

TABLA DE CONTENIDO

Resumen.....	i
Agradecimientos.....	ii
Tabla de Contenidos.....	iii
Índice de Tablas	viii
Índice de figuras	x
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivos generales	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Metodología	2
1.3.1 Estudio del fenómeno	2
1.3.2 Proponer Probetas Adecuadas.....	2
1.3.3 Señales a considerar.....	3
1.3.4 Construcción, instrumentación y ejecución	3
1.3.5 Estudio de los datos	3
1.4 Organización del Informe.....	4
1.4.1 Capítulo 1: Introducción	4
1.4.2 Capítulo 2: Marco Teórico y Revisión Bibliográfica.....	4
1.4.3 Capítulo 3: Probetas Propuestas.....	4
1.4.4 Capítulo 4: Construcción, Montaje y Ensayo	4
1.4.5 Capítulo 5: Resultados Experimentales.....	4
1.4.6 Capítulo 7: Conclusiones	4
1.5 Notación.....	5
CAPÍTULO 2. Marco Teórico y Revisión Bibliográfica.....	9
2.1 Descripción	9
2.1.1 Definición del fenómeno.....	9
2.1.2 Consideraciones en la Definición	10
2.2 Parámetros que Influyen	11
2.2.1 Periodo fundamental	11
2.2.2 Ductilidad	12
2.2.3 Capacidad al momento.....	13
2.2.4 Modos relevantes.....	14
2.2.5 Forzante basal.....	15
2.2.6 Acople con elementos horizontales.....	15
2.2.7 Aberturas en la altura de los muros	17
2.3 Estudios Experimentales Dinámicos	17
2.3.1 Descripción general de los ensayos y de resultados	18

2.3.2	Consideraciones en el diseño y montaje de las probetas	19
2.3.3	Forzantes para ensayos	21
2.3.4	Periodos, amortiguamiento e inercia efectiva.....	21
2.3.5	Participación de modos superiores en la respuesta.....	23
2.3.6	Amplificación lograda	26
2.4	Conclusiones.....	28
CAPÍTULO 3.	Probetas Propuestas.....	30
3.1	Prototipo (de-escalado) Representado.....	30
3.1.1	Consideraciones de diseño.....	30
3.1.2	Descripción del prototipo	31
3.1.3	Características del Prototipo.....	33
3.2	Restricciones y Objetivos del Estudio	33
3.2.1	Resumen descriptivo.....	33
3.2.2	Equipamiento disponible	34
3.2.3	Dimensiones del muro y los materiales, escalamiento	35
3.3	Teoría de Escalas	35
3.4	Forzante Basal	36
3.5	Parametrización de Propuestas de Muros	39
3.6	Características Finales de los Muros.....	41
3.6.1	Características nominales de los materiales.....	41
3.6.2	Descripción de probetas: Generalidades	41
3.6.3	Descripción de probetas: Refuerzo	42
3.6.4	Resumen de propiedades descriptivas.....	44
3.6.5	Características Estructurales de los muros	45
3.6.6	Estructura de soporte lateral.....	47
3.7	Comparación de prototipo y probetas (modelo).....	49
CAPÍTULO 4.	Construcción, Montaje y Ensayo	51
4.1	Construcción.....	51
4.1.1	Materiales.....	51
4.1.2	Acero de refuerzo	52
4.1.3	Hormigón	55
4.2	Montaje.....	57
4.3	Instrumentación	58
4.4	Ensayos y Modos de Falla.....	59
4.4.1	Generalidades	59
4.4.2	Comportamiento probeta M1	59
4.4.3	Comportamiento probeta M2.....	61
4.4.4	Comportamiento probeta M3.....	62
4.4.5	Comportamiento probeta M4.....	63

4.4.6	Comportamiento probeta M5.....	64
4.4.7	Estado final de probetas	65
CAPÍTULO 5. Resultados Experimentales.....		67
5.1	Consideraciones de los Resultados	67
5.1.1	Consideraciones generales	67
