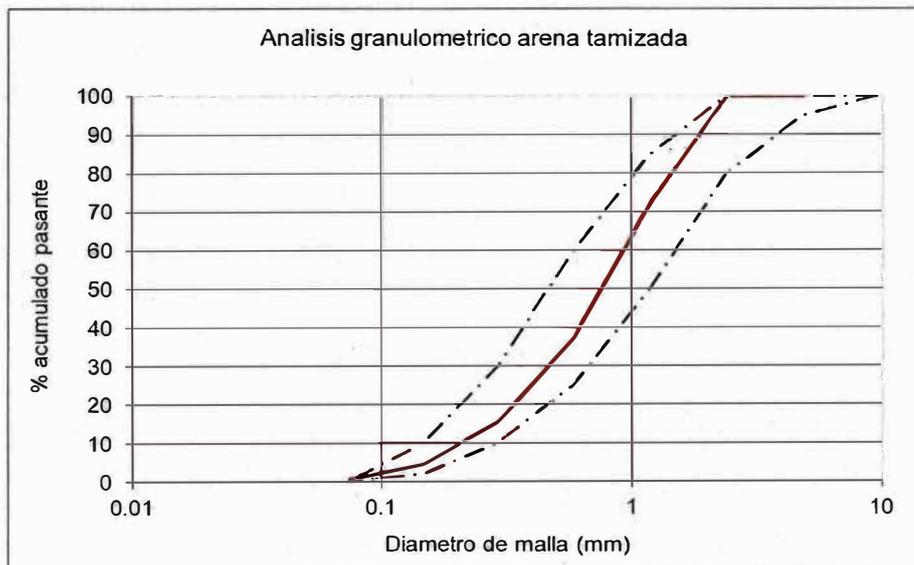


Figura N° 2.2.- Análisis granulométrico de arena tamizada

Cuadro N° 2.5.- Huso granulométrico arena

Huso granulométrico	
Malla #	Acumulado pasante %
3/8"	100
# 4	95 a 100
# 8	80 a 100
# 16	50 a 85
# 30	25 a 60
# 50	10 a 30
# 100	2 a 10

Fuente: Norma ASTM C-33

Como se observa en la Figura N° 2.2 la muestra de arena se encuentra dentro del huso granulométrico. Sin embargo el modulo de fineza es muy alto, por lo que se consideró necesario hacer una serie de tamizados y mezclas de la misma arena para obtener un agregado de mejores características. Después de diversas pruebas y combinaciones se consideró como apropiada la siguiente mezcla:

$$0.4 \text{ N\#8} + 0.3 \text{ N\#16} + 0.3 \text{ N\#30}$$

Donde:

N#8: Arena tamizada por la malla N# 8

N#16: Arena tamizada por la malla N#16

N#30: Arena tamizada por la malla N#30

Con esta mezcla se obtuvo el siguiente análisis granulométrico:

Cuadro N° 2.6.- Análisis granulométrico arena combinada

Malla #	porcentaje retenido	acumulado retenido
4	0.0%	0.0%
8	0.0%	0.0%
16	15.1%	15.1%
30	33.5%	48.6%
50	30.0%	78.6%
100	15.0%	93.6%
200	5.4%	99.0%
resto	1.0%	100.0%

M.F.	3.35
------	------

Al graficarlo con los husos correspondientes a la arena se obtuvo lo siguiente:

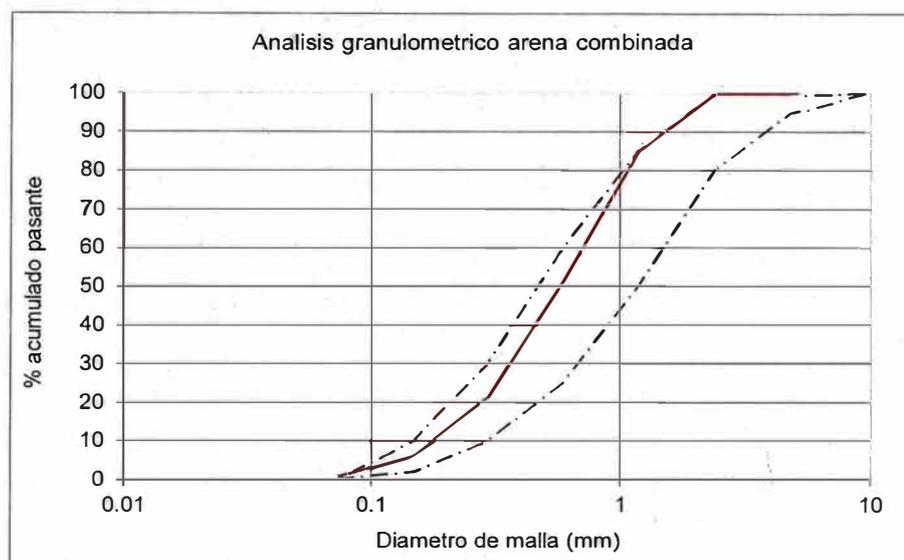


Figura N° 2.3.- Análisis granulométrico arena combinada

En este caso se observa que el módulo de fineza es ligeramente mayor a 3 lo cual es deseado ya que esto indica una mejor trabajabilidad de la mezcla. Asimismo, el porcentaje de finos es de 1%, lo cual está por debajo de los límites recomendados. El porcentaje de agregado que pasa la malla N#100 no sobrepasa el 10% y la curva se encuentra dentro de los husos recomendados, por lo que se consideró este agregado como adecuado para su uso en la fabricación de los especímenes de concreto.

2.3.2 Mezcla

Una vez definido el agregado a ser empleado, se procedió a diseñar la mezcla de concreto adecuada para el modelo y a determinar la relación entre el módulo de elasticidad del concreto empleado en el prototipo y el empleado en el modelo.

Para la fabricación del concreto se empleó cemento Pórtland Tipo I, la mezcla de agregados definida anteriormente, agua potable y aditivo plastificante Plastiment He-98. (2.34 lt/m³)

Se realizaron dos mezclas iniciales para observar su comportamiento (3 probetas por mezcla). Dichas proporciones de mezcla se encuentran en la siguiente tabla:

Cuadro N° 2.7.- Proporciones de mezcla

materiales	Relacion	
	Mezcla M1	Mezcla M2
cimento	1	1
arena	2.2	2.5
agua	0.6	0.6

En la

Figura N° 2.4 se observan los resultados del ensayo de compresión axial realizado a los 28 días. En dichos ensayos se obtuvo una resistencia promedio de 265.2 kg/cm² y 250.8 kg/cm² ,para las mezclas M1 y M2 respectivamente.

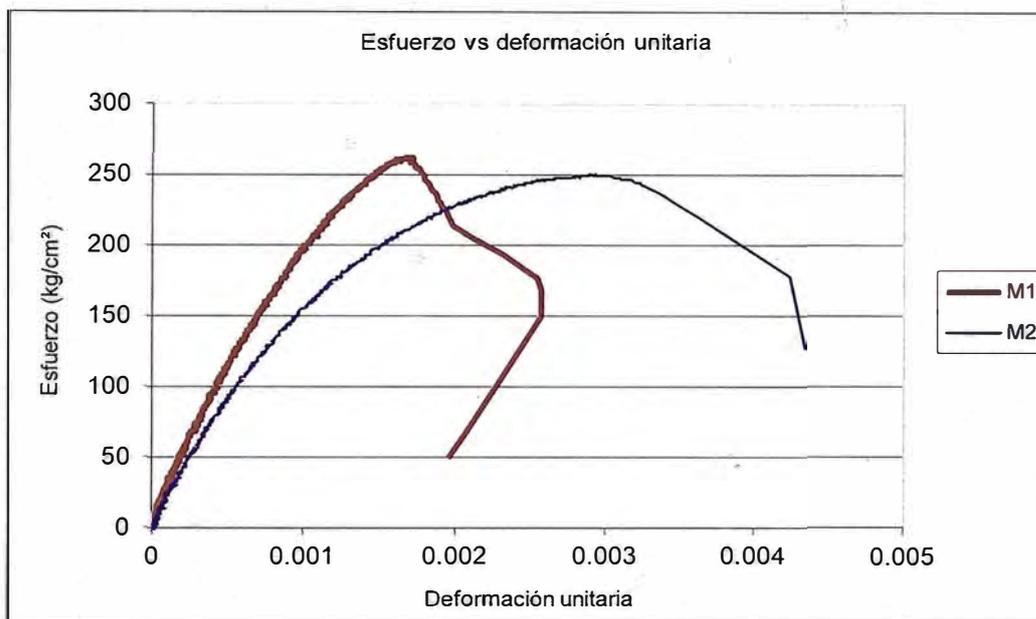


Figura N° 2.4.- Gráfico esfuerzo vs deformación unitaria promedio de las mezcla de concreto consideradas

Para el cálculo del módulo de elasticidad éste se consideró como la pendiente de la recta que une el origen con el punto correspondiente al 50% del f'c. Con este método se obtuvieron los siguientes valores de módulo de elasticidad:

Mezcla M1 – 224561 kg/cm²

Mezcla M2 – 168624 kg/cm²

Como se puede observar en la Figura N° 2.4, el comportamiento de la mezcla M2 es ligeramente más dúctil y su módulo de elasticidad es menor. Sin embargo la mezcla M1 es más fluida, lo

cual es un requisito indispensable para la construcción de los modelos, y el módulo de elasticidad resultante es más cercano al módulo de elasticidad del prototipo (23000 kg/cm^2), por lo que el efecto en el escalamiento será menor. Debido a esto se consideró emplear la mezcla M1 para la fabricación de los especímenes. En ambos casos el peso específico del concreto era de 2400 kg/cm^3 .

2.4 ESCALAMIENTO DE MODELOS

Como se determinó anteriormente, para el proceso de escalamiento se consideró la ley de similitud con masa predominante, considerando las relaciones que se mostraron en el Cuadro N° 2.8. Como se observa en dicho cuadro, los factores de escala de las respuestas del espécimen dependen de tres variables independientes, que son las correspondientes a la longitud, el módulo de elasticidad y la densidad. De acuerdo a los ensayos realizados con el microconcreto obtuvimos un factor de escala para la densidad de 1 y un factor de escala para el módulo de elasticidad de 1.02, por lo que se consideró para ambos casos igual a 1, quedando como única variable independiente la correspondiente a la relación de longitud definida previamente en 7. De lo antes expuesto simplificamos las relaciones, considerando $e = 1$ y $\rho = 1$ obteniendo la siguiente tabla:

Cuadro N° 2.8.- Factores de escala completos y simplificados

Unidad	Símbolo	Relación de Cauchy	
		Completa	Simplificada
Longitud	L	$L_P = \lambda L_M$	$L_P = \lambda L_M$
Módulo de elasticidad	e	$E_P = e E_M$	$E_P = E_M$
Densidad	ρ	$\rho_P = \rho \rho_M$	$\rho_P = \rho_M$
Área	A	$A_P = \lambda^2 A_M$	$A_P = \lambda^2 A_M$
Volumen	V	$V_P = \lambda^3 V_M$	$V_P = \lambda^3 V_M$
Masa	m	$m_P = \rho \lambda^3 m_M$	$m_P = \lambda^3 m_M$
Velocidad	v	$v_P = e^{1/2} \rho^{-1/2} v_M$	$v_P = v_M$
Aceleración	a	$a_P = e \rho^{-1} \lambda^{-1} a_M$	$a_P = \lambda^{-1} a_M$
Fuerza	F	$F_P = e \lambda^2 F_M$	$F_P = \lambda^2 F_M$
Momento	M	$M_P = e \lambda^3 M_M$	$M_P = \lambda^3 M_M$
Esfuerzo	σ	$\sigma_P = \sigma_M$	$\sigma_P = \sigma_M$
Deformación unitaria	ε	$\varepsilon_P = \varepsilon_M$	$\varepsilon_P = \varepsilon_M$
Tiempo	t	$t_P = \lambda e^{-1/2} \rho^{1/2} t_M$	$t_P = \lambda t_M$

Frecuencia	f	$f_p = \lambda^{-1} e^{1/2} \rho^{-1/2} f_M$	$f_p = \lambda^{-1} f_M$
------------	---	--	--------------------------

Fuente: PAULO CANDEIAS, A. CAMPOS COSTA, EMA COELHO, Shaking table tests of 1:3 reduced scale models of four unreinforced masonry buildings, 13WCEE – Canada 2004

Siendo λ el factor de relación entre el prototipo y el modelo ($\lambda = 7$). De acuerdo a esta tabla determinamos las dimensiones del espécimen a ensayar:

Cuadro N° 2.9.- Factores de escala variables independientes

Variables independientes			
Unidad	Factores de escala		
	Prototipo	Modelo	1/Fact mod.
Longitud	1	0.14286	7
Modulo de elasticidad	1	1	1
Masa especifica	1	1	1

Cuadro N° 2.10.- Factores de escala variables dependientes

Variables dependientes			
Unidad	Factores de escala		
	Prototipo	Modelo	1/Fact mod
Aceleración	1	7	0.14286
Masa	1	0.00292	343
Fuerza	1	0.02041	49
Tiempo	1	0.14286	7
Rigidez	1	0.14286	7
Peso	1	0.00292	343
Momento	1	0.00292	343
Esfuerzo	1	1	1

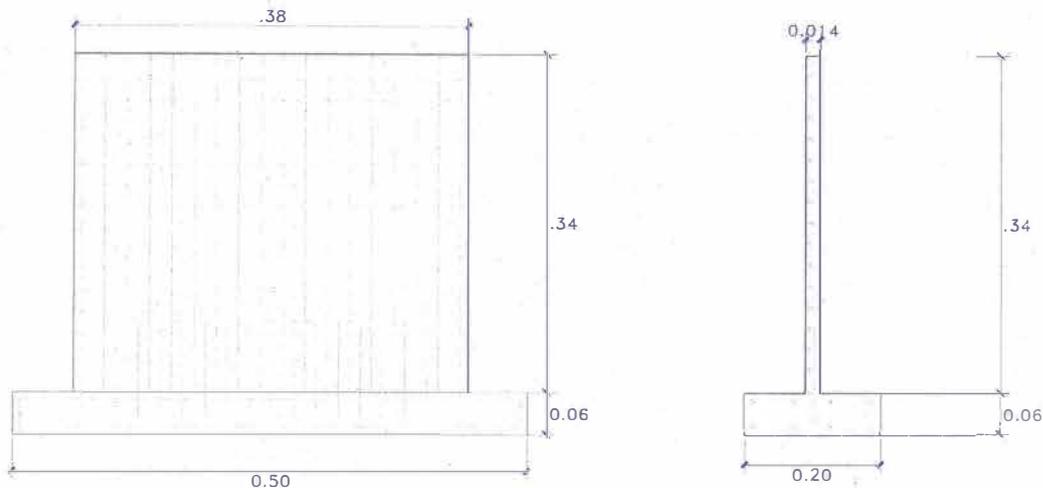


Figura N° 2.5.- Dimensiones de modelo a escala

Las dimensiones de los especímenes se encuentran definidas en la Figura N° 2.5. Se prepararon encofrados con características especiales que permitieron obtener las dimensiones referidas del modelo; asimismo se debe considerar el acero de refuerzo de los mismos, para esto se necesitó conseguir un acero adecuado, es decir que cumpla con las condiciones de fragilidad del acero empleado para reforzar el prototipo (mallas electrosoldadas). Como referencia para el caso de las mallas de refuerzo consideramos la cuantía la cual al ser un valor adimensional no es afectada por los efectos de escalamiento. De acuerdo a esto, considerando una malla de refuerzo QE-257 (cuantía 0.00257) en el prototipo, se tiene que la cuantía en el muro a ensayar debería ser la misma. Para determinar el diámetro de las varillas se puede tomar como referencia inicial el diámetro del acero en el prototipo y escalarlo dividiéndolo entre el factor de escala de longitud. Así el diámetro de las varillas en el prototipo es de 7 mm por lo que se puede considerar como referencia un diámetro de 1 mm. En el mercado es muy difícil conseguir varillas de acero con esas dimensiones, siendo las únicas disponibles encontradas las denominadas “mallas de acero galvanizado”. Se eligió dos tipos de mallas y se procedió a ensayarlas para determinar sus capacidad y comportamiento. Se realizaron diversos ensayos, como se muestra en la figura 2.6.

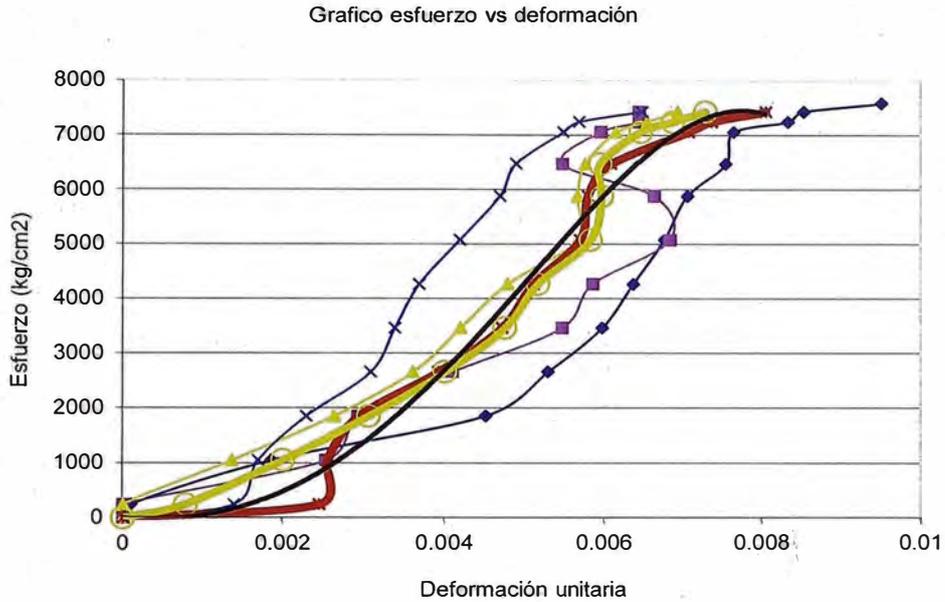


Figura N° 2.6.- Ensayo de malla de refuerzo del modelo a escala

Estos ensayos se realizaron cargando manualmente con pesos una muestra de la malla, debido a que los equipos disponibles no podían enganchar la varilla para ensayarla por ser muy delgada, midiendo las deformaciones ante cada carga hasta llegar a la rotura. Se observa en la parte inicial de los ensayos una deformación muy grande ante cargas pequeñas, esto debido a los reajustes iniciales en el espécimen ante las primeras cargas. Después de corregir estos datos iniciales se obtuvo la siguiente gráfica promedio.

