

UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Desplazamiento de fluencia de muros de hormigón armado y
su relación con el tipo de demanda.

Por:

Victoria Alejandra Rubina Lazo

Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de
la Ingeniería y Título de Ingeniero Civil.

Profesor Guía: Alejandro Morales Gómez

Abril, 2020

Dedicado a mis padres, hermana y abuelos
En memoria a mi abuelo paterno Victor de la Cruz Rubina Muñoz

AGRADECIMIENTOS

A mi profesor guía Alejandro Morales Gómez, por todo el conocimiento entregado durante todo este proceso, la paciencia, la motivación, el compromiso, la buena voluntad y por haber contribuido en gran parte de mi formación como Ingeniero Civil. También a Patricio Quintana por la buena disposición y por sus sugerencias y comentarios, ya que estos fueron muy útiles para complementar y mejorar este trabajo de título. Asimismo, a todos los profesores de la escuela de ingeniería civil, que han sido parte de mi formación como Ingeniero Civil.

A mis padres Marta Lazo Contreras y Victor Rubina Mondaca, por ser los pilares fundamentales a lo largo de mi vida, ya que siempre me han apoyado en todas las decisiones tomadas, me han amado incondicionalmente, me han aconsejado en cada mala decisión tomada, por sus retos, que han hecho que me convierta en mejor persona y por sobre todo la paciencia.

A mis abuelos maternos, quienes son mis segundos padres, ya que han estado conmigo en todo momento, me han cuidado, regalado, consentido, entre muchas otras cosas. Gracias por todo el cariño que me entregan día a día.

A mis abuelos paternos, por siempre apoyarnos como familia y por los gratos momentos y, a Renata Rubina por ser tan compañera y buena hermana.

A mis amigos N.R, C.C, C.S, F.N, D.G y L.G quienes fueron parte de este proceso, por el apoyo incondicional y los buenos momentos.

RESUMEN

El desplazamiento de fluencia es un parámetro relevante para diseñar muros de hormigón armado esbeltos en voladizo bajo la acción de solicitaciones sísmicas. Este parámetro permite definir si la respuesta sísmica esperada de un muro será elástica o inelástica. En el caso de la respuesta inelástica, el desplazamiento elástico es útil para estimar las demandas de ductilidad con el fin de diseñar elementos especiales de borde (refuerzo de confinamiento). En consecuencia, una estimación fiable de este parámetro es fundamental para poder suministrar la capacidad de desplazamiento adecuada a un muro de hormigón armado.

En los últimos años, varios autores han propuesto expresiones útiles para estimar el desplazamiento de fluencia en muros. Muchas de ellas basadas en modelos con inelasticidad concentrada, donde el comportamiento no lineal tiene lugar en la sección crítica de los muros (típicamente la base de los muros); en varios casos, se requirió una estimación de la longitud de la rótula plástica para concretar los análisis. En este tipo de modelos asume que el muro tiene un comportamiento elástico y que la rigidez es constante por encima de la sección crítica, esto podría no ser representativo del fenómeno, ya que la rigidez a flexión de un muro varía en la altura, dependiendo de la excitación sísmica y de su nivel de deformación. Por otra parte, estudios recientes han utilizado modelos de fibras unidireccionales, la principal ventaja de estos modelos es que permiten capturar directamente el comportamiento de los muros considerando la variación de rigidez en la sección de hormigón armado. En otras palabras, la longitud de la rótula plástica no es necesaria. Independientemente del modelo utilizado, la mayoría de los estudios realizan el análisis con diferentes patrones de carga lateral (por ejemplo, una carga triangular invertida o uniforme), asumiendo así la naturaleza de la demanda sísmica antes de llevar a cabo el análisis.