5.1.2	Desplazamiento absoluto y relativo (x_i y Δ_i).....	67
5.1.3	Fuerzas Inerciales (V_b y M_b)	67
5.1.4	Intensidad de Arias (I_a)	68
5.1.5	Fourier por nivel / Fourier basal	68
5.1.6	Energía en base a Transformada de Fourier	69
5.1.7	Desplazamiento de techo (Δ_{max} y Δ_y) y ductilidad μ	69
5.1.8	Deformación (ϵ) y curvatura (ϕ)	69
5.1.9	Profundidad línea neutra (c).....	70
5.2	Forzante Efectiva	70
5.2.1	Resumen de forzantes aplicadas.....	70
5.2.2	Registro de baja amplitud: C010	71
5.2.3	Registros basados en Constitución 2010	72
5.2.4	Registros Lollole 1985	73
5.2.5	Comparación general de forzantes y efectividad de la mesa	74
5.3	Análisis en el Espacio de la Frecuencia: Periodos de Vibrar, Energía Modal y EI Efectivo	76
5.3.1	Periodo aparente medido durante los ensayos.....	76
5.3.2	Energía Modal	77
5.3.3	Criterios de reducción de rigidez.....	79
5.3.4	Producto Elasticidad por Inercia Efectivo	81
5.4	Respuesta del Desplazamiento y Deformación.....	82
5.4.1	Desplazamiento de techo y ductilidad	82
5.4.2	Deformación, curvatura y profundidad del eje neutro	84
5.5	Momento a Flexión.....	86
5.5.1	Momento basal máximo.....	86
5.5.2	Envolvente de momento.....	88
5.5.3	Comportamiento Histerético.....	88
5.6	Corte.....	89
5.6.1	Corte basal máximo.....	89
5.6.2	Altura de resultante de fuerzas horizontales.....	90
5.6.3	Caracterización del corte basal máximo.....	91
5.6.4	Envolvente de Corte	93
5.6.5	Comportamiento Histerético.....	93
5.7	Validación del Modelo con C010	93

5.8	Amplificación del Corte	94
5.8.1	Criterios de amplificación	94
5.8.2	Resultados de amplificación.....	96
5.8.3	Correlación de la amplificación del corte con otros parámetros	99
5.8.4	Comparación con literatura	100
5.8.5	Ajuste con valores de I_a	105
5.9	Modelo No Lineal	106
5.9.1	Parámetros del modelo THNL.....	106
5.9.2	Resultados del modelo THNL	109
CAPÍTULO 6.	Conclusiones	111
CAPÍTULO 7.	Bibliografía	114
Anexo A	Matriz de Rigidez Ensamblada	1
A.1	Matriz de Rigidez Flexural Muro en Voladizo	1
A.2	Matriz de Rigidez Flexural Muro en Voladizo con Resorte Rotacional en la Base.....	3
A.3	Parámetros Definidos para Matrices del Modelo Lineal	4
Anexo B	Escalamiento	8
Anexo C	Descripción y Ensayo de Materiales	11
C.1	Hormigón PRESEC® C-15.....	11
C.2	SuperPlastificante Viscocrete® 5100 cl.....	13
C.3	Barras Lisas Acero A440-280H	15
C.4	Barras Entalladas AT56-50H	15
C.5	Ensayos de Cilindros de Hormigón.....	16
C.6	Cilindros de Hormigón con Barras Desadheridas	18
C.7	Ensayo de Barras de Acero AT56-50H.....	19
Anexo D	Características de la Probeta Base	20
D.1	Propiedades Nominales.....	20
D.2	Propiedades Reales.....	26
Anexo E	Diseño del Prototipo	30
Anexo F	Fotografías.....	37
F.1	Construcción.....	37
F.2	Montaje Previo Ensayo.....	42
Anexo G	Gráficos de Resultados Experimentales	47
G.1	Análisis de Fourier: Aceleración por Nivel / Aceleración Basal	47
G.2	Análisis de Fourier: Energía en base a la Aceleración por Nivel	49
G.3	Envolvente de Desplazamiento Relativo.....	50
G.4	Desplazamiento de Techo vs Curvatura Basal	51