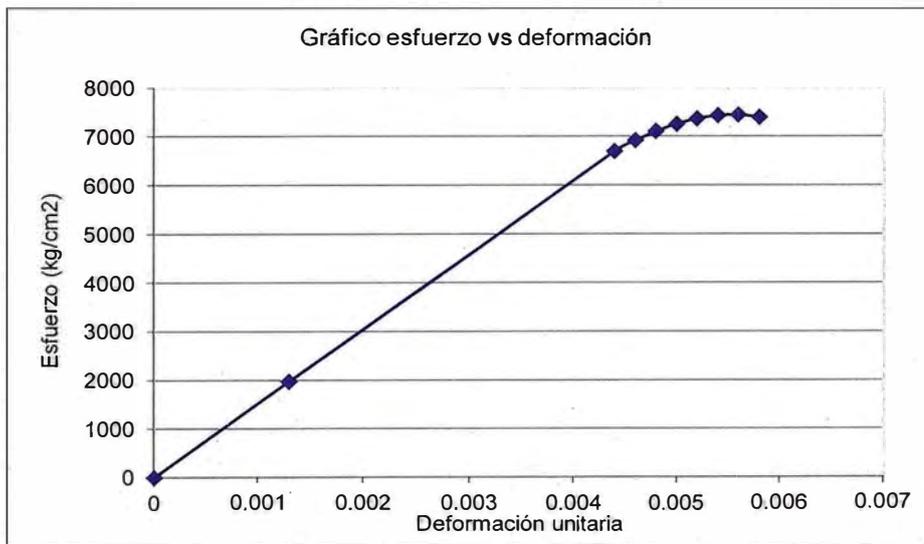


Figura N° 2.7.- Gráfico esfuerzo deformación malla de refuerzo del modelo

El gráfico esfuerzo vs deformación de la Figura N° 2.7 se basa en la polinómica calculada de la curva promedio, a la cual se le trazó una tangente para determinar la zona de cruce con el eje de abscisas. Como se observa el comportamiento de esta malla es muy frágil, lo cual se esperaba, ya que la malla electrosoldada correspondiente al prototipo se caracteriza por su comportamiento frágil. Sin embargo la resistencia alcanzada es de 7500 kg/cm², la cual es superior a los 5200kg/cm² de la malla electrosoldada empleada en el prototipo. En cuanto a las dimensiones considerando la cuantía dada, se eligió una malla con diámetro 1.07 mm, distribuida cada 1" (2.54cm) la cual dado el espesor de los muros (1.4 cm), da una cuantía de 0.00248, que es muy cercana al 0.00257 del prototipo.

Para el refuerzo en los extremos, en el prototipo se tenía 3 varillas de ½", lo cual daba una área de 3.46 cm². Al escalar esta área se obtiene un área para el modelo de 3.46/49 = 0.0707cm², la cual es equivalente a una varilla de 3mm; en este caso se logró conseguir varillas con esas dimensiones con un comportamiento más dúctil y con una resistencia de 6200 kg/cm², la cual es superior a los 4200kg/cm² en el prototipo.

Se observa que en ambos casos, si bien los refuerzos considerados cumplen las condiciones de cuantía, exceden los valores de resistencia en una relación aproximada de 1.45 (Tabla 2.11). Si bien esto no afecta a los factores de escala para el dimensionamiento de los especímenes, definitivamente afectará a los valores de capacidad máxima; debido a esto se consideró adecuado incrementar la capacidad del concreto para que la relación de incremento de resistencia entre los distintos materiales sea similar, y así la debilidad de uno no afecte a la capacidad del conjunto. En el modelo prototipo se tenía un concreto con un $f'_c=230$ kg/cm², por lo que se definió como objetivo conseguir un concreto de 330 kg/cm² para mantener la relación de resistencia de los materiales. Para esto se redujo el agua en la mezcla teniendo en cuenta la trabajabilidad, la cual es indispensable para el correcto vaceado de los muros.

Cuadro N° 2.11.- Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo

Acero de refuerzo	prototipo	modelo	modelo/prototipo
malla	5200	7500	1.44
acero extremo	4200	6200	1.48

CAPÍTULO III: ANÁLISIS TEORICO

3.1 GENERALIDADES

El análisis teórico permite conocer en forma previa el comportamiento de un elemento o un sistema estructural ante la acción de un conjunto de cargas específicas. Las fórmulas en las que se basa este análisis son producto tanto de desarrollos matemáticos, como de ensayos en laboratorio de sistemas estructurales específicos. En el caso de sistemas estructurales nuevos o que introduzcan variaciones a los ya conocidos, es necesario tomar en cuenta estas predicciones, tanto para verificar la validez de los ensayos, como para estudiar la posibilidad de adecuar las fórmulas al sistema motivo de estudio. Así se realizó un análisis teórico de la capacidad de los especímenes ensayados, además de un análisis dinámico para tener una idea inicial de su comportamiento.

3.1.1 Consideraciones generales para el análisis

Para el análisis de los especímenes se consideraron los siguientes valores para los materiales:

Concreto:

$$\begin{aligned}f_c &= 310 \text{ kg/cm}^2 && \text{(Resistencia a la compresión)} \\ \epsilon_c &= 0.0033 && \text{(deformación unitaria del concreto en la rotura)} \\ E_c &= 2.21 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2 && \text{(Módulo de elasticidad)}\end{aligned}$$

Acero extremo:

$$\begin{aligned}f_y &= 6200 \text{ kg/cm}^2 && \text{(Esfuerzo de fluencia)} \\ E_s &= 1.75 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2 && \text{(Módulo de elasticidad)}\end{aligned}$$

Malla electrosoldada:

$$\begin{aligned}f_y &= 7500 \text{ kg/cm}^2 && \text{(Esfuerzo de fluencia)} \\ E_s &= 1.53 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2 && \text{(Módulo de elasticidad)}\end{aligned}$$

La carga axial aplicada en los muros durante los ensayos tuvo algunas limitaciones debido a las condiciones de ensayo. Así ésta se fue incrementando verificando la estabilidad del sistema, por lo que se tiene distintas cargas para cada muro. Estas cargas son las siguientes:

Muro 1 10.07 kg – 26.57 kg

Muro 2 29.27 kg – 37.67 kg

Muro 3 37.67 kg

Al calcular la resistencia de los muros por flexo-compresión y por corte no se empleó ningún factor de reducción de resistencia, trabajándose en todos los casos con la capacidad nominal de los muros.

Para el análisis dinámico se consideró el sismo ocurrido en Lima el 3 de Octubre de 1974, debido a que éste es uno de los sismos más importantes ocurridos en la ciudad de Lima de los que se tiene registro, dando una idea de las condiciones a las que será sometida una estructura durante un sismo en esta zona.

3.2 CÁLCULO DE LA CAPACIDAD TEÓRICA

Para determinar la capacidad teórica de los especímenes se debe determinar tanto sus capacidad por corte como por flexocompresión, dando el valor menor una idea del mecanismo que causará la falla.

3.2.1 Verificación por flexocompresión

Para el cálculo de la carga lateral que producirá la falla por flexocompresión en los muros, primero se procede a calcular el diagrama de interacción a nivel de la base de los mismos, debido a que se considera que las exigencias de flexión máximas se presentaran a ese nivel. Luego se establece la carga axial a ser aplicada en cada muro durante el ensayo; con esta carga axial se ingresa al diagrama de interacción, determinándose el momento de falla correspondiente dividiéndose este momento entre la altura del muro, para obtener la carga lateral correspondiente, la cual producirá teóricamente la respectiva falla por flexocompresión.

Se procedió primero a calcular el diagrama de interacción del prototipo, el cual es el mismo para cada muro, al tener las mismas características, para posteriormente calcular su capacidad ante las distintas cargas verticales que les fueron aplicadas.

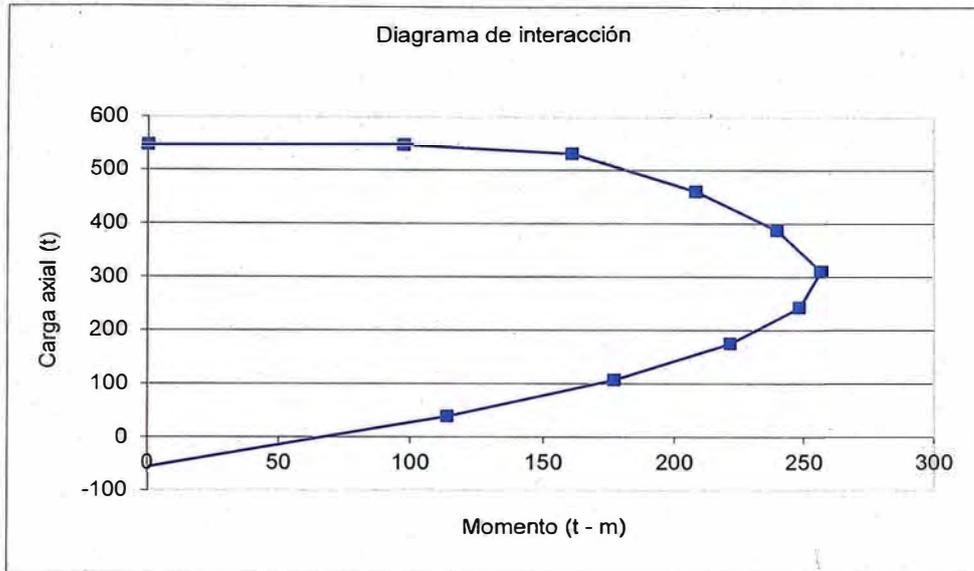


Figura N° 3.1.- Diagrama de interacción prototipo

Para el cálculo de la capacidad del prototipo a flexocompresión se debe escalar las cargas aplicadas a los especímenes, dividiendo dichas cargas por el factor de escala correspondiente al peso (Cuadro N° 2.10). Interpolando en el diagrama de interacción, se obtuvo la capacidad por flexocompresión correspondiente y dividiendo este momento por la altura se calculó la carga lateral que produciría la falla del muro.

Cuadro N° 3.1.- Capacidad por flexocompresión prototipo

Muro	Carga vertical (t)	Momento (t-m)	Carga lateral (t)
Muro 1			
carga a	3.45	70.7	29.5
carga b	9.11	77.5	32.3
Muro 2			
Carga a	10.04	78.7	32.8
Carga b	12.92	82.2	34.3
Muro 3	12.92	82.2	34.3

Cuadro N° 3.2.- Capacidad por flexocompresión modelo a escala

Muro	Carga vertical (kg)	Momento (kg-cm)	Carga lateral (kg)
Muro 1			
carga a	10.07	20612.24	601.2
carga b	26.57	22594.75	659.0
Muro 2			
Carga a	29.27	22944.61	669.2
Carga b	37.67	23965.01	699.0
Muro 3	37.67	23965.01	699.0

3.2.2 Verificación por corte

3.2.2.1 Corte por tensión diagonal

De acuerdo al Reglamento Nacional de Edificaciones (Norma Técnica E-060) la resistencia al corte de muros de concreto debido a la acción de fuerzas coplanares se puede establecer de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$V_n = V_c + V_s$$

$$V_n = (A_c \alpha \sqrt{f'_c}) + (A_c \rho_h f_y)$$

Donde:

V_n = Resistencia nominal al corte del muro

V_c = Resistencia del concreto a la fuerza cortante

V_s = Resistencia al corte aportada por el refuerzo horizontal

A_c = Área de corte en la dirección analizada

ρ_h = Cuantía de refuerzo horizontal del muro

f'_c = Resistencia nominal a la compresión del concreto

f_y = Esfuerzo de fluencia del acero

Para el diseño de edificios con muros de ductilidad limitada, el valor de α se determinará de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$\text{si } \frac{h_m}{l_m} \leq 1.5 \quad \alpha = 0.8$$

$$\text{si } \frac{h_m}{l_m} \geq 2.5 \quad \alpha = 0.53$$

$$\text{si } 1.5 < \frac{h_m}{l_m} < 2.5 \quad \alpha \text{ se obtiene interpolando entre 0.8 y 0.53}$$

El valor máximo de V_n será $V_n < 2.7\sqrt{f'c}A_c$

3.2.2.2 Corte por deslizamiento

La resistencia al corte por deslizamiento se puede calcular de acuerdo a la Norma Técnica de Edificación E-060 sección 13.5 con la siguiente expresión:

$$V_n = \mu(Nu + Avf_y)$$

donde:

V_n = Resistencia nominal al corte por deslizamiento del muro

Nu = Carga axial

Av = Área del refuerzo transversal a la sección de corte

f_y = Esfuerzo de fluencia del acero

μ = Coeficiente de fricción

El coeficiente de fricción debe tomarse como $\mu = 0.6$; excepcionalmente cuando se prepare adecuadamente la junta se tomará $\mu = 1.0$.

La carga axial última (N_u) se calcula en función de la carga muerta (N_m), como

$$N_u = 0.9N_m$$

3.2.2.3 Capacidad al corte de los muros

De acuerdo a las expresiones definidas anteriormente para el cálculo de la capacidad al corte se obtuvieron los siguientes resultados:

Cuadro N° 3.3.- Capacidad al corte

Capacidad al corte	Prototipo (t)	Modelo (kg)
Tensión diagonal		
muros de concreto	59.15	1207
muros de ductilidad limitada	69.22	1413
Deslizamiento		
2 varillas	57.2	1167
1 varilla	44.3	904

Para el cálculo de la capacidad al corte por deslizamiento de los muros, se consideró el aporte de las 2 varillas extremas. Asimismo se hizo el cálculo despreciando el aporte de la varilla de un extremo, por considerar que ésta podría entrar en fluencia debido a la tracción por flexión. Estos valores se muestran en la tabla 3.3

3.2.3 Cálculo de rigidez

La rigidez teórica se calculó considerando la siguiente fórmula:

$$K_o = \frac{E}{\frac{H^3}{3I} + \frac{fHE}{GA}}$$

Donde:

Ko = Rigidez teórica

E = Modulo de elasticidad del concreto

H = Longitud del muro

I = Momento de inercia de la sección transversal del muro en la base alrededor de un eje perpendicular al plano

G = Modulo de corte

A = Área de la sección transversal en la base del muro

f = factor de rigidez (1.2)

El modulo de corte se consideró igual a 0.4 del modulo de elasticidad del concreto. Aplicando la fórmula obtenemos una rigidez de los muros de:

Rigidez a escala real = 31.5 t/mm

Rigidez a escala reducida = 4.5 t/mm

CAPÍTULO IV: PARTE EXPERIMENTAL

4.1 LABORATORIO Y EQUIPOS DE ENSAYO

Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Estructuras del CISMID (Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres) de la Facultad de Ingeniería Civil-UNI

Entre los equipos disponibles en el Laboratorio de Estructuras se encuentra una mesa vibradora de dimensiones 1.0 m x 1.2 m, la cual permite ensayar diversos especímenes aplicando un movimiento en la base. Este movimiento puede consistir en ondas sinusoidales aplicadas mediante el sistema de control de la mesa, o movimientos sísmicos o de cualquier otro tipo introducidos al sistema de control como una serie de datos transformados en diferencia de voltaje.



Figura N° 4.1.- Mesa vibradora

4.1.1 Programa de cómputo para envío de señales a la mesa vibradora

Para el uso de la mesa vibradora se hizo necesario el desarrollo de un programa de cómputo, el cual interactuando con una tarjeta (PCI - 3521) convierte las señales sísmicas (disponibles en archivos digitales) en diferencias de voltaje para ser enviadas a la mesa vibradora.

Para determinar la equivalencia entre las diferencias de voltaje enviadas y la aceleración que se produce en la mesa vibradora se tiene que realizar un proceso de calibración de la misma. Se debe tener en cuenta que esta relación de calibración depende del peso colocado sobre la mesa, por lo que se debe determinar previamente el peso del espécimen para poner una carga equivalente

sobre la mesa antes de realizar dicha calibración.

Con los resultados de la calibración así obtenidos se procedió a realizar el ensayo, amplificando las ondas sísmicas enviadas a distintos valores de aceleración, introduciéndose como dato de entrada el archivo con los datos del sismo y la diferencia de voltaje equivalente a la aceleración deseada

El programa también permite introducir directamente ondas sinusoidales y señales tipo rampa, además de cualquier otro tipo de onda a través de un archivo. El detalle del ingreso de datos se observa en la Figura N° 4.2, la codificación del programa se encuentran en el Anexo 1.

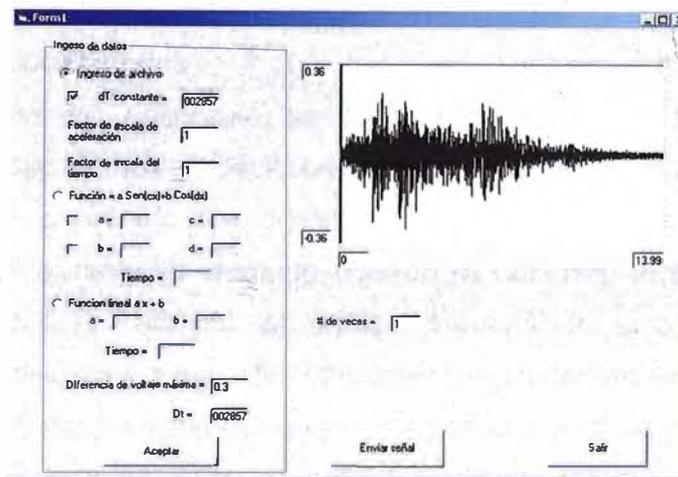


Figura N° 4.2.- Detalle de ingreso de datos

4.1.2 Control de ensayo y registro de resultados

Para la aplicación de las cargas en los muros se empleó la mesa vibradora controlada por una computadora IBM (486) a través de una tarjeta de conversión de señales. De esta manera las señales de comando son enviadas desde la computadora al controlador que realiza el desplazamiento de comando.

Cuando la fuerza es aplicada al espécimen, la respuesta se obtiene a través de acelerómetros y transductores de desplazamiento. Las señales de estos equipos son transmitidas a una grabadora (KYOWA RTP-610), la cual permite grabar la información y cambiar la velocidad de lectura para obtener más datos por unidad de tiempo. Así al principio esta información es grabada durante el ensayo a una velocidad alta, luego estas señales son retransmitidas a una unidad de adquisición de datos a una velocidad más baja para que las señales analógicas sean amplificadas y convertidas a digitales por medio de los convertidores A/D (Analógico/Digital). Estos datos digitalizados son almacenados en el disco duro

de la computadora de procesamiento de datos, la cual está conectada a la unidad grabadora de datos.

4.2 CONSTRUCCIÓN DE LOS ESPECÍMENES

La construcción de los especímenes se realizó en el Laboratorio de Estructuras del CISMID. Debido a que se trataba de modelos a escala reducida se tuvieron consideraciones especiales con los materiales, así como en el proceso constructivo, debiendo además fabricarse un encofrado que se ajuste a las dimensiones de los especímenes y tener un cuidado especial en la habilitación del refuerzo.

Procedimiento constructivo

- Fabricación del encofrado de madera considerando las dimensiones establecidas de los especímenes. Debido al espesor reducido de los muros, el encofrado fue dividido en tres partes, los cuales se iban colocando durante el vaciado cuando el concreto alcanzaba la altura dada (foto 4.3). Para unir las tapas del encofrado se emplearon pernos que atravesaban los parantes laterales y se ajustaban exteriormente. Los encofrados fueron recubiertos con una película epóxica para evitar que el concreto se adhiera al mismo durante el desencofrado.