Teniendo en cuenta las ideas anteriores, en este trabajo se presentan los resultados obtenidos con análisis tiempo-historia no-lineal para un conjunto de muros de hormigón armados en voladizo. En los análisis se utilizan registros naturales y sintéticos con diferentes características (PGA, duración y contenido de frecuencias). Adicionalmente, se consideran muros con diferente relación de aspecto, altura, espesor y refuerzo longitudinal. Los muros fueron modelados con fibras unidireccionales. El desplazamiento de fluencia se registra para correlacionarlo con características propias del muro tales como relación de aspecto, cantidad de refuerzo, etc., y las características de los acelerogramas (intensidad, contenido de frecuencia, duración, etc). La discusión final se centra en la influencia del contenido de frecuencias de los registros sísmicos, los efectos de los modos superiores en el desplazamiento de fluencia y su variabilidad. Además, se proponen valores límites inferiores para estimar el desplazamiento de fluencia, recalcando que estos valores están directamente relacionados con las demandas sísmicas y destacando que los valores límites resultan conservadores para los registros analizados, pudiendo no ser adecuados para futuros eventos sísmicos.

ÍNDICE

CAPÍTULO I	11
1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. Objetivos.....	14
1.1.1. Objetivo principal	14
1.1.2. Objetivos específicos.....	14
1.2. Organización del documento	15
CAPÍTULO II.....	16
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1. Desplazamiento de fluencia	16
2.1.1. Curvatura de fluencia Φy	17
2.1.2. Constante de fluencia K	19
2.2. Estudios y ensayos experimentales	20
2.2.1. Paulay & Priestley [1] y Park & Paulay [16].....	20
2.2.2. Wallace & Mohele [17] y Paulay [4].....	20
2.2.3. Quintana Gallo [5]	21
2.2.4. Alfaro Montoya [6] y L Massone [18].....	23
2.2.5. Comentarios.....	24
CAPÍTULO III.....	26
3. ASPECTOS DE MODELACIÓN Y CASOS DE ESTUDIO.....	26
3.1. Programa SeismoStruct	26
3.1.1. Modelo de fibras	27
3.2. Modelación espécimen RW2 [13].....	28
3.3. Características de los muros estudiados.....	31
3.3.1. Dimensiones y cuantía de acero de los muros en estudio	31
3.3.2. Cargas y masas de los muros en estudio.....	32
3.3.3. Materiales	34
CAPÍTULO IV.....	37
4. ANÁLISIS TIEMPO HISTORIA NO LINEAL Y PRINCIPALES RESULTADOS.....	37
4.1. Análisis tiempo historia no lineal	37
4.1.1. Registros sintéticos.....	37
4.1.2. Registros naturales.....	41
4.1.3. Espectros de respuestas de los registros sísmicos.....	43
4.2. Estimación del desplazamiento de fluencia	45

4.2.1.	<i>Curvatura de fluencia</i>	45
4.2.2.	<i>Instante de tiempo donde se produce la curvatura de fluencia</i>	47
4.2.3.	<i>Desplazamiento de fluencia</i>	47
4.3.	<i>Principales resultados y análisis</i>	48
4.3.1.	<i>Desplazamiento de fluencia obtenido con registros sísmicos sintéticos</i>	48
4.3.2.	<i>Desplazamiento de fluencia con registros sísmicos naturales</i>	55
4.3.3.	<i>Influencia del contenido de frecuencias dominantes de la excitación en la estimación del desplazamiento de fluencia</i>	62
4.3.4.	<i>Recomendaciones para el valor de la constante del desplazamiento de fluencia</i>	78
CAPÍTULO V		80
5.	CONCLUSIONES, LIMITACIONES Y FUTUROS TRABAJOS	80
5.1.	<i>Conclusiones</i>	80
5.2.	<i>Limitaciones de los análisis y futuros trabajos</i>	81
6.	BIBLIOGRAFÍA	82
7.	ANEXOS	85
ANEXO A		85
A.1 DESPLAZAMIENTO DE FLUENCIA		85
A2 CURVAS DE HISTÉRESIS		89