G.5	Histéresis Momento Basal vs. Desplazamiento de Techo	53
G.6	Envolvente de Momento en la Altura.....	55

G.7	Perfil de Aceleraciones para el Momento Máximo	56
G.8	Momento Basal vs Deformación Unitaria Basal	57
G.9	Histéresis Corte Basal vs. Desplazamiento de Techo	58
G.10	Envolvente de Corte en la Altura.....	60
G.11	Perfil de Aceleraciones para el Corte Máximo	61
G.12	Altura de Resultante de Fuerzas	62
G.13	Amplificación del Corte vs Intensidad de Arias.....	63
G.14	Amplificación del Corte vs. Periodo Fundamental	64
G.15	Amplificación del Corte vs Desplazamiento de Techo	65
Anexo H	Estado de la Base de Probetas Durante Ensayo	66
H.1	M1.....	66
H.2	Probeta M2	67
H.3	Probeta M3	69
H.4	Probeta M4	71
7.1.1	Probeta M5	73
Anexo I	Regresión Modal	75
Anexo J	Planos de las Probetas.....	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Configuraciones dimensionales de ensayos a gran escala.	19
Tabla 2-2: Características de las estructuras para modelarlas.	21
Tabla 2-3: Periodos e Inercia Efectiva CAMUS-1, ruido blanco y periodo aparente durante ensayo.	22
Tabla 2-4: Periodos e Inercia Efectiva CAMUS-3.	22
Tabla 2-5: Periodos e Inercia Efectiva Panagiotou.	23
Tabla 2-6: Periodos e Inercia Efectiva Ghorbanirenani.	23
Tabla 2-7: Amplificación del corte, y momento y corte máximos de los ensayos en CAMUS-1.....	26
Tabla 2-8: Amplificación del corte, y momento y corte máximos de los ensayos en CAMUS-3.....	26
Tabla 2-9: Amplificación del corte, y momento y corte máximos de los ensayos de Panagiotou.....	27
Tabla 2-10: Factores de amplificación dinámica según diferentes criterios.	27
Tabla 2-11: Amplificación del corte, y momento y corte máximos de los ensayos de Ghorbanirenani.	28
Tabla 3-1: Características generales del muro base.	34
Tabla 3-2: Factores de amplificación de las leyes de Cauchy y Froude (Carvalho, 1998).	36
Tabla 3-3: Características de las señales a utilizar.	38
Tabla 3-4: Descripción dimensional de los Muros.....	44
Tabla 3-5: Razones adimensionales descriptivas para los Muros.....	44
Tabla 3-6: Configuraciones Distintivas de cada Muro.	45
Tabla 3-7: Capacidad al Corte de las Probetas.....	45
Tabla 3-8: Parámetros Característicos de los Muros.	47
Tabla 3-9: Frecuencias y Periodos de Vibrar de las Probetas Considerando la Sección Bruta y Reducida.....	47
Tabla 3-10: Comparación de Parámetros del Prototipo y la Probeta (Modelo).	50
Tabla 4-1: Valor de f_c para los Cilindros Ensayados.	51
Tabla 4-2: Propiedades de barras ensayadas Ø6 A440-280H.....	51
Tabla 4-3: Propiedades de barras ensayadas Ø4 AT56-50H.....	51
Tabla 4-4: Fechas de Ensayo y Último Registro Aplicado a Cada Muro.....	59
Tabla 4-5: Fechas de Ensayo y Modo de Falla de las Probetas.....	65
Tabla 5-1: I_a y PGA Efectivo Aplicado en los Ensayos.	70
Tabla 5-2: Frecuencias y Periodos Aparentes Durante Ensayo.	77
Tabla 5-3: Frecuencias límites para la Integración de Energía.	78
Tabla 5-4: Energía Total y de cada Modo de cada Ensayo.	79
Tabla 5-5: Periodos Medidos durante Ensayo y E_I efectivo Correspondiente.	81