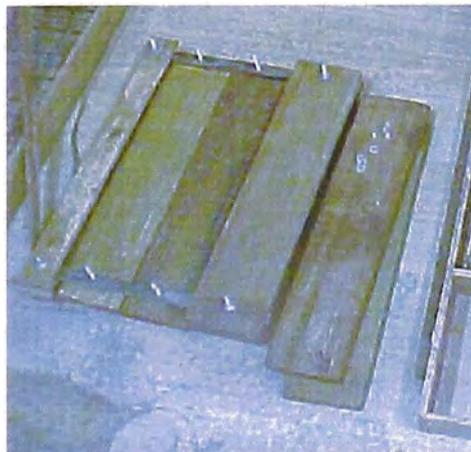


Figura N° 4.3.- Detalle de encofrado

- Colocación del encofrado de la cimentación e instalación del refuerzo de la misma. Para lograr una adecuada fijación del cimienta a la mesa vibradora se proyectó la perforación de 8 agujeros a través de la

cimentación, por lo que se colocó el acero de refuerzo teniendo en cuenta la posición de los agujeros.



Figura N° 4.4.- Encofrado y refuerzo de la cimentación

- Instalación del refuerzo de los muros. Debido a las dimensiones del espécimen no se emplearon dowells, siendo el refuerzo continuo desde el cimientto.

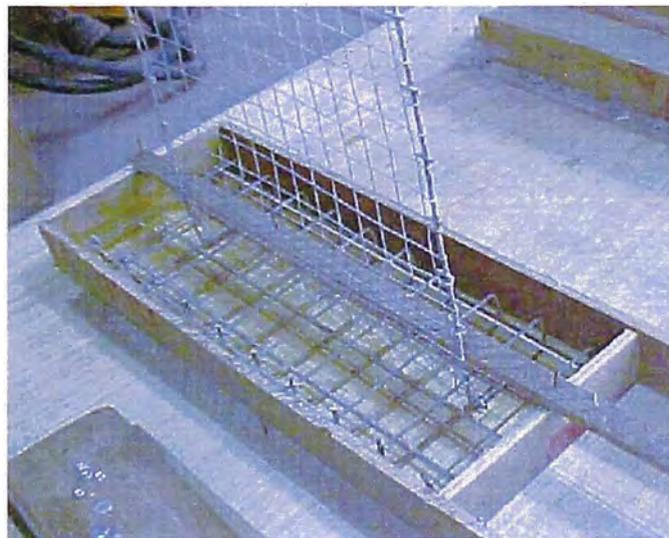


Figura N° 4.5.- Refuerzo de muros

- Vaceado del cimiento empleando microconcreto.



Figura N° 4.6.- Vaceado del cimiento

- Colocación de parantes y primera línea de encofrado del muro. La unión de los paneles se realizó con pernos que atraviesan los paneles y parantes. El objetivo de la colocación de los parantes es lograr el espesor homogéneo del muro.

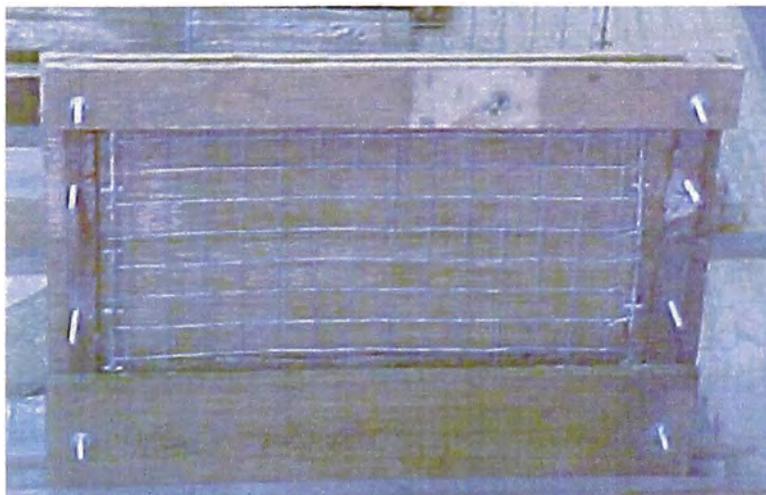


Figura N° 4.7.- Vista lateral de encofrado

- Vaceado del microconcreto (al día siguiente del vaceado del cemento) hasta alcanzar la altura de los primeros paneles. Luego se procede a la colocación del siguiente nivel de encofrado y se continua con el vaceado hasta completar la altura del muro.



Figura N° 4.8.- Vaceado del muro (primera etapa)



Figura N° 4.9.- Vaceado del muro (parte intermedia)



Figura N° 4.10.- Vaceado del muro (etapa final)

- Compactación o vibrado del microconcreto. Este procedimiento se llevó a cabo con una varilla delgada de acero por cada línea de encofrado. Seguidamente, antes de armar la siguiente línea, se golpeaban las caras del encofrado con un martillo de goma, eliminando de esta forma el exceso de aire atrapado en la mezcla.

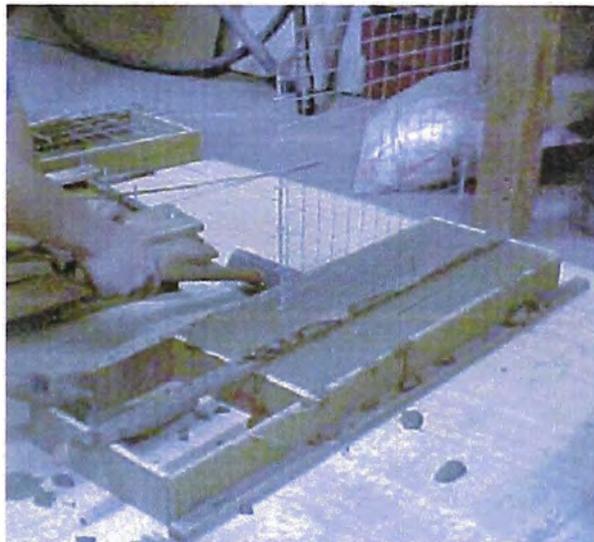


Figura N° 4.11.- Vibrado de la cimentación

- El curado de los muros se realizó aplicando agua diariamente sobre los mismos y cubriéndolos con bolsas plásticas para mantener la humedad.

4.3 RESISTENCIA DEL CONCRETO

4.3.1 Objetivo

- Determinar la resistencia del concreto a la tracción y a la compresión.

4.3.2 Técnicas de ensayo

4.3.2.1 Ensayo a la compresión

Para obtener la resistencia a la compresión del concreto se deben fabricar probetas cilíndricas estándar de 6" (15 cm) de diámetro y 12" (30 cm) de altura. Dichas probetas deben permanecer en los moldes por 24 horas hasta que el concreto fragüe; posteriormente la probeta debe ser curada colocándola bajo agua hasta la fecha del ensayo. La fecha del ensayo puede variar dependiendo de los objetivos que busque el ensayo; si se desea la capacidad del concreto de acuerdo al reglamento el ensayo se debe realizar a los 28 días del vaciado.

El Reglamento Nacional de Edificaciones – Norma Técnica de Edificación E-060, en la sección 4.6, referencia las condiciones de toma de muestra y dimensiones de las mismas (normas ITINTEC 339.036 e ITINTEC 339.033), las condiciones de curado (norma ASTM C 192) y de ensayo (norma ITNITEC 339.034)



Figura N° 4.12.- Toma de muestras de concreto

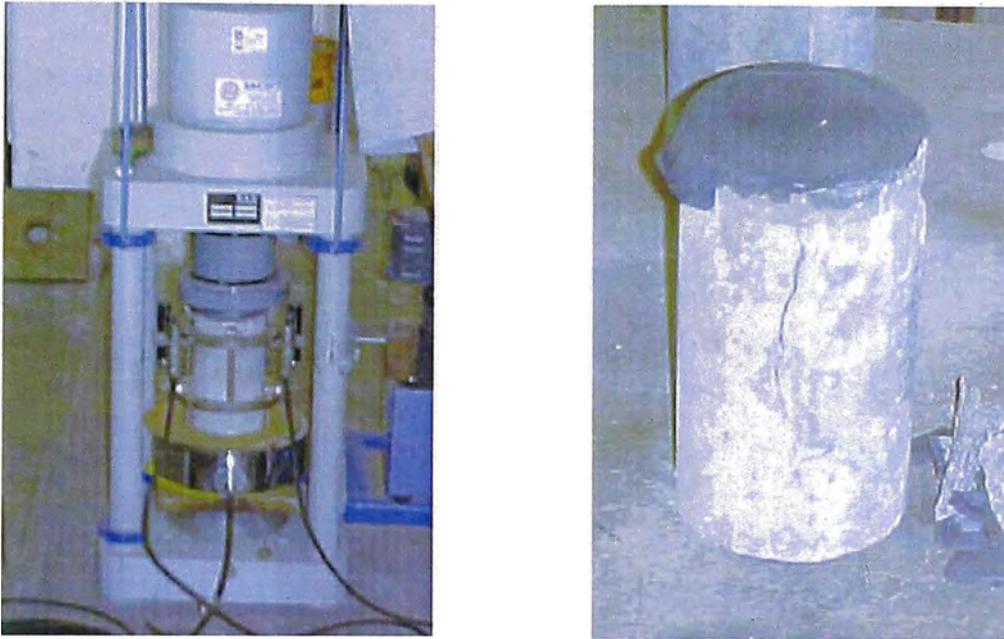


Figura N° 4.13.- Ensayo de compresión y muestra

4.3.2.2 Ensayo de tracción indirecta

Para obtener la resistencia a la tracción de las probetas de concreto es posible medir de manera indirecta la resistencia de tensión a la que se rompe un espécimen colocado horizontalmente en una maquina de prueba y cargado a lo largo de un diámetro (prueba brasileña), obteniéndose los esfuerzos inducidos a lo largo del diámetro cargado con la teoría de elasticidad.

Para el ensayo y cálculo de la resistencia a la tracción del concreto se siguieron las recomendaciones dadas en la norma MTC E708 – 2000, la cual se basa en la norma ASTM C496. Las características de las muestra de concreto y las condiciones de toma y curado son las mismas definidas para el ensayo de compresión.



Figura N° 4.14.- Ensayo de tracción indirecta

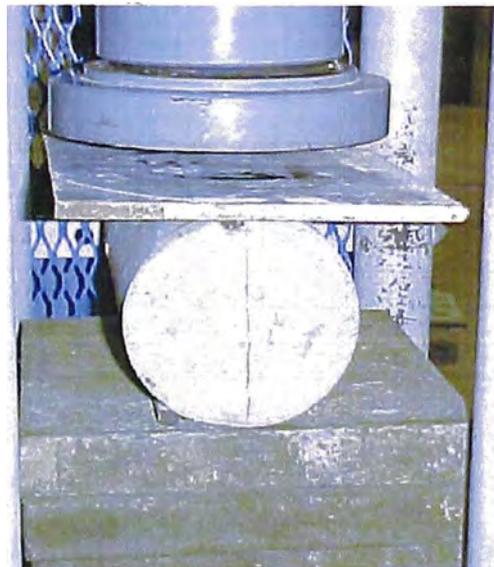


Figura N° 4.15.- Falla de espécimen

4.3.3 Resultados obtenidos

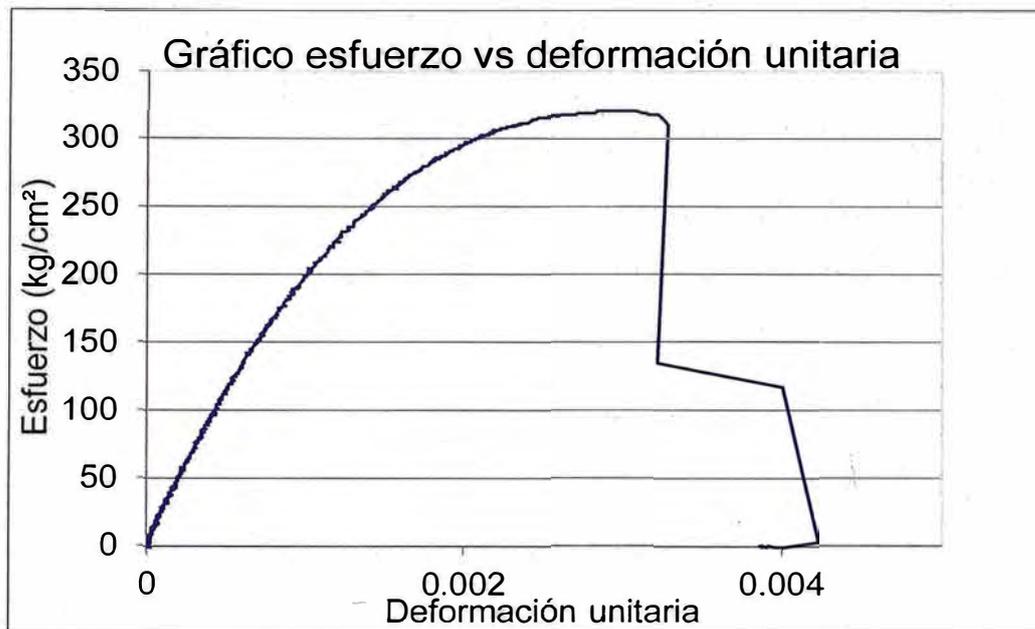


Figura N° 4.16.- Gráfico de esfuerzo vs deformación unitaria del microconcreto en muro M1

Cuadro N° 4.1.- Cálculo de módulo de elasticidad del microconcreto

Muros	Mezcla	f'c	$E=15000f'^c^{0.5}$	E (0.5 f'c)
M1	1:2.2:0.6	320.9	268687.0	217529.7
M2	1:2.2:0.6	292.8	256690.8	216922.3
M3	1:2.2:0.6	313.2	265469.0	229884.0

4.4 ENSAYO DINÁMICO DE ESPECÍMENES EN MESA VIBRADORA

4.4.1 Objetivos

- Evaluar el comportamiento estructural del sistema de muros de ductilidad limitada ante cargas sísmicas.
- Obtener el patrón de agrietamiento ante distintos niveles de aceleración
- Estudio del comportamiento de un modelo a escala reducida ante cargas sísmicas.

4.4.2 Técnica de ensayo

4.4.2.1 Sistema de carga

Se ensayaron 03 muros aplicando un movimiento sísmico en la base, correspondiente al sismo ocurrido en la ciudad de Lima el 03 de octubre de 1974, el cual se aplicó al muro repetidas veces para distintos niveles de aceleración máxima, manteniendo una masa determinada sobre el muro. Los dos primeros muros fueron ensayados con dos masas distintas y el tercer muro con una sola masa, como se muestra en el Cuadro N° 4.2.

Cuadro N° 4.2.- Cargas aplicadas sobre los muros

Muro	Carga vertical (kg)
Muro 1	
carga a	10.07
carga b	26.57
Muro 2	
Carga a	29.27
Carga b	37.67
Muro 3	37.67

La aplicación de la aceleración en la base se realizó mediante una mesa vibradora controlada por un sistema de servo control electro hidráulico. El envío de los registros sísmicos se hizo mediante un programa de cómputo desarrollado en esta investigación, el cual permite enviar secuencias de diferencias de voltaje que el sistema de la mesa vibradora convierte en aceleraciones.

Características de la mesa vibradora:

- Área : 1.0 x 1.2 m
- Capacidad máxima: 0.5 t
- Aceleración máxima: 5 g
- Desplazamiento máximo: 20 cm

4.4.2.2 Montaje e Instrumentación

Los muros fueron transportados manualmente hasta la mesa vibradora. Debido a que el espaciamiento de los agujeros en la mesa vibradora no permitía la fijación directa con el cimiento del muro, se procedió a fijar primero la cimentación del muro a una plataforma de madera taladrando agujeros en la cimentación y fijándola a través de pernos. Posteriormente se fijó la plataforma de madera a la mesa vibradora mediante pernos.



Figura N° 4.17.- Detalle de fijación de los muros a la mesa vibradora

La masa que determinó el nivel de esfuerzos al que fue sometido el muro ante las cargas sísmicas consistió en pesas de metal, las cuales fueron colocadas sobre una plataforma de madera en forma de T sobre el muro y que encajaba en éste, estando además ajustado por fricción mediante pernos. (Figuras 4.17 y 4.18). Las pesas se sujetaron a la plataforma colocando listones de madera sobre ésta y ajustando dichos listones a la plataforma mediante pernos, quedando las pesas ubicadas entre los listones y la plataforma. Asimismo, se colocaron tacos de madera sobre la plataforma en las que encajaban las pesas. Al adicionar cargas posteriormente se colocaron pesas sobre el sistema descrito anteriormente, fijándose con ganchos de metal (Figura N° 4.20)



Figura N° 4.18.- Detalle de masas aplicadas. Se colocaron listones alrededor de las masas para evitar movimientos laterales.



Figura N° 4.19.- Detalle de cargas. Se observa que las masas colocadas están cubiertas con tapas de madera para evitar el movimiento vertical de las mismas.

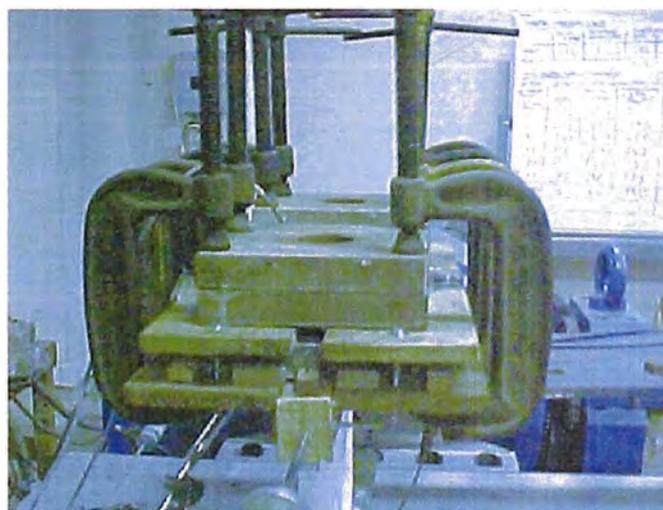


Figura N° 4.20.- Detalle de cargas adicionales aplicadas sobre la plataforma

Para la adquisición de datos se utilizó un sistema con 3 sensores de aceleración y 5 de desplazamiento, distribuidos en canales y conectados a un acondicionador de señales, el cual transfería los datos a una grabadora KYOWA RTP-610, en la que se almacenaron los datos. Después del ensayo se conectó la grabadora a una unidad de adquisición de datos, cuya función es convertir las señales analógicas a digitales transfiriéndolos luego a una computadora donde se almacenaron los registros de los sensores.

El uso de la grabadora permitió tomar los datos durante el ensayo a una velocidad alta, para luego reproducirlos a una velocidad mucho menor al enviarlos a la computadora, obteniendo más datos por unidad de tiempo, lo cual era indispensable debido al escalamiento del tiempo necesario para el ensayo. Los primeros tres canales fueron reservados para las señales de los acelerógrafos, obteniéndose registros de aceleración en la base del muro y en la parte superior del mismo, siendo empleados los demás sensores para la medición simultánea de desplazamientos mediante transductores, como se muestra en la Figura N° 4.20.