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 3.1 Discretización de una sección transversal típica de hormigón armado [10].....</i>	26
<i>Figura 3.2. Elemento viga en el sistema de referencia local: subdivisión de la sección en fibras [10]</i>	27
<i>Figura 3.3. Fuerzas generalizadas y deformaciones en el elemento y nivel de la sección [10].....</i>	27
<i>Figura 3.4. Hipótesis de Bernoulli, secciones planas permanecen planas</i>	28
<i>Figura 3.5. Corte transversal del espécimen de hormigón armado [13].....</i>	28
<i>Figura 3.6. Vista lateral del espécimen [13].....</i>	29
<i>Figura 3.7. Historia de desplazamiento aplicada a la probeta [13].....</i>	29
<i>Figura 3.8. Curvas de esfuerzo vs deformación asociado a distintas curvas de comportamiento: (a) Curva Trilineal del hormigón, (b) Mander et al, (c) Chang y Mander y (d) Kappos.....</i>	30
<i>Figura 3.9. Sección tipo de muros de hormigón armado</i>	31
<i>Figura 3.10. Modelo de muros en voladizo con masa y carga concentrada por nivel.....</i>	32
<i>Figura 3.11. Períodos definidos para los muros en estudio de acuerdo con las ecuaciones (3-4) y (3-5) [X].</i>	34
<i>Figura 3.12. Modelo de Menegotto Pinto para el acero [24].....</i>	34
<i>Figura 3.13. Curva tri-lineal esfuerzo deformación del hormigón.</i>	35
<i>Figura4.1. Espectros de respuesta normativa chilena suelos B, C y D.....</i>	38
<i>Figura4.2. Esquema de generación de acelerograma sintético [10]</i>	39
<i>Figura 4.3. Registro sísmico sintético asociado al espectro elástico del suelo tipo B.....</i>	40
<i>Figura 4.4. Registro sísmico sintético asociado al espectro elástico del suelo tipo C.....</i>	40
<i>Figura 4.5. Registro sísmico sintético asociado al espectro elástico del suelo tipo D.....</i>	40
<i>Figura4.6. Registro sísmico natural estación de Talca, Terremoto del Maule 2010</i>	41
<i>Figura4.7. Registro sísmico natural estación de Maipú, Terremoto del Maule 2010.....</i>	42
<i>Figura4.8. Registro sísmico natural estación de Angol, Terremoto del Maule 2010.....</i>	42
<i>Figura4.9. Registro sísmico truncado ocurrido en Talca</i>	43
<i>Figura4.10. Registro sísmico truncado ocurrido en Maipú</i>	43
<i>Figura4.11. Registro sísmico truncado ocurrido en Angol.....</i>	43
<i>Figura 4.12. Espectros de la normativa chilena, espectros de los registros sísmicos sintéticos y espectros asociados al terremoto del Maule del 2010.</i>	44
<i>Figura4.13. Diagrama de flujo con la metodología para estimar el desplazamiento elástico.....</i>	45
<i>Figura 4.14. Rango de valores del parámetro k en la estimación de la curvatura de fluencia para muros de hormigón armado [36].....</i>	46
<i>Figura 4.15. Punto en el que se produce la fluencia en el diagrama de momento curvatura.....</i>	47
<i>Figura 4.16. Curvatura versus tiempo del muro A.....</i>	47
<i>Figura 4.17. Desplazamiento en el tiempo del borde superior del muro A.....</i>	48
<i>Figura 4.18. Desplazamiento de fluencia de muros versus períodos, registro sintético suelo tipo B.....</i>	50
<i>Figura 4.19. Desplazamiento de fluencia de muros versus períodos, obtenido con el registro sintético asociado al espectro del suelo tipo C.....</i>	51
<i>Figura 4.20. Desplazamiento de fluencia de muros vs períodos, sometidos a sismo sintético asociada al espectro elástico del suelo D.....</i>	51
<i>Figura 4.21. Constante K vs período, sometidos a sismo sintético asociada al espectro elástico del suelo B</i>	52
<i>Figura 4.22. Constante K vs período, sometidos a sismo sintético asociada al espectro elástico del suelo C</i>	53
<i>Figura 4.23. Constante K vs período, sometidos a sismo sintético asociada al espectro elástico del suelo D</i>	53
<i>Figura4.24. Desplazamiento de fluencia en función de los períodos, utilizando los registros sísmicos compatibles con el espectro de los suelos B, C y D.....</i>	54
<i>Figura 4.25. Constante de fluencia en función de los períodos, utilizando los registros sísmicos sintéticos compatibles con el espectro de los suelos B, C y D.....</i>	55
<i>Figura4.26 Desplazamiento de fluencia de muros vs períodos, sismo natural ocurrido en Talca-Suelo B.....</i>	57
<i>Figura 4.27 Desplazamiento de fluencia de muros vs períodos, sismo natural ocurrido en Maipú-Suelo C ..</i>	58