Tabla 5-6: Desplazamiento Relativo de Techo Máximo, de Fluencia y Ductilidad..	83
Tabla 5-7: Curvatura, Deformación y Largo de Compresión Característicos de los Ensayos.	85
Tabla 5-8: Momento Basal Máximo y Parámetros Relevantes, y Promedio de Máximos de cada Ensayo.	87
Tabla 5-9: Corte Basal Máximo y Parámetros Relevantes, y Promedio de Máximos de cada Ensayo.	89
Tabla 5-10: Participación de Modos y Reducción Respecto a Respuesta Lineal para Instante de Corte Basal Máximo.....	92
Tabla 5-11: Comparación de Resultados Experimentales y Teóricos para C010 ...	93
Tabla 5-12: Resumen Consideraciones para Definir Criterio de Amplificación.	95

Tabla 5-13: Resultados de Amplificación Dinámica del Corte Basal.	98
Tabla 5-14: Amplificación Experimental y de la Literatura.	102
Tabla 5-15: Parámetros Aplicados en el Cálculo de Amplificación en formulación de Eibl y Keintzel.	104
Tabla 5-16: Parámetros Aplicados en el Cálculo de Amplificación en formulación de Priestley.	105
Tabla 5-17: Comparación de la respuesta experimental y del modelo NL para el corte y Δ_{techo} a distintos amortiguamientos.	108
Tabla 5-18: Comparación de la Respuesta Experimental y del modelo NL del Corte y Momento Basales, y Desplazamiento de Techo.	110
Tabla 7-1: Parámetros para Modelo Lineal.	4
Tabla 7-2: Frecuencias de Vibrar Obtenidas por Matriz Ensamblada y MIDAS.	5

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Respuesta de los dos primeros modos en muros en voladizo.....	9
Figura 2-2: Amplificación del corte basal en función de la ductilidad rotacional (Derecho, et al., 1981).....	12
Figura 2-3: Espectro de Aceleraciones del Código Alemán DIN 4149 (Eibl y Keintzel, 1988)	14
Figura 2-4: Análisis de Fourier de alas respuestas tiempo-historia(Ghorbanirenani, et al., 2012).....	15
Figura 2-5: Corte por nivel normalizado en marcos estándares de cinco pisos (Chopra, 1995)	16
Figura 2-6: Modelos a gran escala ensayados dinámicamente, (a) CAMUS-1 en Centre d' Etudes de Saclay Francia (Combescure & Sollogoub, 2004), (b) CAMUS-3 en Centre d' Etudes de Saclay Francia (Combescure & Chaudat, 2002), (c) NEES en UC San Diego USA (Panagiotou, et al., 2011), y (d) Ecole Polytechnique of Montreal Canadá (Ghorbanirenani, et al., 2012).....	17
Figura 2-7: Dimensiones y detallamiento de armadura (Ghorbanirenani, et al., 2012).....	19
Figura 2-8: Esquema de montaje del muro en voladizo (Ghorbanirenani, et al., 2012).....	20
Figura 2-9: Aceleración en la altura para instantes característicos (Panagiotou, et al., 2011).....	24
Figura 2-10: Altura normalizada efectiva de fuerzas laterales en función del corte, para $M_b \geq 0.9 M_{b, max}$ (Panagiotou, et al., 2011).....	24
Figura 2-11: Muro W2 sometido al 100% EQ: (a) Análisis de Fourier de la respuesta tiempo historia; (b) histéresis del momento y corte basales en función del desplazamiento de tech0 (Ghorbanirenani, et al., 2012).....	25
Figura 2-12: Perfil de aceleración por pisos en muros W1 y W2 sometidos al 100% EQ en los instantes de (a) corte máximo y momento máximo (Ghorbanirenani, et al., 2012).....	25