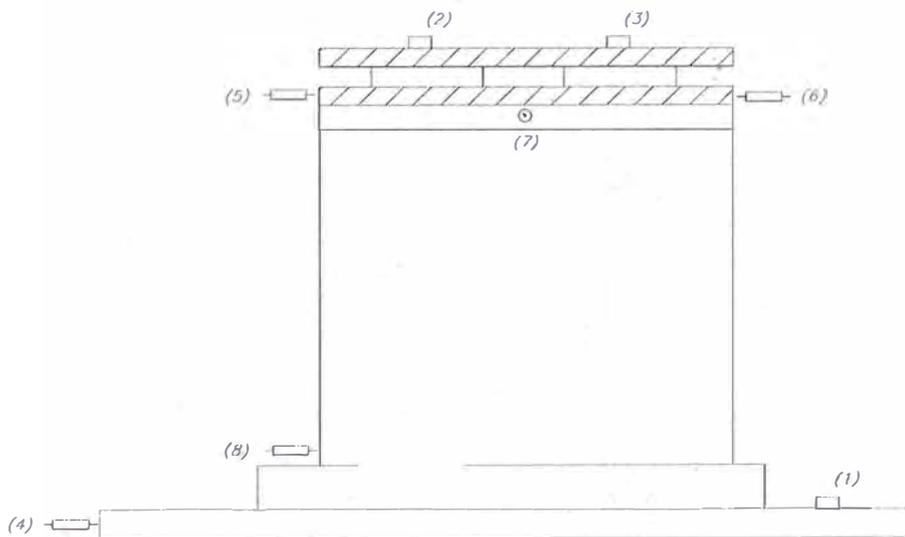


Figura N° 4.21.- Ubicación de sensores en el muro

El acelerómetro correspondiente al canal 1 tuvo como finalidad medir las aceleraciones en la base, mientras que los correspondientes a los canales 2 y 3 midieron las aceleraciones en la parte superior del muro. Los transductores desde el canal 4 hasta el 6, midieron los desplazamientos laterales de la base y el muro, el transductor ubicado en el canal 7 midió los posibles desplazamientos perpendiculares al plano, mientras que el canal 8 proporcionó el desplazamiento del muro en la zona de unión con la cimentación.



Figura N° 4.22.- Vista general de los sensores

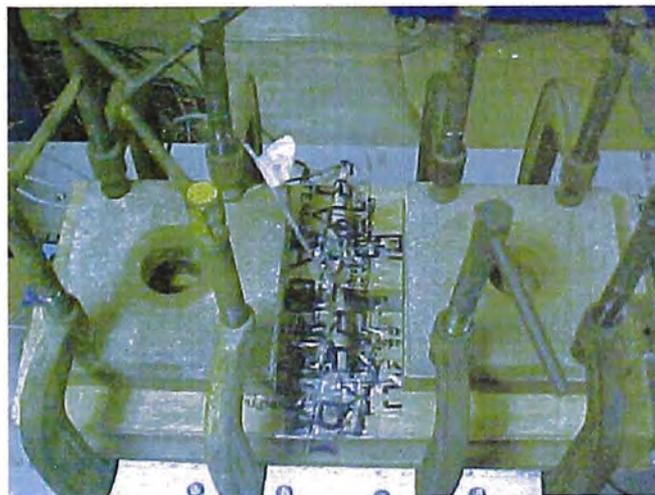


Figura N° 4.23.- Detalle de acelerómetros en la parte superior del muro



Figura N° 4.24.- Detalle de transductor (canal 4)

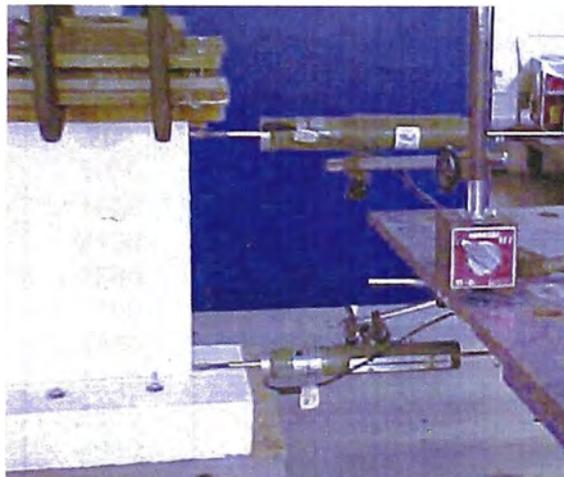


Figura N° 4.25.- Detalle de transductores



**Figura N° 4.26.- Detalle de transductor lateral
(canal 7)**

4.4.2.3 Metodología del ensayo

Los muros fueron ensayados mediante la aplicación de registros sísmicos de aceleración en la base, aplicando un mismo registro sísmico con distintos niveles de aceleración hasta alcanzar la capacidad máxima de la mesa vibradora (5g), la cual, aplicando el factor de escala correspondiente, equivale a una aceleración en el prototipo de 700 cm/s². El control de aceleraciones aplicadas se basó en la calibración realizada previamente al ensayo. El nivel de aceleración se fue incrementando en cada ensayo de acuerdo al Cuadro N° 4.3. En dicha tabla se indica el nivel de aceleración real aplicado al espécimen y su equivalente en escala reducida.

Cuadro N° 4.3.- Niveles de aceleración aplicados

Aceleración máxima (cm/s ²)	
modelo	prototipo
700	100
1050	150
1400	200
2100	300
2800	400
3500	500
3850	550
4200	600
4550	650
4900	700

4.4.3 Calibración de mesa vibradora

Las aceleraciones aplicadas por la mesa vibradora al modelo son dependientes de las masas sobre la mesa. Debido a esto fue necesario realizar un proceso de calibración que permitió determinar las aceleraciones generadas en la mesa en función de las diferencias de voltaje aplicadas. Con este fin se determinó el peso total de los modelos a ensayar, incluyendo las masas adicionales aplicadas y se colocaron estas masas directamente en la mesa vibradora empleando pesas de acero y se procedió a medir las aceleraciones correspondientes a estas masas aplicando ondas sinusoidales a diferentes niveles de diferencia de voltaje. Posteriormente se hizo el mismo proceso para las demás configuraciones de carga, obteniéndose un patrón de curvas dV vs aceleración para cada masa.

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 GENERALIDADES

Para realizar los ensayos se tuvieron tres modelos a escala con iguales características de materiales y refuerzo. En dos de los modelos (Muros M1 y M2) la cimentación fue vacuada un día antes que el muro en sí, esto con el objetivo de reflejar las condiciones reales de construcción de estos muros tanto en el caso de los especímenes a escala real como en los procesos constructivos habituales. En el tercer modelo (Muro M3) se construyó monolíticamente el conjunto muro-cimentación con el fin de observar posibles influencias en la resistencia del sistema debido al proceso constructivo.

5.2 ENSAYO DE VIBRACIÓN LIBRE

Para determinar las características de los muros (periodo, rigidez, amortiguamiento) se los sometió a un estado de vibración libre midiendo las aceleraciones en la parte superior de cada muro (utilizándose dos acelerógrafos y promediando los resultados). A cada muro se le colocó una masa diferente según la siguiente tabla:

Muro M1 – 10.07 kg

Muro M2 - 29.27 kg

Muro M3 - 39.67 kg

Para forzar la vibración libre se aplicó una onda sinusoidal en la base por quince segundos, deteniendo luego el movimiento en la base y midiendo las aceleraciones en la parte superior del muro. Este procedimiento se realizó dos veces con cada muro, variando la frecuencia de la onda sinusoidal. Una vez definida la gráfica de aceleraciones en vibración libre se procedió a analizar visualmente esa gráfica para identificar los picos respectivos y así obtener el periodo fundamental de vibración del muro, posteriormente considerando el periodo obtenido y la masa empleada se calculó la rigidez del sistema empleando la siguiente fórmula:

$$K = 4\pi^2 * \frac{m}{T^2}$$

Para determinar el amortiguamiento del sistema se definió el decremento logarítmico (D.L.) de la vibración libre, mediante la comparación de los picos

máximos para cada periodo, calculándose el porcentaje de amortiguamiento $\beta\%$ como:

$$D.L. = \ln\left(\frac{u(t)}{u(t+T)}\right) \qquad \beta\% = \frac{D.L.}{2\pi}$$

Los resultados de los diferentes ensayos se observan en los siguientes gráficos:

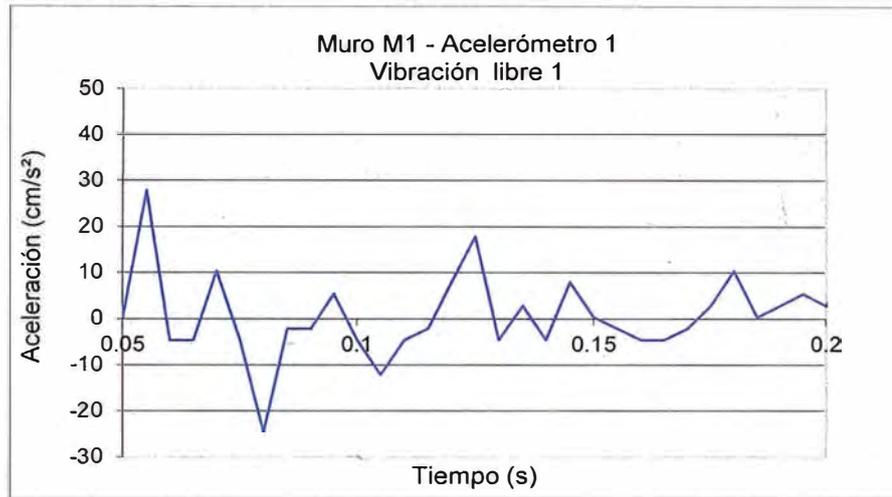


Figura N° 5.1.- Muro M1 - Vibración libre 1 - Acelerómetro 1

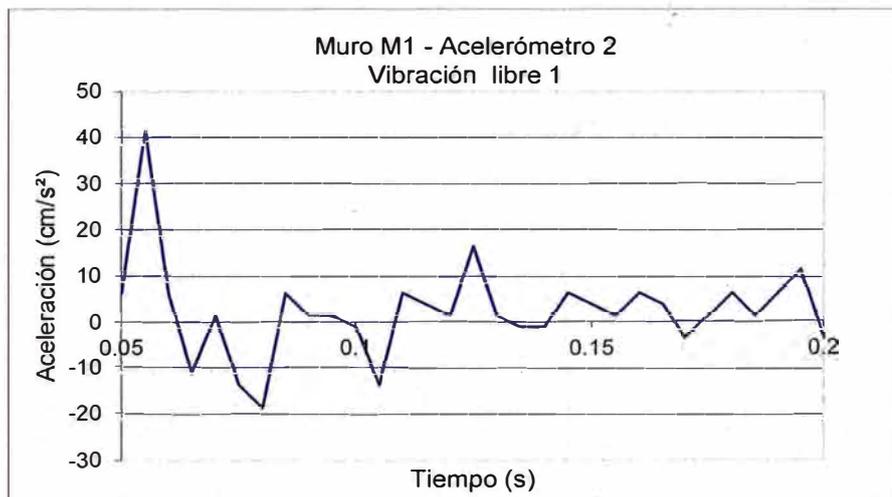


Figura N° 5.2.- Muro M1 - Vibración libre 1 - Acelerómetro 2

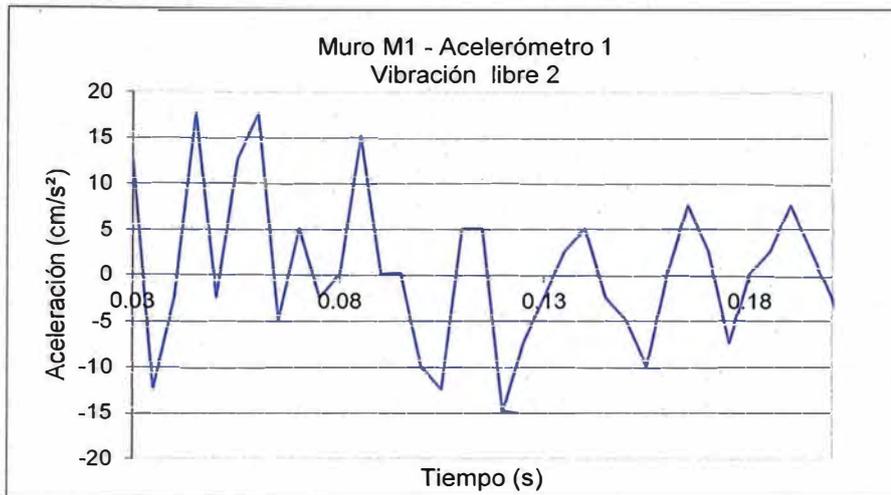


Figura N° 5.3.- Muro M1 - Vibración libre 2 - Acelerómetro 1

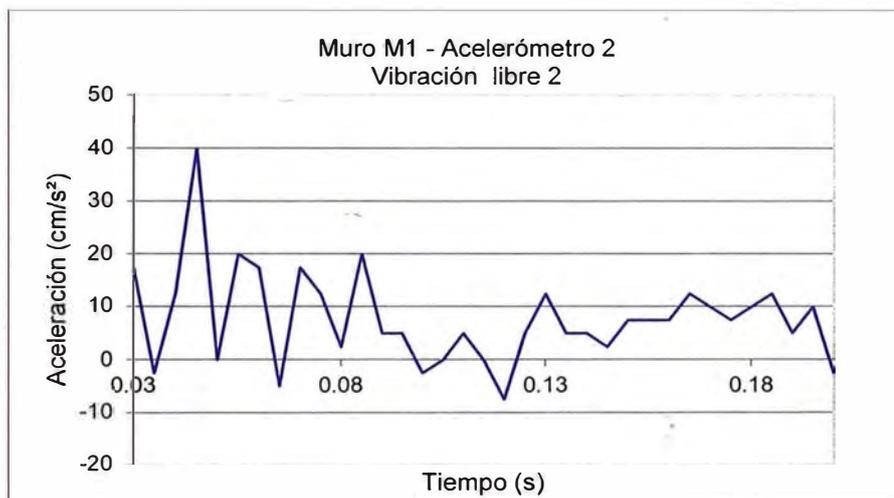


Figura N° 5.4.- Muro M1 - Vibración libre 2 - Acelerómetro 2

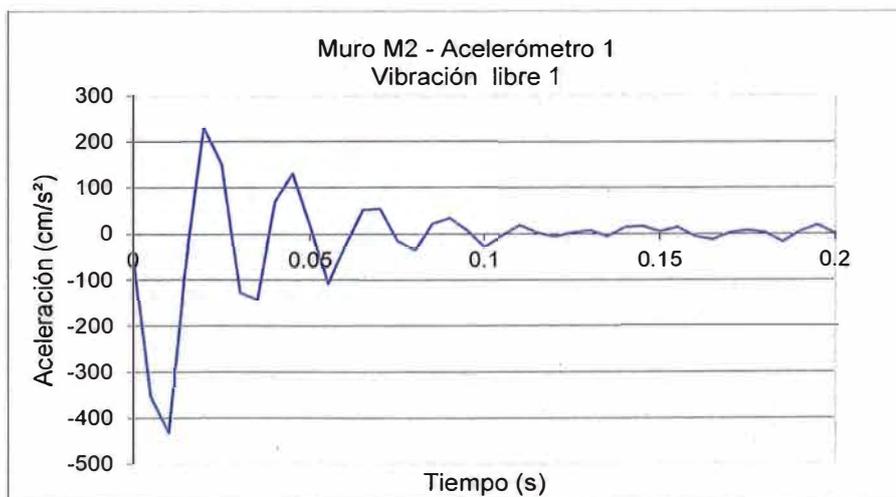


Figura N° 5.5.- Muro M2 - Vibración libre 1 - Acelerómetro 1

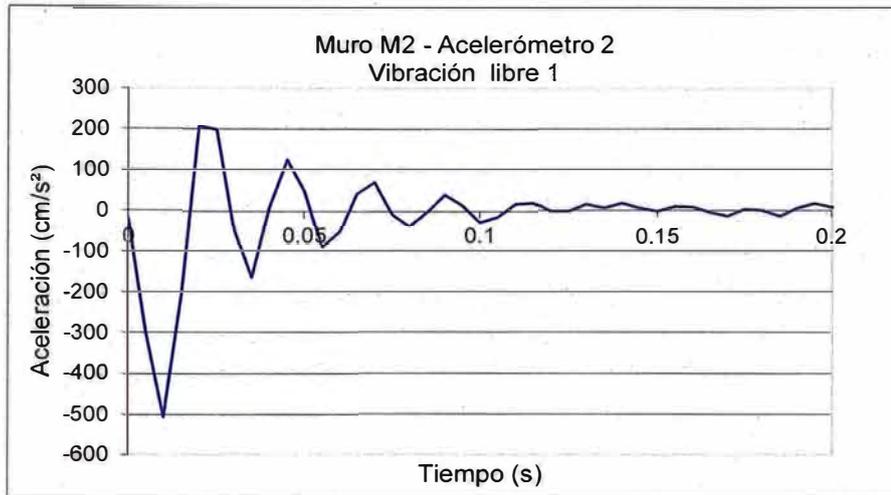


Figura N° 5.6.- Muro M2 - Vibración libre 1 - Acelerómetro 2

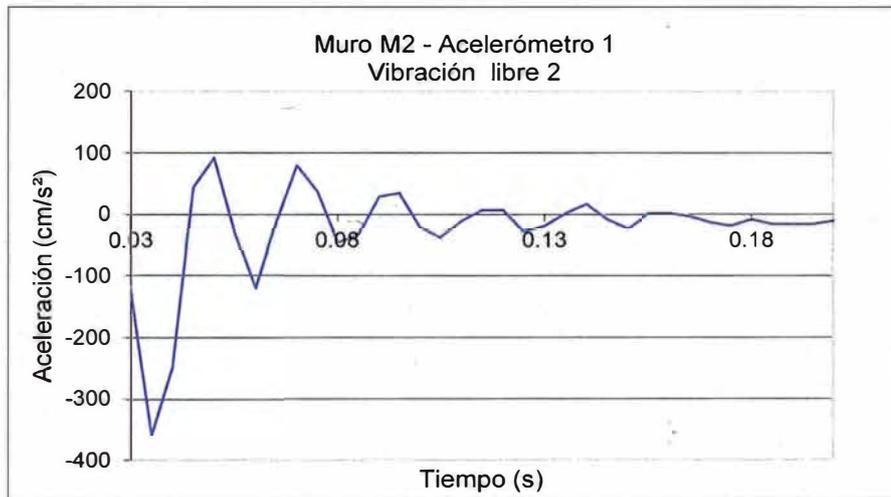


Figura N° 5.7.- Muro M2 - Vibración libre 2 - Acelerómetro 1

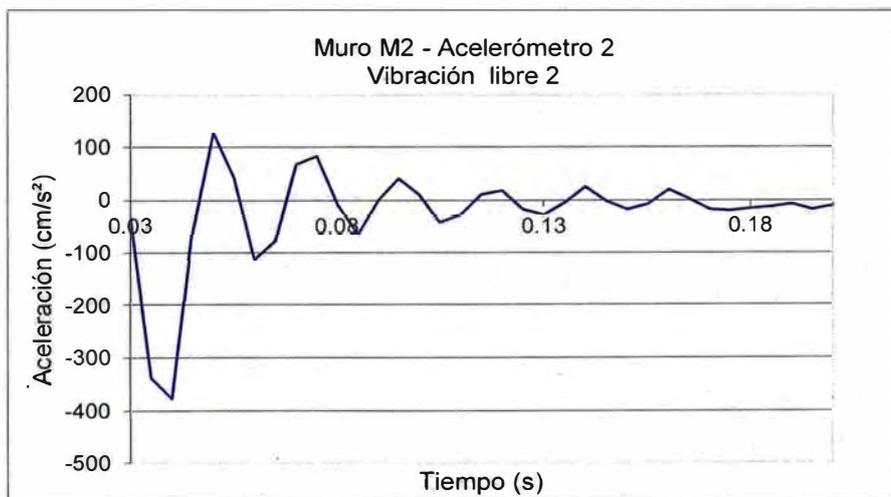


Figura N° 5.8.- Muro M2 - Vibración libre 2 - Acelerómetro 2

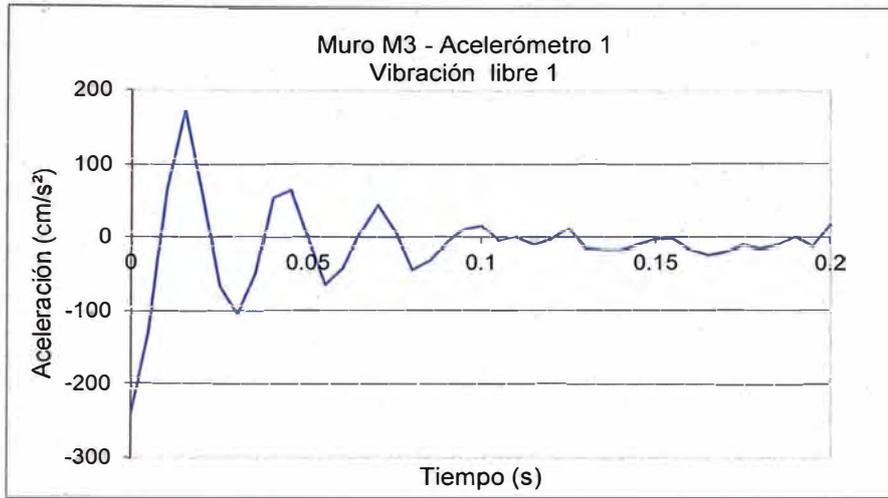


Figura N° 5.9.- Muro M3 - Vibración libre 1 - Acelerómetro 1

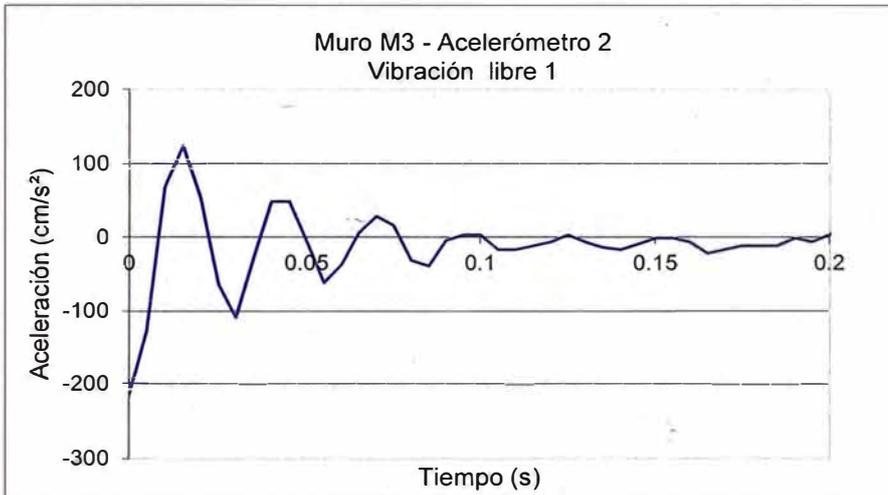


Figura N° 5.10.- Muro M3 - Vibración libre 1 - Acelerómetro 2

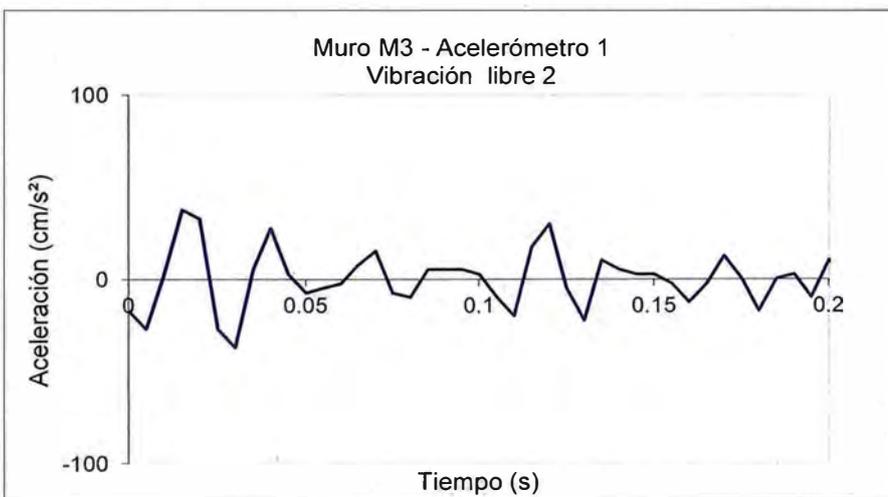


Figura N° 5.11.- Muro M3 - Vibración libre 2 - Acelerómetro 1

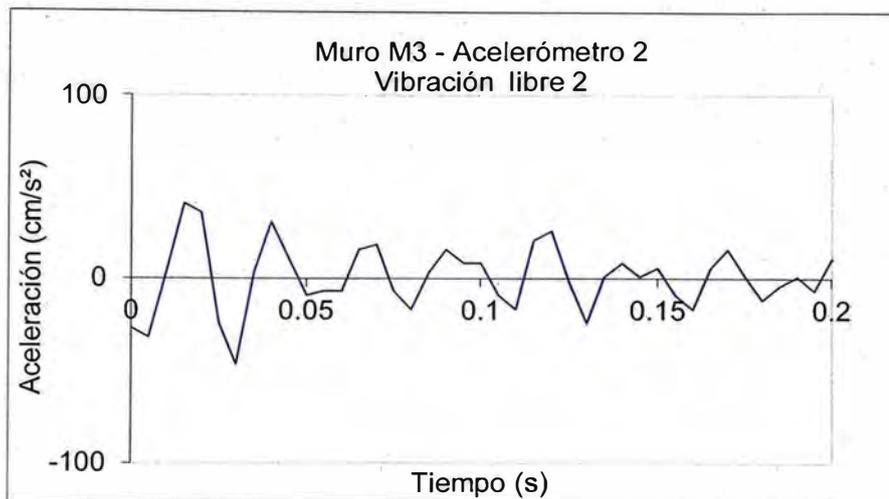


Figura N° 5.12.- Muro M3 - Vibración libre 2 - Acelerómetro 2

En el caso del muro 1, no se aplicó la suficiente amplitud inicial por lo que la vibración libre del muro se confundió con el ruido del sistema. Además al ser la toma de datos cada 0.005 s esto no fue suficiente para tomar datos adecuados considerando el periodo esperado. En el caso de los muros 2 y 3, al aplicarse una mayor aceleración, y al tener una mayor masa, lo que implica un mayor periodo, los resultados fueron más claros, excepto en el último ensayo del muro M3 donde los resultados salieron distorsionados. De acuerdo a los gráficos mostrados, se obtuvieron los siguientes resultados:

Cuadro N° 5.1.- Rigidez de muros por vibración libre.

	W	M	T	K	β
Muro 1	(kg)	(kg s ² /cm)	(s)	(kg/cm)	(%)
Vibración libre 1	10.07	0.0103	---	---	---
Vibración libre 2	10.07	0.0103	---	---	---

Muro 2					
Vibración libre 1	29.27	0.0298	0.024	2088.27	10.3%
Vibración libre 2	29.27	0.0298	0.023	2242.90	8.5%

Muro 3					
Vibración libre 1	37.67	0.0384	0.025	2425.53	8.7%
Vibración libre 2	37.67	0.0384	---	---	---

K promedio = 2252.23 kg/cm

β promedio = 9.2%

De los resultados se observa que la rigidez no varía significativamente entre los muros vaceados normalmente y los vaceados monolíticamente por lo que podemos tomar un valor promedio de 2,200 kg/cm, lo cual equivale a 15,400

kg/cm o 15.4 t/mm en el modelo a escala real. En lo referente al periodo, éste varía entre cada espécimen debido a que depende de la masa en la parte superior.

5.3 ENSAYO CON REGISTRO SÍSMICO

Una vez definidas las características de los muros se procedió a ensayarlos aplicando el registro sísmico del terremoto ocurrido en Lima el 3 de Octubre de 1974 considerando dos estados de carga (masa concentrada en la parte superior) para el muro 1 y 2 y un solo estado de carga para el muro 3.

Cuadro N° 5.2.- Cargas verticales aplicadas a los muros ensayados

Muro	Carga vertical (t)		
	prototipo	modelo	
	t	t	kg
Muro 1			
carga a	3.5	0.010	10.1
carga b	9.1	0.027	26.6
Muro 2			
Carga a	10.0	0.029	29.3
Carga b	12.9	0.038	37.7
Muro 3	12.9	0.038	37.7

Las cargas aplicadas se fueron incrementando tentativamente, evaluando la estabilidad del sistema en cada ensayo, por lo que no representan una cantidad determinada de pisos. Sin embargo podría considerarse que las 12.9 t aplicadas podrían equivaler a la carga correspondiente a 2 pisos adicionales con un ancho de losa apoyada en el muro de aproximadamente 2.5 m.

El registro sísmico se fue escalando a diferentes niveles de aceleración máxima hasta alcanzar la capacidad máxima de la mesa vibradora (5g) la cual para el factor de escala elegido equivaldría a 0.71 g en escala real. El registro se fue amplificando cada 0.05 g según la escala real, desde un valor inicial de 0.1 g hasta el máximo permitido por la mesa vibradora (0.7 g)

Cuadro N° 5.3.- Aceleraciones máximas aplicadas durante los ensayos

Aceleración máxima (cm/s ²)	
modelo	prototipo
700	100
1050	150
1400	200
2100	300
2800	400
3500	500
3850	550
4200	600
4550	650
4900	700

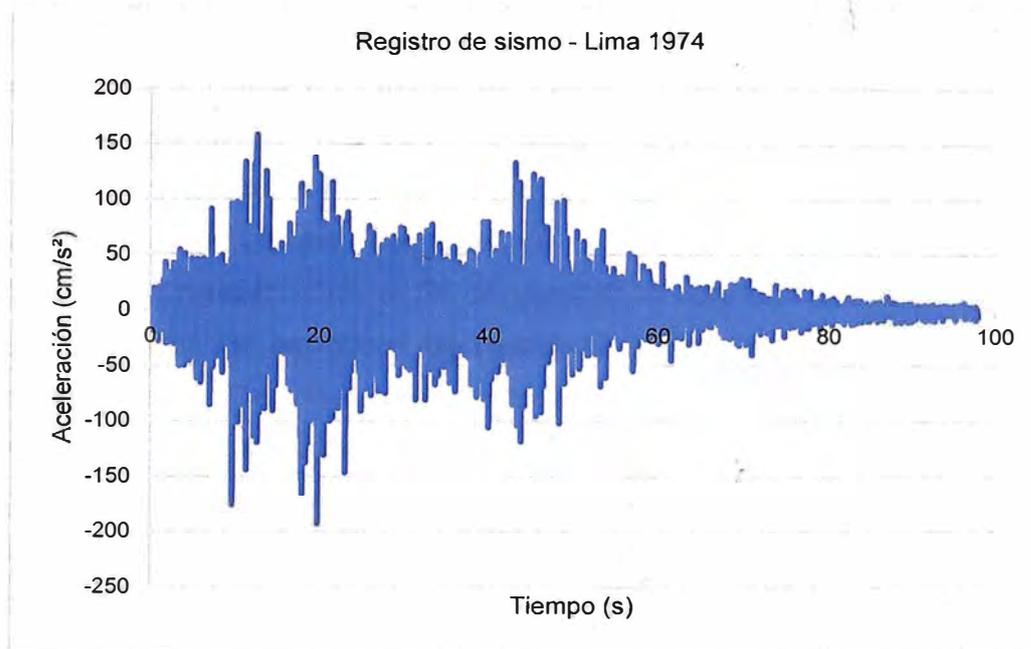


Figura N° 5.13.- Registro sísmico aplicado

5.3.1 Resultados de los ensayos

De los ensayos previamente descritos se obtuvieron graficas de aceleración y desplazamiento según la distribución de sensores mostrada en la Figura N° 4.21, obteniéndose una lectura de aceleración y dos de desplazamiento en la base del muro y dos lecturas de aceleración y dos de desplazamiento en la parte superior del muro.

Debido a la gran cantidad de datos obtenidos, se procede a presentar cuadros resúmenes que permitan observar los valores más relevantes de estos datos

para cada ensayo. Estos resultados se presentan para cada muro según el siguiente esquema:

Aceleraciones máximas: En este primer cuadro se presentan las aceleraciones máximas tanto positivas como negativas obtenidas de los acelerómetros en la base (acel 1) como en la parte superior (acel 2 y acel 3), esto para los diferentes niveles de aceleración aplicados en la base del muro. Se debe tomar en cuenta que el valor máximo de medición de los acelerógrafos es de 5 g (5000 cm/s^2) por lo que se resaltarán las mediciones que superen este valor.

Amplificación de la aceleración: En este cuadro se muestra como la aceleración se va amplificando para los distintos niveles de aceleración, tanto en las aceleraciones positivas como en las negativas. Considerando que la amplificación depende de la rigidez, si los valores se mantienen constantes puede concluirse que el elemento mantiene su rigidez inicial, mientras que si se observa cambios puede considerarse que el elemento empieza a degradarse. Para evitar distorsiones en los resultados se descartaron los valores que superan el rango de medición de los acelerómetros.

Cálculo de la rigidez: Con el fin de verificar la degradación de la rigidez se consideró utilizar los espectros de respuesta del registro medido en la mesa vibradora (acel 1). Debido a que el amortiguamiento calculado con la vibración libre fue de 9.2% se calcularon dos espectros de respuesta, uno con ese amortiguamiento y otro con el amortiguamiento habitualmente utilizado para estructuras de concreto (5%). Con estos espectros y considerando la aceleración máxima absoluta obtenida se calculó el periodo correspondiente a esta aceleración. Este procedimiento se realizó para cada nivel de aceleración. Al igual que en el caso anterior, se descartaron los valores que superaban la capacidad de los acelerómetros.

Comparación fuerza vs deformación: Una vez definida la aceleración máxima y la rigidez correspondiente se procedió a generar un cuadro de Fuerza vs Deformación, definiendo a la fuerza como la multiplicación de la masa por la aceleración máxima y a la deformación como la división de la fuerza entre la rigidez (obtenida considerando un amortiguamiento de 9.2%).

Con respecto a los desplazamientos, no se consideraron los resultados debido a que los equipos de medición eran demasiado lentos para registrar los datos en la escala de tiempo usada, por lo que los datos obtenidos introducían distorsiones en el análisis.

I) Muro M1

a) Carga vertical = 10.07 kg

Cuadro N° 5.4.- Aceleraciones máximas - Muro M1 - Carga vertical = 10.07 kg

Aceleraciones máximas (cm/s²)							
Aceleración objetivo		Máximos positivos			Máximos negativos		
prototipo	escala	Acel 1	Acel 2	Acel 3	Acel 1	Acel 2	Acel 3
100	700	651	867	961	- 533	- 692	- 757
150	1 050	1 001	1 270	1 402	- 828	-1 074	-1 160
200	1 400	1 318	1 836	2 078	-1 053	-1 491	-1 631
250	1 750	1 638	2 152	2 454	-1 337	-1 734	-1 899
300	2 100	1 945	2 824	3 198	-1 661	-2 373	-2 639
350	2 450	2 321	3 234	3 634	-1 890	-2 826	-3 060
400	2 800	2 586	3 786	4 291	-2 117	-3 141	-3 539
450	3 150	2 959	4 571	5 117	-2 385	-4 169	-4 629
500	3 500	3 264	4 999	5 375	-2 582	-4 858	-5 235
550	3 850	3 600	5 497	5 935	-2 864	-5 327	-5 742
600	4 200	3 859	5 932	6 331	-3 166	-5 640	-5 903

Cuadro N° 5.5.- Amplificación de la aceleración - Muro M1 - Carga vertical = 10.07 kg

Amplificación de la aceleración								
Acel 1 máxima		Máximos positivos			Máximos negativos			Promedio
prototipo	escala	Acel 2	Acel 3	Acel prom.	Acel 2	Acel 3	Acel prom.	
93	651	1.33	1.48	1.40	1.30	1.42	1.36	1.38
143	1 001	1.27	1.40	1.33	1.30	1.40	1.35	1.34
188	1 318	1.39	1.58	1.49	1.42	1.55	1.48	1.48
234	1 638	1.31	1.50	1.41	1.30	1.42	1.36	1.38
278	1 945	1.45	1.64	1.55	1.43	1.59	1.51	1.53
332	2 321	1.39	1.57	1.48	1.50	1.62	1.56	1.52
369	2 586	1.46	1.66	1.56	1.48	1.67	1.58	1.57
423	2 959	1.54	1.73	1.64	1.75		1.75	1.69

Cuadro N° 5.6.- Degradación de la rigidez - Muro M1 - Carga vertical = 10.07 kg

Degradación de la rigidez								
Acel 1 máxima		Aceleración máx. promedio		Aceleración máxima	$\beta = 9.2\%$		$\beta = 5\%$	
prototipo	escala	positiva	negativa		Periodo	Rigidez (t/mm)	Periodo	Rigidez (t/mm)
93	651	914	725	914	0.0212	0.905	0.0206	0.953
143	1 001	1 336	1 117	1 336	0.0207	0.946	0.0203	0.982
188	1 318	1 957	1 561	1 957	0.0223	0.814	0.0214	0.885
234	1 638	2 303	1 817	2 303	0.0213	0.897	0.0207	0.945
278	1 945	3 011	2 506	3 011	0.0221	0.830	0.0214	0.889
332	2 321	3 434	2 943	3 434	0.0226	0.791	0.0216	0.867
369	2 586	4 038	3 340	4 038	0.0233	0.745	0.0221	0.830
423	2 959	4 844	4 399	4 844	0.0244	0.680	0.0228	0.783