Figura 4.28. Desplazamiento de fluencia de muros vs períodos, sismo natural ocurrido en Angol-Suelo D..	58
Figura 4.29. Constante K vs período, registro sísmico natural asociado al suelo B.....	59
Figura 4.30. Constante K vs período, registro sísmico natural asociado al suelo C.....	59
Figura 4.31. Constante K vs período, registro sísmico natural asociado al suelo D.....	60
Figura 4.32. Desplazamiento de fluencia en función de los períodos, utilizando los registros sísmicos naturales asociados a los suelos B, C y D.....	60
Figura 4.33. Constante de fluencia en función de los períodos, utilizando los registros sísmicos naturales asociados a los suelos B, C y D.....	61
Figura 4.34. Amplitud de Fourier vs frecuencia, registro sísmico sintético suelo B.....	62
Figura 4.35. Amplitud de Fourier vs frecuencia, registro sísmico sintético suelo C.....	63
Figura 4.36. Amplitud de Fourier vs frecuencia, registro sísmico sintético suelo D.....	63
Figura 4.37- Desplazamiento de fluencia vs relación entre períodos, registro sísmico sintético suelo B.....	64
Figura 4.38- Desplazamiento de fluencia vs relación entre períodos, registro sísmico sintético suelo C.....	64
Figura 4.39- Desplazamiento de fluencia vs relación entre períodos, registro sísmico sintético suelo D.....	64
Figura 4.40. Constante K vs relación entre períodos, registro sísmico suelo B.....	65
Figura 4.41. Constante K vs relación entre períodos, registro sísmico suelo C.....	65
Figura 4.42. Constante K vs relación entre períodos, registro sísmico suelo D.....	65
Figura4.43. Amplitud de Fourier vs frecuencia, registro sísmico natural suelo B.....	66
Figura4.44. Amplitud de Fourier vs frecuencia, registro sísmico natural suelo C.....	66
Figura4.45. Amplitud de Fourier vs frecuencia, registro sísmico natural suelo D.....	67
Figura4.46. Desplazamiento de fluencia vs relación entre períodos, registro sísmico natural suelo B.....	67
Figura4.47. Desplazamiento de fluencia vs relación entre períodos, registro sísmico natural suelo C.....	68
Figura4.48. Desplazamiento de fluencia vs relación entre períodos, registro sísmico natural suelo D.....	68
Figura4.49. Constante del desplazamiento de fluencia vs relación entre períodos, sismo natural Talca-Suelo B.....	68
Figura4.50. Constante del desplazamiento de fluencia vs relación entre períodos, sismo natural Maipú-SueloC.....	69
Figura4.51. Constante del desplazamiento de fluencia vs relación entre períodos, sismo natural Angol-SueloD.....	69
Figura 4.52. Variación de la frecuencia en la duración del registro sísmico natural registrado en la estación de Talca.....	70
Figura4.53. (a)Frecuencias y (b) períodos dominantes en función de intervalos de tiempo.....	71
Figura4.54. Desplazamiento de fluencia vs relación entre períodos, asociados al registro sísmico de Talca.	71
Figura4.55. Constante de fluencia vs relación entre períodos asociados al registro natural de Talca.....	72
figura 4.56. (a)Frecuencias y (b) períodos dominantes en función de intervalos de tiempo.....	72
Figura4.57. Desplazamiento de fluencia en fluencia vs relación entre períodos, registro sísmico de Maipú.	73
Figura4.58. Constante de fluencia vs relación entre períodos, registro sísmico de Maipú.....	73
Figura 4.59. (a)Frecuencias y (b) períodos dominantes en función de intervalos de tiempo.....	74
Figura4.60. Desplazamiento de fluencia vs relación entre períodos, asociados al registro sísmico de Angol	74
Figura 4.61. Constante de fluencia vs relación entre períodos, asociados al registro sísmico de Angol.....	74
Figura4.62. Porcentajes de masas efectivas versus el período del primer modo de vibrar.....	75
Figura4.63. Porcentajes de las masas efectivas versus el período del segundo modo de vibrar.....	75
Figura 4.64. Diagramas de momento de muros para el instante donde ocurre la fluencia: (a) muro A (10 pisos); (b) muro E (15 pisos) ; (c)muro H (20 pisos) ; (d) muro L (25 pisos) (e) muro Ñ (30 pisos).....	76
Figura4.65. Frecuencias de vibración del primer y segundo modo de vibrar en el espectro de Fourier del registro sísmico de Talca.....	77
Figura 4.66. Altura resultante de la fuerza de corte en el momento que ocurre la fluencia en la base de los muros de hormigón armado.....	78
Figura 4.67- Valores limites recomendados para estimar la constante de fluencia (a) Valores obtenidos con registros sintéticos; (b) Valores obtenidos con registros naturales.....	79
Figura 7.1. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro A registro natural suelo B.....	85
Figura 7.2. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro A registro sintético suelo C.....	85