Figura 3-1: Factor de reducción efectivo R^{**} para 115 edificios chilenos en Zona 3, Suelo II (Lagos et al. 2012).....	31
Figura 3-2: Dimensiones y Refuerzo del Prototipo, Vista Frontal y Sección (dimensiones en [cm]).....	32
Figura 3-3: Diagrama de Interacción y Momento-Curvatura para el Prototipo en el Eje Principal.	33
Figura 3-4: Esquema de dimensiones de la mesa vibradora.....	34
Figura 3-5: PS_a (a) y S_d (b) de registro sintético C100, Constitución 2010 escalado en tiempo, input L100 y Llolleo 1985 sin escalar.....	37
Figura 3-6: Aceleración TH : (a) registro C100 y Constitución 2010 escalado en tiempo, y (b) input L100 y Llolleo 1985 sin escala.....	37
Figura 3-7: Espectro tri-partito para Llolleo 1985 y sintético de Constitución 2010.	38
Figura 3-8: Frecuencias de vibrar del muro en función de f_c (a), EI efectivo (b), n pisos (c), m_{total} (d), h_w (e), l_w (f) y e_w (g).....	40
Figura 3-9: Elevación y Cortes de Sección de las Probetas (dimensiones [mm])..	42
Figura 3-10: Elevación y Cortes de Sección de refuerzo de las Probetas (dimensiones [mm]).....	43
Figura 3-11: Detalle de Estribos de Confinamiento y Armadura de Corte (dimensiones exteriores [mm]).....	44
Figura 3-12: Diagrama de Interacción y Momento-Curvatura Nominal	46

Figura 3-13: Estructura de Soporte Lateral e Interacción con el Muro (dimensiones en [mm]).....	48
Figura 3-14: Modelo Estructura de Soporte Lateral (a) sólo perfiles y cargas, y (b) con cables trabajando a tracción.....	49
Figura 4-1: Ensayos a tracción de 3 barras $\varnothing 6$ lisas de acero A440-280H (MU: deformación según medida de máquina universal).	52
Figura 4-2: Armado de Refuerzo en M2.....	53
Figura 4-3: Instalación de Armadura Longitudinal en la Fundación.....	54
Figura 4-4: Disposición de Armadura Longitudinal en M5.	54
Figura 4-5: Estribo para el Confinamiento de Borde.	55
Figura 4-6: Hormigonado de M5	56
Figura 4-7: Fotografía de M1 Previo al Ensayo.....	57
Figura 4-8: Esquema General de la Instrumentación.	58
Figura 4-9: Estado de la probeta M1: Inicial (a); durante el ensayo L150 (b), estado final en la base (c) y altura (d).	60
Figura 4-10 : Estado de la probeta M2: Inicial (a); luego de L100 o final (b); y durante el ensayo L100 con Δ_{techo} Norte (g) y Sur (h).	61
Figura 4-11: Estado de la probeta M3: Inicial (a); luego de aplicar las forzantes C200 (b) y L100 (c); final (d); y durante el ensayo L150 con Δ_{techo} Sur (h) y Norte (i). ..	63
Figura 4-12: Estado de la probeta M4: Inicial (a); luego de aplicar L100 (b) y L150 o final (c); y durante el ensayo L150 (d).	64
Figura 4-13: Estado de la probeta M5: Inicial (a); luego de aplicar C150 (d) y C200 o final (e); y durante el ensayo C200 (f).....	65
Figura 4-14: Estado Final de las Probetas tras ser Ensayadas.....	66
Figura 5-1: Análisis de Fourier de la aceleración de cada nivel para M1C200: (a) calculada directamente, (b) dividido por el Fourier de la base, y (c) suavizado 30 veces.	68
Figura 5-2: Intensidad de Arias (a) y PGA (b) Efectivos Aplicados en los Ensayos.	71