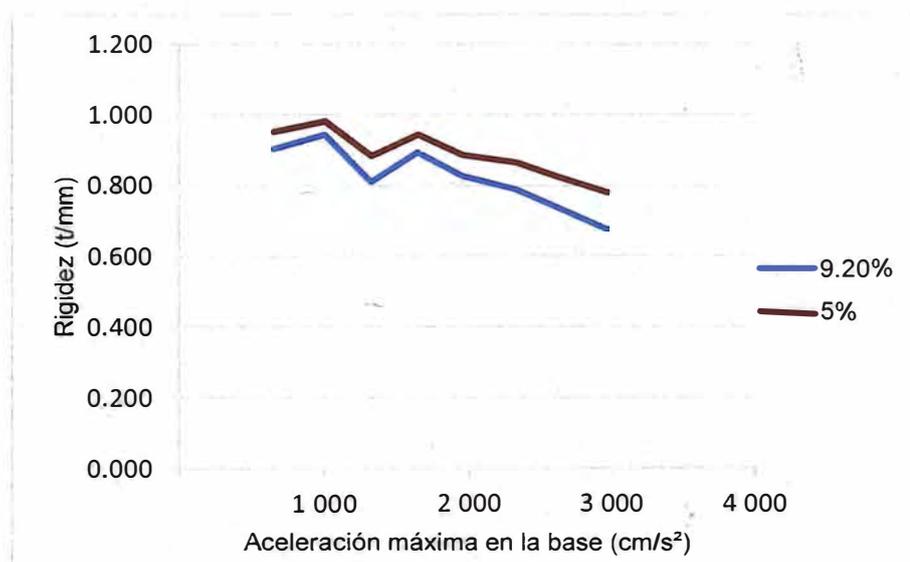


Figura N° 5.14.- Degradación de la rigidez - Muro M1 -Carga vertical = 10.07 kg

Cuadro N° 5.7.- Fuerza vs deformación - Muro M1 -Carga vertical = 10.07 kg

W =	10.07	kg
M =	0.0103	kg-s ² /cm

Fuerza (kg)	deformación (mm)
0.0	0.0000
9.4	0.0104
13.7	0.0145
20.1	0.0247
23.6	0.0264
30.9	0.0373
35.2	0.0445
41.5	0.0556

b) Carga vertical = 26.57 kg

Cuadro N° 5.8.- Aceleraciones máximas - Muro M1 - Carga vertical = 26.57 kg

Aceleraciones máximas (cm/s ²)							
Aceleración objetivo		Máximos positivos			Máximos negativos		
prototipo	escala	Acel 1	Acel 2	Acel 3	Acel 1	Acel 2	Acel 3
100	700	579	802	911	- 468	- 689	- 778
150	1 050	907	1 408	1 578	- 771	-1 027	-1 166
200	1 400	1 176	1 920	2 133	-1 045	-1 510	-1 747
300	2 100	1 850	3 022	3 322	-1 586	-2 485	-2 842
400	2 800	2 372	3 683	4 021	-1 993	-3 338	-3 562
500	3 500	2 966	4 567	4 963	-2 534	-4 267	-4 761
550	3 850	3 331	4 700	5 464	-2 761	-4 531	-4 845
600	4 200	3 524	5 221	5 539	-3 029	-4 867	-5 018
650	4 550	3 807	5 554	5 999	-3 419	-5 154	-5 128
700	4 900	4 199	5 650	6 081	-3 740	-5 177	-5 381

Cuadro N° 5.9.- Amplificación de la aceleración - Muro M1 - Carga vertical = 26.57 kg

Amplificación de la aceleración								
Acel 1 máxima		Máximos positivos			Máximos negativos			Promedio
prototipo	escala	Acel 2	Acel 3	Acel prom.	Acel 2	Acel 3	Acel prom.	
83	579	1.38	1.57	1.48	1.47	1.66	1.57	1.52
130	907	1.55	1.74	1.65	1.33	1.51	1.42	1.53
168	1176	1.63	1.81	1.72	1.44	1.67	1.56	1.64
264	1850	1.63	1.80	1.71	1.57	1.79	1.68	1.70
339	2372	1.55	1.70	1.62	1.67	1.79	1.73	1.68
424	2966	1.54	1.67	1.61				

Cuadro N° 5.10.- Degradación de la rigidez - Muro M1 - Carga vertical = 26.57 kg

Degradación de la rigidez								
Acel 1 máxima		Aceleración máx. promedio		Aceleración máxima	$\beta = 9.2\%$		$\beta = 5\%$	
prototipo	escala	positiva	negativa		Periodo	Rigidez (t/mm)	Periodo	Rigidez (t/mm)
83	579	856	733	856	0.0841	0.151	0.0919	0.127
130	907	1 493	1 096	1 493	0.0699	0.219	0.0875	0.140
168	1 176	2 027	1 628	2 027	0.0692	0.223	0.0877	0.139
264	1 850	3 172	2 663	3 172	0.0676	0.234	0.0868	0.142
339	2 372	3 852	3 450	3 852	0.0640	0.261	0.0854	0.147

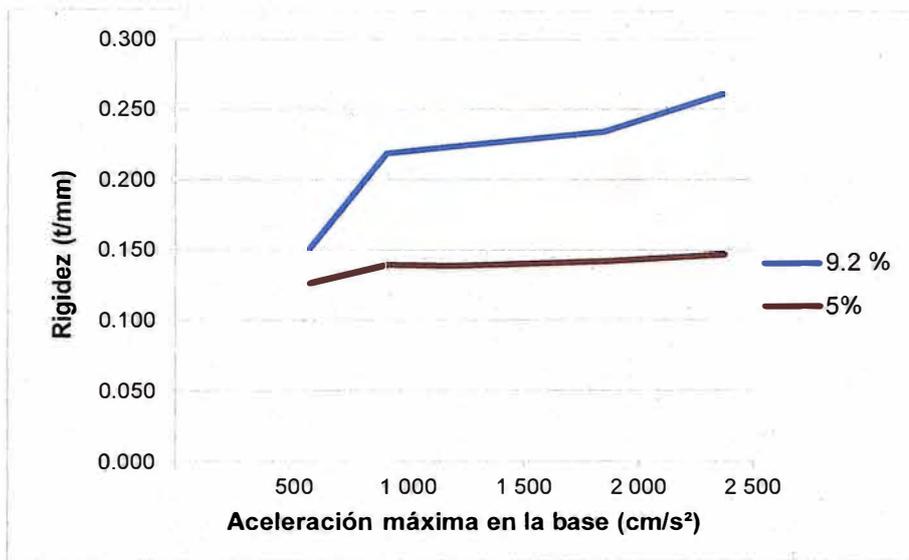
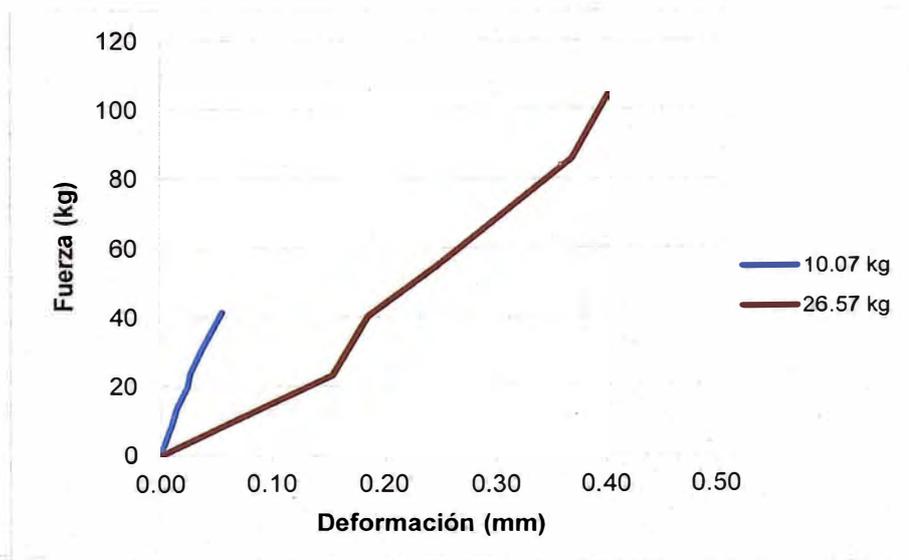


Figura N° 5.15.- Degradación de la rigidez - Muro M1 -Carga vertical = 26.57 kg

Cuadro N° 5.11.- Fuerza vs deformación - Muro M1 -Carga vertical = 26.57 kg

W =	26.57	kg
M =	0.0271	kg-s²/cm

Fuerza (kg)	deformación (mm)
0.0	0.0000
23.2	0.1533
40.4	0.1848
54.9	0.2457
85.9	0.3671
104.3	0.3998



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 5.16.- Fuerza vs deformación - Muro M1

II) Muro M2

a) Carga vertical = 29.27 kg

Cuadro N° 5.12.- Aceleraciones máximas - Muro M2 - Carga vertical = 29.27 kg

Aceleraciones máximas (cm/s ²)							
Aceleración objetivo		Máximos positivos			Máximos negativos		
prototipo	escala	Acel 1	Acel 2	Acel 3	Acel 1	Acel 2	Acel 3
100	700	483	1 051	1 174	- 423	- 871	-1 089
150	1 050	783	1 649	1 833	- 619	-1 383	-1 708
200	1 400	1 008	1 792	2 083	- 884	-1 740	-2 080
250	1 750	1 357	2 185	2 433	-1 068	-1 915	-2 105
300	2 100	1 765	2 714	2 615	-1 357	-2 127	-2 531
350	2 450	1 962	2 645	2 620	-1 618	-2 135	-2 182
400	2 800	2 352	3 079	3 477	-1 815	-2 827	-2 893
450	3 150	2 636	3 136	2 692	-2 128	-3 411	-2 622
500	3 500	3 042	2 622	2 303	-2 385	-3 384	-2 335
550	3 850	3 402	3 646		-2 607	-3 876	
600	4 200	3 600	3 759		-3 006	-3 983	
650	4 550	3 937	4 488		-3 019	-4 023	
700	4 900	3 870	5 783		-3 564	-5 121	
750	5 250	4 246	5 094		-3 609	-4 576	

Cuadro N° 5.13.- Amplificación de la aceleración - Muro M2 - Carga vertical = 29.27 kg

Amplificación de la aceleración								
Acel 1 máxima		Máximos positivos			Máximos negativos			Promedio
prototipo	escala	Acel 2	Acel 3	Acel prom.	Acel 2	Acel 3	Acel prom.	
69	483	2.17	2.43	2.30	2.06	2.57	2.32	2.31
112	783	2.11	2.34	2.22	2.23	2.76	2.50	2.36
144	1008	1.78	2.07	1.92	1.97	2.35	2.16	2.04
194	1357	1.61	1.79	1.70	1.79	1.97	1.88	1.79
252	1765	1.54	1.48	1.51	1.57	1.86	1.72	1.61

Cuadro N° 5.14.- Degradación de la rigidez - Muro M2 - Carga vertical = 29.27 kg

Degradación de la rigidez								
Acel 1 máxima		Aceleración máx. promedio		Aceleración máxima	$\beta = 9.2\%$		$\beta = 5\%$	
prototipo	escala	positiva	negativa		Periodo	Rigidez (t/mm)	Periodo	Rigidez (t/mm)
69	483	1 112	980	1 112	0.0325	1.117	0.0263	1.698
112	783	1 741	1 545	1 741	0.0345	0.992	0.0273	1.586
144	1 008	1 937	1 910	1 937	0.0590	0.338	0.0679	0.255
194	1 357	2 309	2 010	2 309	0.0610	0.317	0.0735	0.218
252	1 765	2 665	2 329	2 665	0.0620	0.306	0.0819	0.175

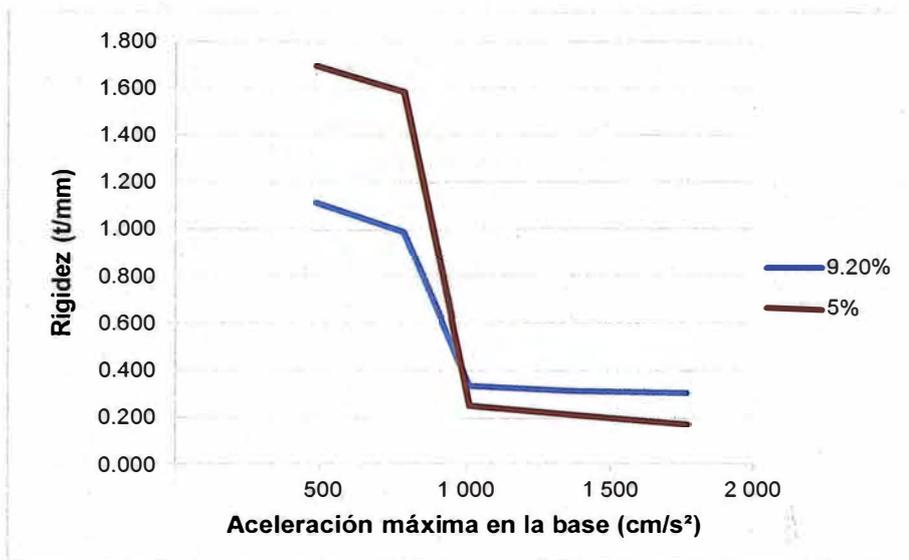


Figura N° 5.17.- Degradación de la rigidez - Muro M2 -Carga vertical = 29.27 kg

Cuadro N° 5.15.- Fuerza vs deformación - Muro M2 -Carga vertical = 29.27 kg

W =	29.27	kg
M =	0.02983	kg-s²/cm

Fuerza (kg)	deformación (mm)
0.0	0.0000
33.2	0.0297
52.0	0.0524
57.8	0.1708
68.9	0.2174
79.5	0.2594

b) Carga vertical = 37.67 kg

Cuadro N° 5.16.- Aceleraciones máximas - Muro M2 - Carga vertical = 37.67 kg

Aceleraciones máximas (cm/s²)							
Aceleración objetivo		Máximos positivos			Máximos negativos		
prototipo	escala	Acel 1	Acel 2	Acel 3	Acel 1	Acel 2	Acel 3
100	700	542	884	1 002	- 415	- 936	-1 065
200	1 400	1 190	1 190	1 381	- 979	-1 111	-1 324
300	2 100	1 621	1 844	2 188	-1 492	-1 648	-2 247
400	2 800	2 511	2 367	2 746	-1 969	-2 237	-2 702
450	3 150	2 789	2 505	2 660	-2 085	-2 061	-1 995
500	3 500	2 974	2 507	2 631	-2 488	-3 080	-3 948
550	3 850	3 401	2 669	2 797	-2 837	-3 066	-3 278
600	4 200	3 537	3 193	3 585	-2 812	-2 754	-3 743
650	4 550	3 785	3 587	4 567	-3 381	-3 675	-4 326
700	4 900	4 074	3 912	5 152	-3 483	-3 548	-5 042

Cuadro N° 5.17.- Amplificación de la aceleración - Muro M2 - Carga vertical = 37.67 kg

Amplificación de la aceleración								
Acel 1 máxima		Máximos positivos			Máximos negativos			Promedio
prototipo	escala	Acel 2	Acel 3	Acel prom.	Acel 2	Acel 3	Acel prom.	
77	542	1.63	1.85	1.74	2.25	2.56	2.41	2.07
170	1190	1.00	1.16	1.08	1.13	1.35	1.24	1.16
232	1621	1.14	1.35	1.24	1.10	1.51	1.31	1.27
359	2511	0.94	1.09	1.02	1.14	1.37	1.25	1.14
398	2789	0.90	0.95	0.93	0.99	0.96	0.97	0.95
425	2974	0.84	0.88	0.86	1.24	1.59	1.41	1.14

Cuadro N° 5.18.- Degradación de la rigidez - Muro M2 - Carga vertical = 37.67 kg

Degradación de la rigidez								
Acel 1 máxima		Aceleración máx. promedio		Aceleración máxima	$\beta = 9.2\%$		$\beta = 5\%$	
prototipo	escala	positiva	negativa		Periodo	Rigidez (t/mm)	Periodo	Rigidez (t/mm)
77	542	943	1 000	1 000	0.0455	0.733	0.0614	0.402
170	1 190	1 286	1 217	1 286	0.0831	0.220	0.0938	0.172
232	1 621	2 016	1 947	2 016	0.0824	0.223	0.0928	0.176
359	2 511	2 557	2 470	2 557	0.0849	0.210	0.0954	0.167
398	2 789	2 582	2 028	2 582	0.0878	0.196	0.0989	0.155
425	2 974	2 569	3 514	3 514	0.0817	0.227	0.0892	0.190

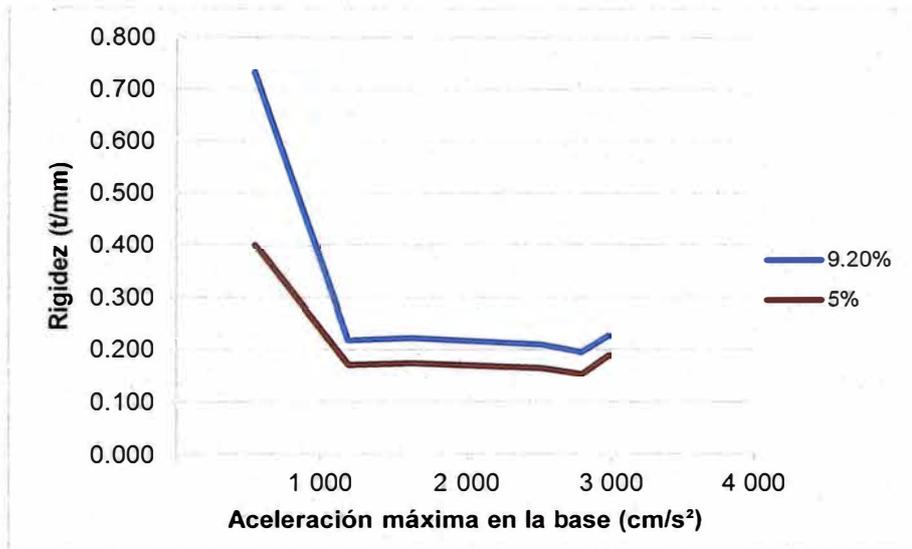


Figura N° 5.18.- Degradación de la rigidez - Muro M2 -Carga vertical = 37.67 kg

Cuadro N° 5.19.- Fuerza vs deformación - Muro M2 -Carga vertical = 37.67 kg

W =	37.67	kg
M =	0.0384	kg-s²/cm

Fuerza (kg)	deformación (mm)
0.0	0.0000
38.4	0.0524
49.4	0.2249
77.4	0.3470
98.2	0.4664
99.2	0.5048
134.9	0.5945

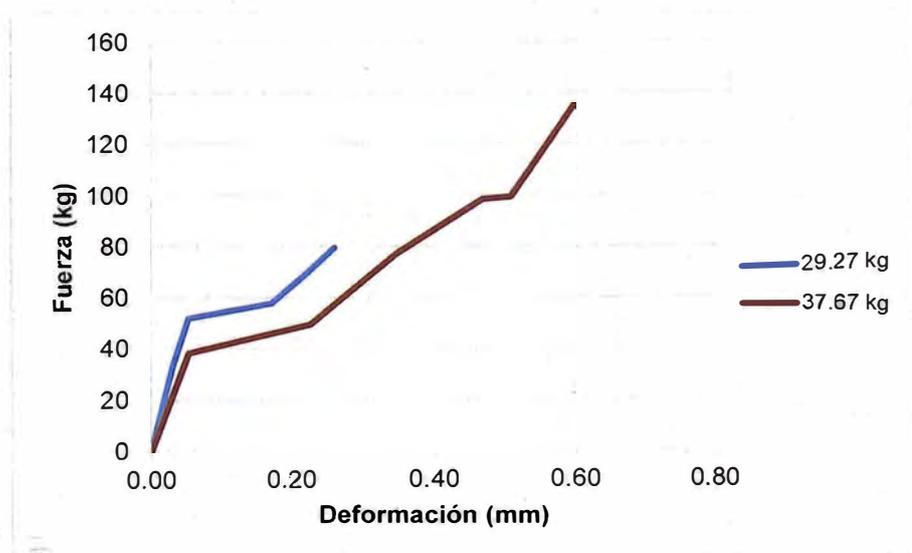


Figura N° 5.19.- Fuerza vs deformación - Muro M2

III) Muro M3

Carga vertical = 37.67 kg

Cuadro N° 5.20.- Aceleraciones máximas - Muro M3 - Carga vertical = 37.67 kg

Aceleraciones máximas (cm/s ²)							
Aceleración objetivo		Máximos positivos			Máximos negativos		
prototipo	escala	Acel 1	Acel 2	Acel 3	Acel 1	Acel 2	Acel 3
100	700	463	993		- 491	-1 074	
150	1 050	776	1 414		- 739	-1 381	
200	1 400	1 240	1 604		-1 060	-1 624	
250	1 750	1 547	1 787		-1 126	-1 636	
300	2 100	1 946	1 828		-1 381	-2 275	
350	2 450	2 085	2 130		-1 701	-2 355	
400	2 800	2 374	2 445		-1 786	-2 979	
450	3 150	2 829	2 640		-2 126	-2 824	
500	3 500	3 008	2 782		-2 379	-3 749	
550	3 850	3 319	3 469		-2 691	-3 521	
600	4 200	3 583	3 275		-2 878	-3 334	
650	4 550	3 815	3 666		-3 112	-3 512	
700	4 900	4 175	4 148		-3 673	-4 163	
750	5 250	4 491	3 883		-3 663	-3 587	

* En el caso de este muro el acelerómetro 3 no dio resultados coherentes, por lo que se descartaron estos datos.