<i>Figura 7.3. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro A registro natural suelo D.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 7.4. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro E registro natural suelo B.</i>	<i>86</i>
<i>figura 7.5. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro E registro natural suelo C.</i>	<i>86</i>
<i>Figura 7.6. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro E registro sintético suelo D.</i>	<i>86</i>
<i>Figura 7.7. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro H registro sintético suelo B.</i>	<i>86</i>
<i>Figura 7.8. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro H registro natural suelo C.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 7.9. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro H registro natural suelo D.</i>	<i>87</i>
<i>Figura 7.10. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro L registro natural suelo B.</i>	<i>87</i>
<i>figura 7.11. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro L registro natural suelo C.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 7.12. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro L registro artificial suelo D.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 7.13. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro Ñ registro natural suelo B.</i>	<i>88</i>
<i>Figura 7.14. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro Ñ registro natural suelo C.</i>	<i>88</i>
<i>Figura 7.15. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro Ñ registro sintético suelo D.</i>	<i>88</i>
<i>Figura 7.16. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro A registro sísmico natural suelo B</i>	<i>89</i>
<i>Figura 7.17. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro A registro sísmico sintético suelo C</i>	<i>89</i>
<i>Figura 7.18. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro A registro sísmico natural suelo D</i>	<i>89</i>
<i>Figura 7.19. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro E registro sísmico natural suelo B</i>	<i>90</i>
<i>figura 7.20. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro E registro sísmico natural suelo C.</i>	<i>90</i>
<i>Figura 7.21. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro E registro sísmico sintético suelo D</i>	<i>90</i>
<i>Figura 7.22. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro H registro sísmico sintético suelo B</i>	<i>91</i>
<i>Figura 7.23. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro H registro sísmico natural suelo C</i>	<i>91</i>
<i>Figura 7.24. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro H registro sísmico natural suelo D</i>	<i>91</i>
<i>Figura 7.25. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro L registro sísmico natural suelo B</i>	<i>92</i>
<i>Figura 7.26. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro L registro sísmico natural suelo C</i>	<i>92</i>
<i>figura 7.27. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro L registro sísmico sintético suelo D</i>	<i>92</i>
<i>figura 7.28. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro Ñ registro sísmico natural suelo B.</i>	<i>93</i>
<i>Figura 7.29. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro Ñ registro sísmico natural suelo C</i>	<i>93</i>
<i>Figura 7.30. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro Ñ registro sísmico sintético suelo D</i>	<i>93</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 3.1- Propiedades geométricas de muros en estudio</i>	31
<i>Tabla 3.2 -Distribución de acero de muros</i>	32
<i>Tabla 3.3- Datos de las cargas</i>	33
<i>Tabla 3.4- Períodos naturales de vibración de los muros en estudio</i>	33
<i>Tabla 3.5- Propiedades del acero</i>	35
<i>Tabla 3-3.6: Propiedades del hormigón</i>	36
<i>Tabla 4.1- Clasificación sísmica del terreno de fundación</i>	37
<i>Tabla 4.2- Parámetros asociados al tipo de suelo</i>	38
<i>Tabla 4.3- Aceleraciones máximas de los registros sintéticos</i>	40
<i>Tabla 4.4.-Estaciones de monitoreo sísmico, terremoto del Maule, 2010</i>	41
<i>Tabla 4.5- Aceleraciones máximas registros naturales</i>	42
<i>Tabla 4.6- Curvaturas de fluencia de los muros en estudio</i>	46
<i>Tabla 4.7: Desplazamiento de fluencia y constante K de muros en estudio, sismo sintético suelo B.</i>	48
<i>Tabla 4.8: Desplazamiento de fluencia y constante K de muros en estudio, sismo sintético suelo C</i>	49
<i>Tabla 4.9- Desplazamiento de fluencia y constante K de muros en estudio, sismo sintético suelo D</i>	49
<i>Tabla 4.10- Desplazamiento de fluencia y constante K de muros en estudio, sismo natural suelo B</i>	56
<i>Tabla 4.11- Desplazamiento de fluencia y constante K de muros en estudio, sismo natural suelo C</i>	56
<i>Tabla 4.12- Desplazamiento de fluencia y constante K de muros en estudio, sismo natural suelo D</i>	57
<i>Tabla 4.13- Frecuencias y períodos asociados a la máxima amplitud del gráfico de contenido de frecuencias de la excitación sísmica sintético</i>	63
<i>Tabla 4.14- Frecuencia y período asociada a la máxima amplitud del gráfico de frecuencias de la excitación sísmica natural</i>	67
<i>Tabla 4.15- Variación de la frecuencia durante la duración del registro sísmico natural de Talca</i>	71
<i>Tabla 4.16- Variación de la frecuencia durante la duración del registro sísmico natural de Maipú</i>	72
<i>Tabla 4.17- Variación de la frecuencia durante la duración del registro sísmico natural de Angol</i>	73
<i>Tabla 4.18- Períodos y frecuencia del primer y segundo modo de vibración</i>	78