Figura 5-3: PSa de C010 Efectivo Aplicado.....	71
Figura 5-4: PSa (a) y Sd (b) efectivo Aplicado de C100 a C200. *: Escalado y Comparable con C100.....	72
Figura 5-5: Sd Efectivo Aplicado de C100 a C200. *: Escalado y Comparable con C100.	72
Figura 5-6: PSa Efectivo Aplicado de L100 y L150. *: Escalado y Comparable con C100.	73
Figura 5-7: Sd Efectivo Aplicado de L100 y L150. *: Escalado y Comparable con C100.	73
Figura 5-8: Espectro tri-partito de las Forzantes Aplicadas.	74
Figura 5-9: PSa de las Forzantes Aplicadas. *: Escalado y Comparable con C100. ..	74
Figura 5-10: Sd de las Forzantes Aplicadas. *: Escalado y Comparable con C100. ..	75
Figura 5-11: Periodo del 1° (a) y 2° (b) Modo Aparente Durante Ensayo.	76
Figura 5-12: Porcentaje de Energía del 1° (a) y 2° (b) Modo obtenida en los Ensayos.	78
Figura 5-13: Comparación del 2° modo en M1 de Distintos Criterios de Reducción de Inercia (a) y Valores de Reducción de Inercia para cada Caso (b).	80
Figura 5-14: Reducción de la Inercia Bruta de cada Muro en los Ensayos considerando T1 (a) y T2 (b).	82
Figura 5-15: Desplazamiento máximo de techo medido en los ensayos.	84
Figura 5-16: T1 en función de Δ_{max} para los Ensayos.	84
Figura 5-17: Momento Máximo (a) y : Promedio de los 10 máximos (b) Medido Durante Ensayos.....	86

Figura 5-18: Promedio de Envolventes de Momento en la Altura de los Ensayos.	88
Figura 5-19: Corte Máximo (a) y Promedio de los 10 máximos (b) Medido Durante Ensayos.	90
Figura 5-20: Altura de Resultante de Fuerzas Horizontales vs. Corte basal para M1 en el Entorno al Corte Máximo.....	91
Figura 5-21: Esquema de los primeros 3 modos de M1.....	92
Figura 5-22: Pseudo espectro de aceleraciones ($\beta=5\%$): (a) Escalado en tiempo NCh433 (Z3SC) y aplicado en la mesa para el ensayo M1C100; (b) varios registros chilenos y NCh433 (Z3SII), entre otras (Lagos, et al. 2012).	94
Figura 5-23: Amplificación del Corte según: (a) ME y máx., (b) ME y 10 máximos, (c) THL y máx., y (d) THL y 10 máximos.	97
Figura 5-24: Amplificación Dinámica del Corte basal: (a) componente lineal y (b) Amplificación inelástica total.....	97
Figura 5-25: Amplificación dinámica inelástica del Corte vs. Intensidad de Arias (a), Periodo fundamental aparente(b) y Desplazamiento máximo de techo (c) en los Ensayos.	99
Figura 5-26: Amplificación Teórica vs Experimental: (a) ωV y (b) ωV^*	103
Figura 5-27: Comparación entre el Ajuste de Amplificación de I_a y el valor experimental.	106
Figura 5-28: Características del Modelo MIDAS: Vista Frontal en Elevación (a), División de Fibras de Sección Transversal (b), y Definición de Histéresis para Materiales: Hormigón Confinado (c) y Acero Longitudinal (d).....	107
Figura 5-29: Desplazamiento de Techo en M1C100 medido experimentalmente y en MIDAS para distintos amortiguamientos, en filas $\xi_1= 0.005, 0.01, 0.02$ y 0.03 , columnas $\xi_2= 0.01, 0.02$ y 0.03	108
Figura 5-30: Resultados TH experimentales y del modelo NL de M1 en ensayos: C100 (a), C200 (b), L100 (c) y L150 (d).....	109
Figura 7-1: Esquema de los grados de libertad.	75