Cuadro N° 5.21.- Amplificación de la aceleración - Muro M3 - Carga vertical = 37.67 kg

Amplificación de la aceleración								
Acel 1 máxima		Máximos positivos			Máximos negativos			Promedio
prototipo	escala	Acel 2	Acel 3	Acel prom.	Acel 2	Acel 3	Acel prom.	
70	491	2.14	--	2.14	2.19	--	2.19	2.17
111	776	1.82	--	1.82	1.87	--	1.87	1.85
177	1240	1.29	--	1.29	1.53	--	1.53	1.41
221	1547	1.16	--	1.16	1.45	--	1.45	1.30
278	1946	0.94	--	0.94	1.65	--	1.65	1.29
298	2085	1.02	--	1.02	1.38	--	1.38	1.20
339	2374	1.03	--	1.03	1.67	--	1.67	1.35
404	2829	0.93	--	0.93	1.33	--	1.33	1.13
430	3008	0.93	--	0.93	1.58	--	1.58	1.25
474	3319	1.05	--	1.05	1.31	--	1.31	1.18
512	3583	0.91	--	0.91	1.16	--	1.16	1.04

Cuadro N° 5.22.- Degradación de la rigidez - Muro M3 - Carga vertical = 37.67 kg

Degradación de la rigidez								
Acel 1 máxima		Aceleración máx. promedio		Aceleración máxima	$\beta = 9.2\%$		$\beta = 5\%$	
prototipo	escala	positiva	negativa		Periodo	Rigidez (t/mm)	Periodo	Rigidez (t/mm)
70	491	993	1 074	1 074	0.0423	0.846	0.0592	0.432
111	776	1 414	1 381	1 414	0.0454	0.735	0.0649	0.359
177	1 240	1 604	1 624	1 624	0.0500	0.606	0.0698	0.311
221	1 547	1 787	1 636	1 787	0.0725	0.288	0.0891	0.191
278	1 946	1 828	2 275	2 275	0.0686	0.322	0.0875	0.198
298	2 085	2 130	2 355	2 355	0.0832	0.219	0.0935	0.173
339	2 374	2 445	2 979	2 979	0.0682	0.326	0.0873	0.199
404	2 829	2 640	2 824	2 824	0.0840	0.215	0.0941	0.171
430	3 008	2 782	3 749	3 749	0.0679	0.329	0.0853	0.208

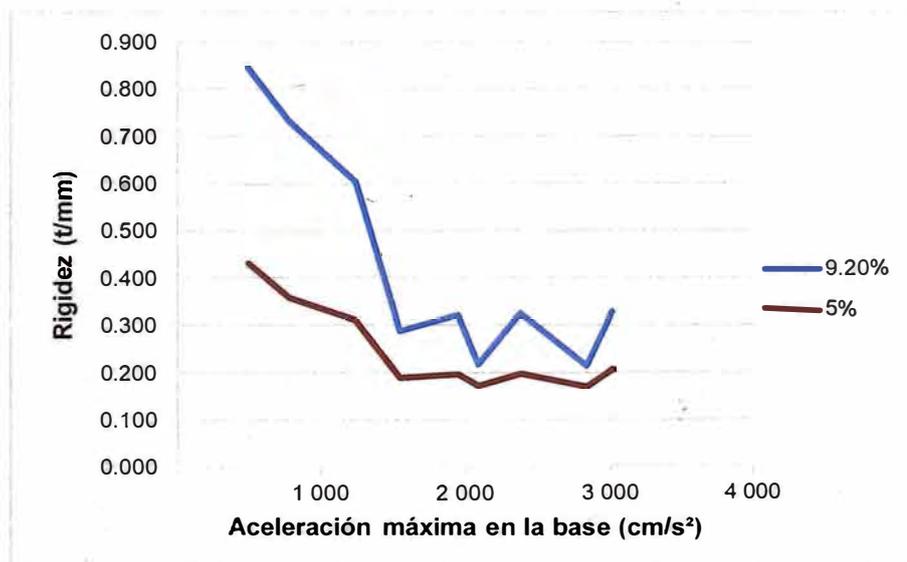


Figura N° 5.20.- Degradación de la rigidez - Muro M3 -Carga vertical = 37.67 kg

Cuadro N° 5.23.- Fuerza vs deformación - Muro M3 -Carga vertical = 37.67 kg

W =	37.67	kg
M =	0.0384	kg-s ² /cm

Fuerza (kg)	deformación (mm)
0.0	0.0000
41.2	0.0487
54.3	0.0739
62.3	0.1029
68.6	0.2381
87.4	0.2715
90.4	0.4131
114.4	0.3510
108.4	0.5044
144.0	0.4377

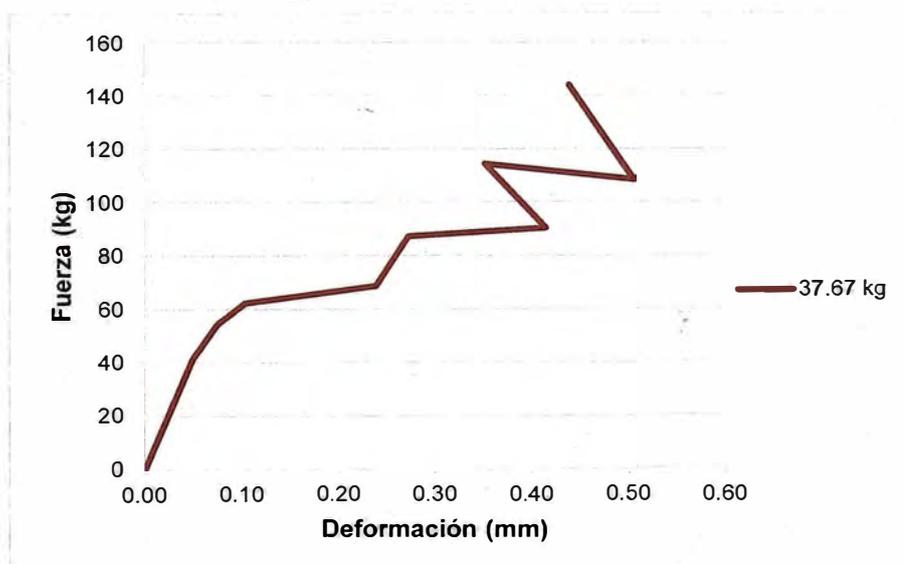


Figura N° 5.21.- Fuerza vs deformación - Muro M3

5.4 EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Al comparar la rigidez obtenida de los ensayos de vibración forzada con los definidos teóricamente obtenemos:

Cuadro N° 5.24.- Rigidez teórica vs experimental

Rigidez (t/mm)			
teórico		experimental	
prototipo	modelo	prototipo	modelo
31.5	4.5	15.4	2.2

Se observa que la relación entre la rigidez teórica y la experimental es de 2 a 1; sin embargo si se compara los resultados con los obtenidos de los ensayos realizados a escala real (Medina, G. 2005), la relación entre el cálculo teórico y experimental era la misma (teórico = 40 t/mm // experimental = 20 t/mm)

Por otra parte, al medir la rigidez durante los ensayos aplicando registros sísmicos los valores iniciales de los muros considerando un amortiguamiento de 9.2% son:

Muro 1 0.905 t/mm

Muro 2 1.117 t/mm

Muro 3 0.846 t/mm

Lo que nos da un valor equivalente a la cuarta parte del valor teórico. Sin embargo hay que tomar en cuenta que estos valores se obtuvieron analizando los resultados luego de someter a los muros a un sismo por lo que es probable que fueran menores a los obtenidos con la onda sinusoidal.

Al comparar los gráficos de fuerza vs deformación de los diferentes muros, se observa que hay una degradación de rigidez en el primer ensayo de cada muro, que se refleja al inicio del segundo ensayo donde la rigidez suele empezar con un valor menor. Sin embargo, esto no implica que el muro haya ingresado al rango inelástico, esto debido a que una vez producido el cambio el valor de la rigidez se mantiene similar hasta el final de los ensayos en los 3 muros. Por otra parte, se observa que la rigidez inicial del tercer muro que fue vaceado monolíticamente se mantiene por más tiempo, pero una vez pasado este punto el comportamiento se asemeja a los otros dos muros, por lo que en principio podemos considerar que el aporte a la rigidez de vacear el muro monolíticamente es mínimo.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

Aspectos generales

El presente sistema estructural es de uso fácil y práctico en la construcción industrializada, sin embargo tiene como principal inconveniente su comportamiento frágil ante cargas extremas por lo que requiere mayor estudio de su comportamiento dinámico para asegurar que tendrá un desempeño adecuado.

Como parte de este proceso, se ha realizado un acercamiento aplicando a muros construidos con este sistema un sismo a diferentes niveles de intensidad y estudiando su comportamiento. Debido a que en los laboratorios de la universidad solo se dispone de una mesa vibradora pequeña, se empleó un modelo a escala reducida, que podrá ser usado como base para hacer modelos a escala de estructuras de mayores dimensiones.

Análisis teórico

Se hizo un análisis teórico básico considerando la normatividad vigente, en el cual se confirma que teóricamente se espera una falla por flexión del sistema. Esto es importante ya que debido a la baja ductilidad del sistema la falla sería frágil, lo cual no es lo más adecuado debido a que en caso de falla podría producirse un colapso repentino de la estructura.

Análisis dimensional

Se hizo un análisis dimensional utilizando como base el teorema de Buckingham-Vaschy, el cual permite generar relaciones entre un modelo real y uno de escala reducida en función de las propiedades del modelo empleado. Para determinar la mejor relación a emplear se tuvo que tener en cuenta el tipo de ensayo a realizar, así como también los equipos disponibles.

Modelo a escala

Uno de los principales inconvenientes que se presentan en la construcción de modelos a escala reducida es encontrar los materiales adecuados que permitan reflejar de manera adecuada las propiedades del modelo real en el modelo a escala reducida. En el caso del concreto se tuvo que escalar la mezcla de tal

manera que permita la trabajabilidad del mismo al momento de colocarlo en el modelo. Por otra parte el acero fue más complicado de reemplazar, por lo que tuvieron que emplearse mallas de acero cuyas propiedades no eran conocidas y que debido a su pequeño diámetro no podían ser ensayadas en los laboratorios, por lo que tuvo que realizarse de manera alternativa, haciéndose varios ensayos para tener la mayor certeza posible.

Para la construcción en si se tuvo que fabricar encofrados especiales, así como un procedimiento adecuado que permita un buen vaceado del concreto. Este procedimiento puede servir como referencia para futuros ensayos a realizar

Programa de cómputo

Un elemento importante para poder realizar los ensayos fue generar un programa de cómputo que permita enviar las señales de la onda sísmica a la mesa vibradora. Este programa permite enviar diferentes tipos de ondas, desde sinusoidales simples hasta otras más complejas como sismos, pudiendo escalarlas según las necesidades del ensayo y las capacidades del equipo.

Un punto importante a verificar es que, a pesar de que el programa envía la señal exacta ingresada al sistema, en la mesa vibradora se miden aceleraciones ligeramente diferentes, que generan algunas pequeñas distorsiones en los contenidos de frecuencia. Esto se puede deber a diversos factores como la sensibilidad de los sensores al ruido ambiental o a la necesidad de mantenimiento de la mesa vibradora por lo que se debe analizar mejor las causas de esta distorsión.

Resultados experimentales

El principal inconveniente de estos ensayos fue la toma de datos debido a que los intervalos de tiempo al estar escalados debían ser de milésimas de segundo, sin embargo se pudo utilizar un reproductor de señales que permitía grabar las respuestas de los sensores y repetirlos a menor velocidad, permitiendo mayor cantidad de datos por segundo. Esto generó algunos inconvenientes, como no poder tener los resultados inmediatamente, sino el tener que procesarlos posteriormente encontrándose algunos problemas como sensores que enviaban señales distorsionadas o datos poco confiables.

Al observar los resultados de las aceleraciones obtenidos y procesarlos se pudo determinar una degradación inicial de los muros al aplicar las primeras cargas.

Sin embargo en posteriores ensayos los muros alcanzaban estabilidad por lo que puede concluirse que considerando las masas aplicadas y a la limitación en la aceleración máxima de la mesa vibradora y de los sensores, estos aun se encontraban en el rango lineal, encontrándose solo una pequeña diferencia inicial en los muros que fueron vaceados monolíticamente con respecto a los que se vacearon en dos etapas, diferencia que no es muy significativa. Esto también se reflejó en los ensayos donde los muros mantuvieron su estabilidad hasta el final.

Con respecto a los resultados teóricos debido a que no se produjo la falla de los muros solo se pudo comparar los valores de rigidez los cuales al hacer la prueba de vibración simple dieron valores del orden de la mitad del valor teórico calculado. Debe anotarse que en los ensayos a escala real realizados previos a este informe se observó la misma relación entre los valores teóricos y los experimentales, por lo que se consideraron los resultados aceptables. Sin embargo esto implica que debería hacerse mayor investigación al respecto.

Por otra parte, de los ensayos se observa que la rigidez inicial de los muros se pierde rápidamente ante la acción de cargas menores siendo la rigidez efectiva del muro en el rango "lineal" menor a la rigidez inicial del sistema.

6.2 RECOMENDACIONES

Los ensayos a escala reducida en mesa vibradora permiten estudiar el comportamiento de estructuras de maneras que no nos son factibles a escala real por lo que se debe poner mayor énfasis en el desarrollo de este método de ensayo, mejorando en lo posible los equipos para toma de datos, lo cual el laboratorio de estructuras del Cismid ha empezado a realizar actualmente.

En los ensayos a escala reducida se debe tener especial cuidado en los materiales a emplear, para evitar la introducción de distorsiones que puedan dar una idea equivocada del comportamiento del sistema motivo de estudio.

Se recomienda como siguiente paso del estudio de este sistema el construir una estructura de varios pisos a escala reducida que permita la aplicación de mayor cantidad de peso. Se debe tener en cuenta que el colapso de la estructura podría dañar a los equipos o personas que participan en el ensayo por lo que se deben tomar las precauciones respectivas.

BIBLIOGRAFÍA

COTE, P., TAYLOR, C., WALLACE, J., Design of Slender Reinforced Concrete Walls with Openings, *ACI Structural Journal*, July-August 1998

ECHAVEZ, G., *Introducción a los modelos hidráulicos de fondo fijo y a la ingeniería experimental*, Universidad Nacional Autónoma de México, 1996

GOMEZ, A., *Estudio analítico-experimental del comportamiento dinámico de edificaciones de adobe y quincha con ensayo de modelo en mesa vibradora*, Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Civil – Universidad Nacional de Ingeniería, Lima 2000

HARMSSEN, T., MAYORCA, P., *Diseño de Estructuras de Concreto Armado*, Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima 2000

HARRIS, H., GAJANAN, M., *Structural modelling and experimental techniques*, CRC Press, USA 1999

HIDALGO, P., JORDÁN, R. and LEDEZMA, C.A., *Experimental Study of Reinforced Concrete Walls under Shear Failure*, Universidad Católica de Chile.

MEDINA, G. *Estudio del comportamiento experimental a escala natural de muros y modulo de concreto reforzados con malla electrosoldada*, Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Civil – Universidad Nacional de Ingeniería, Lima 2005

NAM-SIM KIM, YOUNG-HAK KWAK, SUN PIL CHANG, *Pseudodynamic test on small scale steel models using the modified similitude law*, 13WCEE – Vancouver 2004

PARK, R., PAULAY, T. , *Estructuras de Concreto Reforzado*, Limusa, Mexico 1983.

PARK, R., PAULAY, T., YANEZ, F.V., *Seismic Behaviour of Reinforced Concrete Structural Walls with Regular and Irregular Openings*, Department of Civil Engineering, University of Canterbury 1991

PAULAY, T. and PRIESTLEY, N., *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, Wiley Interscience, USA 1991

RIVERA, M., *Verificación experimental del estado límite de una estructura aporticada típica sometida a un sismo*. Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Civil – Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú 1999

RIVVA, E., *Naturaleza y materiales del concreto*, Capitulo peruano ACI, Lima 2000

SAN BARTOLOMÉ, A., MUÑOZ, A., VILLAGARCÍA, M., ACUÑA, C., *Comportamiento Sísmico de Placas de Concreto Reforzadas con Mallas Electrosoldadas*, Pontificia Universidad Católica del Perú. 2003

SENCICO, Reglamento Nacional de Construcciones, Norma Técnica de Edificación E-030 “Diseño Sismoresistente”, Lima 2006.

SENCICO, Reglamento Nacional de Construcciones, Norma Técnica de Edificación E-060 “Concreto Armado”, Lima 2009.

TOBAR, R., *Modelación a escala reducida de estructuras de hormigón armado sometidas a sismo*, Valparaíso 2003

WALLACE, B., KRAWINKLER, H., *Small-scale model experimentation on R/C assemblies U.S. – Japan research program*, Stanford University 1985

ANEXO I: PROGRAMA DE CÓMPUTO

VERSION 5.00

Object = "{F9043C88-F6F2-101A-A3C9-08002B2F49FB}#1.2#0"; "comdlg32.ocx"

Begin VB.Form Form1

 Caption = "Form1"

 ClientHeight = 7530

 ClientLeft = 60

 ClientTop = 345

 ClientWidth = 10740

 LinkTopic = "Form1"

 ScaleHeight = 7530

 ScaleWidth = 10740

 StartupPosition = 3 'Windows Default

Begin VB.TextBox nvec

 Height = 285

 Left = 6000

 TabIndex = 43

 Text = "1"

 Top = 4800

 Width = 495

End

Begin MSComDlg.CommonDialog dlgabrir

 Left = 4680

 Top = 6120

 _ExtentX = 847

 _ExtentY = 847

 _Version = 393216

End

Begin VB.TextBox maxt

 Height = 285

 Left = 9840

 TabIndex = 34

 Top = 3720

 Width = 495

End

Begin VB.TextBox mint

 Height = 285

 Left = 5160

 TabIndex = 33

 Top = 3720

 Width = 495

End

Begin VB.TextBox mindv

 Height = 285

 Left = 4560

 TabIndex = 32

 Top = 3360

 Width = 495

End

Begin VB.TextBox maxdv

```
Height      = 285
Left        = 4560
TabIndex    = 31
Top         = 600
Width       = 495
End
Begin VB.PictureBox grafico
  BackColor  = &H80000009&
  DrawWidth  = 10
  FillStyle  = 0 'Solid
  FontTransparent = 0 'False
  Height     = 3015
  Left       = 5160
  ScaleHeight = 217.68
  ScaleLeft  = -100
  ScaleMode  = 0 'User
  ScaleTop   = 100
  ScaleWidth = 226.578
 TabIndex    = 30
  Top        = 600
  Width      = 5175
End
Begin VB.Frame Frame2
  Caption    = "Ingreso de datos"
  Height     = 7215
  Left       = 480
  TabIndex   = 2
  Top        = 240
  Width      = 3855
  Begin VB.CheckBox Check3
    BackColor  = &H80000000&
    Caption    = "Check3"
    Enabled    = 0 'False
    Height     = 255
    Left       = 360
    TabIndex   = 41
    Top        = 3360
    Width      = 255
  End
  Begin VB.CheckBox Check2
    Caption    = "Check2"
    Enabled    = 0 'False
    Height     = 255
    Left       = 360
    TabIndex   = 40
    Top        = 2880
    Width      = 255
  End
  End
  Begin VB.TextBox dtall
    Height     = 285
    Left       = 2640
    TabIndex   = 39
    Text       = "0.01"
```

```
Top      = 6120
Width    = 615
End
Begin VB.TextBox dtop
  BackColor = &H80000000&
  Enabled   = 0 'False
  Height    = 285
  Left      = 2160
  TabIndex  = 37
  Top       = 840
  Width     = 615
End
Begin VB.CheckBox Check1
  Caption   = "Check1"
  Height    = 255
  Left      = 360
  TabIndex  = 35
  Top       = 840
  Width     = 255
End
Begin VB.TextBox tl
  BackColor = &H80000000&
  Enabled   = 0 'False
  Height    = 285
  Left      = 1800
  TabIndex  = 29
  Top       = 5040
  Width     = 615
End
Begin VB.TextBox tf
  BackColor = &H80000000&
  Enabled   = 0 'False
  Height    = 285
  Left      = 2040
  TabIndex  = 27
  Top       = 3810
  Width     = 615
End
Begin VB.TextBox dvp
  Height    = 285
  Left      = 2640
  TabIndex  = 25
  Text      = "0.1"
  Top       = 5640
  Width     = 615
End
Begin VB.TextBox bl
  BackColor = &H80000000&
  Enabled   = 0 'False
  Height    = 285
  Left      = 2400
  TabIndex  = 23
  Top       = 4560
```

```
Width      = 495
End
Begin VB.TextBox al
  BackColor = &H80000000&
  Enabled   = 0 'False
  Height    = 285
  Left      = 1080
  TabIndex  = 21
  Top       = 4560
  Width     = 495
End
Begin VB.TextBox df
  BackColor = &H80000000&
  Enabled   = 0 'False
  Height    = 285
  Left      = 2640
  TabIndex  = 18
  Top       = 3360
  Width     = 495
End
Begin VB.TextBox cf
  BackColor = &H80000000&
  Enabled   = 0 'False
  Height    = 285
  Left      = 2640
  TabIndex  = 16
  Top       = 2880
  Width     = 495
End
Begin VB.TextBox bf
  BackColor = &H80000000&
  Enabled   = 0 'False
  Height    = 285
  Left      = 1200
  TabIndex  = 14
  Top       = 3360
  Width     = 495
End
Begin VB.TextBox af
  BackColor = &H80000000&
  Enabled   = 0 'False
  Height    = 285
  Left      = 1200
  TabIndex  = 12
  Top       = 2880
  Width     = 495
End
Begin VB.TextBox Esct
  Height    = 285
  Left      = 2160
  TabIndex  = 8
  Top       = 2010
  Width     = 615
```

```
End
Begin VB.TextBox Esca
    Height = 285
    Left = 2160
    TabIndex = 7
    Top = 1410
    Width = 615
End
Begin VB.OptionButton Option1
    Caption = "Funcion lineal a x + b"
    Height = 375
    Index = 2
    Left = 120
    TabIndex = 6
    Top = 4200
    Width = 2535
End
Begin VB.OptionButton Option1
    Caption = "Función = a Sen(cx)+b Cos(dx)"
    Height = 375
    Index = 1
    Left = 120
    TabIndex = 5
    Top = 2400
    Width = 2655
End
Begin VB.OptionButton Option1
    Caption = "Ingreso de archivo"
    Height = 375
    Index = 0
    Left = 240
    TabIndex = 4
    Top = 360
    Value = -1 'True
    Width = 2535
End
Begin VB.CommandButton Aceptar
    Caption = "Aceptar"
    Height = 495
    Left = 960
    TabIndex = 3
    Top = 6600
    Width = 1815
End
Begin VB.Label Label7
    Caption = "Dt ="
    Height = 255
    Left = 2040
    TabIndex = 38
    Top = 6120
    Width = 495
End
Begin VB.Label Label14
```

```
Caption      = "dT constante ="
Height       = 255
Left         = 840
TabIndex    = 36
Top          = 840
Width        = 1095
End
Begin VB.Label Label13
Caption      = "Tiempo ="
Height       = 255
Left         = 960
TabIndex    = 28
Top          = 5070
Width        = 735
End
Begin VB.Label Label12
Caption      = "Tiempo ="
Height       = 255
Left         = 1200
TabIndex    = 26
Top          = 3840
Width        = 735
End
Begin VB.Label Label11
Caption      = "Diferencia de voltaje máxima ="
Height       = 255
Left         = 360
TabIndex    = 24
Top          = 5640
Width        = 2175
End
Begin VB.Label Label10
Caption      = "b ="
Height       = 255
Left         = 2040
TabIndex    = 22
Top          = 4560
Width        = 255
End
Begin VB.Label Label9
Caption      = "a ="
Height       = 255
Left         = 720
TabIndex    = 20
Top          = 4560
Width        = 255
End
Begin VB.Label Label6
Caption      = "d ="
Height       = 255
Left         = 2280
TabIndex    = 17
Top          = 3360
```

```
Width      = 255
End
Begin VB.Label Label5
Caption    = "c ="
Height    = 255
Left      = 2280
TabIndex  = 15
Top       = 2880
Width     = 255
End
Begin VB.Label Label4
Caption    = "b ="
Height    = 255
Left      = 840
TabIndex  = 13
Top       = 3360
Width     = 255
End
Begin VB.Label Label3
Caption    = "a ="
Height    = 255
Left      = 840
TabIndex  = 11
Top       = 2880
Width     = 255
End
Begin VB.Label Label2
Caption    = "Factor de escala del tiempo"
Height    = 375
Left      = 360
TabIndex  = 10
Top       = 1920
Width     = 1455
End
Begin VB.Label Label1
Caption    = "Factor de escala de aceleración"
Height    = 375
Left      = 360
TabIndex  = 9
Top       = 1320
Width     = 1455
End
Begin VB.CommandButton Enviar
Caption    = "Enviar señal"
Height    = 615
Left      = 5040
TabIndex  = 1
Top       = 6720
Width     = 1815
End
Begin VB.CommandButton Salir
Caption    = "Salir"
```

```
Height      = 615
Left        = 8520
TabIndex    = 0
Top         = 6720
Width       = 1575
End
Begin VB.Label Label15
Caption     = "# de veces ="
Height      = 255
Left        = 4800
TabIndex    = 42
Top         = 4800
Width       = 1095
End
Begin VB.Label Label8
Caption     = "c ="
Height      = 255
Left        = 2520
TabIndex    = 19
Top         = 4560
Width       = 255
End
End
Attribute VB_Name = "Form1"
Attribute VB_GlobalNameSpace = False
Attribute VB_Creatable = False
Attribute VB_PredeclaredId = True
Attribute VB_Exposed = False
Option Explicit

Dim nd, dt, datf(), i, ket, Av, dv, acelm
Dim datos() As Long

Private Sub Aceptar_Click()
Dim r, fso, fill, ts, nombrearchivo, temp
Dim t, ndt, n, fg, rt
Dim dat(), i, j

' intervalo de tiempo en el cual la tarjeta envía cada dato
dt = dtall.Text

' OPCIONES DE INGRESO DE DATOS

' LECTURA DE DATOS DE ARCHIVO
```

```
If Option1(0).Value = True Then
  ReDim dat(15000, 1) 'ReDim dat(10000, 1)
  dlgabrir.ShowOpen
  'Ubica y abre archivo
  r = dlgabrir.FileName

  t = -1
  Open r For Input As #1
    ReDim dat(15000, 1) 'ReDim dat(10000, 1)
    Line Input #1, nombreambrado
    Line Input #1, temp

    If Check1.Value = 0 Then
      Do Until EOF(1)
        t = t + 1
        Input #1, dat(t, 0), dat(t, 1)
      Loop
    Else
      dtop = dtop.Text
      Do Until EOF(1)
        t = t + 1
        dat(t, 0) = dtop * t
        Input #1, dat(t, 1)
      Loop
    End If
    ndt = t
  Close #1

  'Escalamiento con valores leídos en pantalla
  For i = 0 To ndt
    dat(i, 0) = dat(i, 0) * Esct
    dat(i, 1) = dat(i, 1) * Esca
  Next i

  'Organizar datos en función del tiempo dt
```

```
nd = Int(dat(ndt, 0) / dt)
ReDim datf(nd)
ket = 1
For i = 0 To nd - 1
  For j = ket To ndt
    If dat(j, 0) > i * dt Then
      datf(i) = (dat(j, 1) - dat(j - 1, 1)) * (i * dt - dat(j - 1, 0)) / (dat(j, 0) - dat(j - 1, 0))
+ dat(j - 1, 1)
      ket = j: j = ndt + 1
    End If
  Next j
Next i
datf(nd) = dat(ndt, 1)
End If
```

'Función Seno y/o Coseno

```
If Option1(1).Value = True Then
```

```
  Dim aft, bft, cft, dft
```

```
  tf = tf.Text
```

```
  If Check2.Value = 0 Then
```

```
    aft = 0: cft = 0
```

```
  Else
```

```
    aft = af.Text: cft = cf.Text
```

```
  End If
```

```
  If Check3.Value = 0 Then
```

```
    bft = 0: dft = 0
```

```
  Else
```

```
    bft = bf.Text: dft = df.Text
```

```
  End If
```

```
nd = tf / dt
```

```
ReDim datf(nd)
```

```
For i = 0 To nd
```

```
  datf(i) = aft * Sin(cft * i * dt) + bft * Cos(dft * i * dt)
```

```
Next i
End If
```

```
'Función lineal
If Option1(2).Value = True Then
  tl = tl.Text
  al = al.Text: bl = bl.Text
  nd = tl / dt
  ReDim datf(nd)
  For i = 0 To nd
    datf(i) = al * i * dt + bl
  Next i
End If
```

```
'Escala a 5v o otra diferencia de voltaje especificada
ReDim datos(nd)
'aqui se cambia la ecuación de aceleración vs dv
'Dim dvz
'acelm = dvp.Text
'dvz = (acelm + 54) / 2628.2
'Av = dvz
```

```
'Se busca el mayor valor en la serie
Av = dvp.Text 'estpo era del programa inicial
dv = Av * 409.6 '409.5999999 '1V = 409.6
ket = 0
For i = 0 To nd
  If ket < Abs(datf(i)) Then ket = Abs(datf(i))
Next i
```

```
For i = 0 To nd
  datos(i) = datf(i) * dv / ket + 2047.5 ' 2047.5
Next i
'Dim coef
```

```

'coef = dv / ket

'Valores para graficar
Dim tt, ket2
tt = nd * dt
maxdv.Text = 0
maxdv.Text = Av * 1.2
mindv.Text = -Av * 1.2
maxt.Text = tt
mint.Text = -0.025 * tt
ket2 = maxdv.Text * ket / Av
' ket2 = maxdv.Text * acelm / Av
'max.Caption = redondear(ket2, 2)
'min.Caption = redondear(-ket2, 2)
End Sub
Private Sub Enviar_Click()

Dim hDeviceHandle As Long           ' device handle
'Dim wSmpldata() As Long
Dim wSmpldata(0 To 1, 0 To 15000) As Integer ' datos de salida analoga
Dim SmpIConfig As DASMPREQ         ' sampliado de salida analoga
Dim ModeConfig As DAMODEREQ       ' modo de configuracion
Dim ulSmpIBufferSize As Long      ' tamaño del buffer de salida analoga
Dim i As Integer                   ' contador
Dim nRet As Long
Dim szDeviceName As String * 16    ' nombre del device

Dim nve As Integer
nve = nvec.Text
' nombre del device o board
szDeviceName = "FBIDA1" & Chr(0)
hDeviceHandle = DaOpen(szDeviceName)
If hDeviceHandle = -1 Then
nRet = MsgBox("No existe el device de nombre FBIDA1 ", vbOKOnly +
vbCritical, "FBIDA1")

```

```
Unload Me
End If

nRet = DaClearSamplingData(hDeviceHandle)

' Setting del tamaño del buffer de salida análoga
ulSmplBufferSize = nd
nRet = DaSetBoardConfig(hDeviceHandle, ulSmplBufferSize, 0, 0, 0)

'Configuración del sampleado de la salida análoga
nRet = DaGetSamplingConfig(hDeviceHandle, SmplConfig)

' nombre de los canales de salida análoga 1 y 2
SmplConfig.ulChCount = 2
SmplConfig.fSmplFreq = 1 / dt 'establece delta de t
SmplConfig.SmplChReq(0).ulChNo = 1
SmplConfig.SmplChReq(1).ulChNo = 2
SmplConfig.SmplChReq(0).ulRange = DA_5V 'rango de -5v a 5v
SmplConfig.ulSmplRepeat = nve
nRet = DaSetSamplingConfig(hDeviceHandle, SmplConfig)

' preparación de los datos de salida análoga
For i = 0 To nd
    wSmplData(0, i) = datos(i) 'wSmplData(0, i) = datos(i)
Next

'arreglo de datos de salida
nRet = DaSetSamplingData(hDeviceHandle, wSmplData(0, 0), nd)

' envió de datos de salida
nRet = DaStartSampling(hDeviceHandle, FLAG_SYNC)

' cierre de salida análoga
nRet = DaClose(hDeviceHandle)
End Sub
```

'PARTE GRAFICA Y DE PRESENTACION

```
Private Sub maxdv_Change()
```

```
On Error GoTo lbl3:
```

```
' max.Caption = redondear(maxdv.Text * ket / Av, 2)
```

```
'max.Caption = redondear(maxdv.Text * acelm / Av, 2)
```

```
Call cambiar
```

```
lbl3:
```

```
End Sub
```

```
Private Sub maxt_Change()
```

```
Call cambiar
```

```
End Sub
```

```
Private Sub min_Click()
```

```
End Sub
```

```
Private Sub mindv_Change()
```

```
On Error GoTo lbl2:
```

```
' min.Caption = redondear(mindv.Text * ket / Av, 2)
```

```
'min.Caption = redondear(mindv.Text * acelm / Av, 2)
```

```
Call cambiar
```

```
lbl2:
```

```
End Sub
```

```
Private Sub mint_Change()
```

```
Call cambiar
```

```
End Sub
```

```
Private Sub cambiar()
```

```
On Error GoTo lbl1:
```

```
grafico.Cls
```

```
Dim tt
```

```
Dim madv, midv, mat, mit
```

```
tt = nd * dt
```

```
madv = maxdv.Text * 409.6 + 2048
```

```
midv = mindv.Text * 409.6 + 2048
```

```
mat = maxt.Text
```

```
mit = mint.Text
grafico.Scale (mit, madv)-(mat, midv)
grafico.Line (mit, 2048)-(mat, 2048), vbBlack
grafico.Line (0, madv)-(0, midv), vbBlack
grafico.Line (0, datos(0))-(dt, datos(1)), vbBlack
For i = 2 To nd
grafico.Line -(i * dt, datos(i)), vbBlack
Next i
lbl1:
End Sub
Private Sub Option1_Click(Index As Integer)
Check1.Enabled = False
Check1.Value = 0
Esca.BackColor = &H80000000
Esca.Enabled = False
Esct.BackColor = &H80000000
Esct.Enabled = False
af.BackColor = &H80000000
af.Enabled = False
bf.BackColor = &H80000000
bf.Enabled = False
cf.BackColor = &H80000000
cf.Enabled = False
df.BackColor = &H80000000
df.Enabled = False
tf.BackColor = &H80000000
tf.Enabled = False
Check2.Enabled = False
Check2.Value = 0
Check3.Enabled = False
Check3.Value = 0

al.BackColor = &H80000000
al.Enabled = False
bl.BackColor = &H80000000
```

```
bl.Enabled = False
tl.BackColor = &H80000000
tl.Enabled = False
Select Case Index
Case 0
Check1.Enabled = True
Esca.BackColor = &H80000005
Esca.Enabled = True
Esct.BackColor = &H80000005
Esct.Enabled = True
Case 1
af.BackColor = &H80000005
af.Enabled = True
bf.BackColor = &H80000005
bf.Enabled = True
cf.BackColor = &H80000005
cf.Enabled = True
df.BackColor = &H80000005
df.Enabled = True
tf.BackColor = &H80000005
tf.Enabled = True
Check2.Enabled = True
Check2.Value = 1
Check3.Enabled = True
Check3.Value = 1
Case 2
al.BackColor = &H80000005
al.Enabled = True
bl.BackColor = &H80000005
bl.Enabled = True
tl.BackColor = &H80000005
tl.Enabled = True
End Select
End Sub
Private Sub Check1_Click()
```

```
If Check1.Value = 0 Then
    dtop.BackColor = &H80000000
    dtop.Enabled = False
Else
    dtop.BackColor = &H80000005
    dtop.Enabled = True
End If
End Sub
Private Sub Check2_Click()
    If Check2.Value = 0 Then
        af.BackColor = &H80000000
        af.Enabled = False
        cf.BackColor = &H80000000
        cf.Enabled = False
    Else
        af.BackColor = &H80000005
        af.Enabled = True
        cf.BackColor = &H80000005
        cf.Enabled = True
    End If
End Sub
Private Sub Check3_Click()
    If Check3.Value = 0 Then
        bf.BackColor = &H80000000
        bf.Enabled = False
        df.BackColor = &H80000000
        df.Enabled = False
    Else
        bf.BackColor = &H80000005
        bf.Enabled = True
        df.BackColor = &H80000005
        df.Enabled = True
    End If
End Sub
Private Sub Salir_Click()
```

```
End
End Sub
Private Sub grafico__Paint()
grafico.AutoRedraw = True
grafico.DrawWidth = 1
End Sub
Function redondear(a, b As Integer)
Dim c
c = a * 10 ^ b
c = Fix(c)
redondear = c / 10 ^ b
End Function
```