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

El número de construcciones con muros de hormigón armado, como lo son edificios de mediana y gran altura, han aumentado con el tiempo debido a que se utilizan en las obras más cotizadas del mercado inmobiliario. Su popularidad se debe a que constituyen el sistema resistente a acciones sísmicas, se encargan de aportar rigidez limitando la amplitud de las deformaciones laterales de la estructura. Además, los muros se caracterizan por su reducido espesor (comparado con el de columnas en sistemas de marcos, por ejemplo) y porque se pueden diseñar para grandes alturas sin perder la estabilidad [1]. Por último, con un diseño adecuado, otorgan ductilidad a la estructura con gran capacidad de deformación dentro del rango inelástico, lo que permite tener un mecanismo de falla dúctil frente a un sismo de gran intensidad, esto quiere decir que, aunque los muros podrían sufrir daños importantes durante un eventual sismo, seguirían soportando las cargas verticales. Cabe mencionar que todas estas cualidades se logran mediante un buen diseño, con un adecuado detallamiento de los elementos de borde, limitando la carga axial y las deformaciones unitarias en el hormigón. En la actualidad, en Chile, el Decreto Supremo N°60 (DS60) [2] restringe la deformación unitaria en la fibra más comprimida del hormigón confinado a un 0.8% ($\varepsilon_c < 0.008$), como se muestra implícitamente en las ecuaciones (1-1) y (1-2).

En relación a la capacidad de deformación, el DS60 establece que la sección crítica de muros esbeltos con relación de aspecto $H_w/L_w \geq 3$, deben presentar capacidad de curvatura, ϕ , mayor que la demanda de curvatura última ϕ_u , esto con el fin de que los muros presenten un comportamiento dúctil y una capacidad de deformación superior a la demanda δ_u .

Para determinar la curvatura última el DS60 requiere el uso de una de las siguientes expresiones:

$$\phi_u = \frac{2\delta_u}{H_T L_w} \leq \frac{0.008}{C} \quad (1-1)$$

$$\phi_u = \frac{(\delta_u - \delta_y)}{L_p \left(H_T - \frac{L_p}{2} \right)} + \phi_y \leq \frac{0.008}{C} \quad (1-2)$$

Donde L_w es el largo del muro, L_p es la longitud de rótula plástica, δ_u es el desplazamiento de techo de diseño según el decreto supremo N°61 (DS61) [3], δ_y es el máximo desplazamiento elástico de techo del muro, ϕ_y es la curvatura de fluencia en la sección crítica del muro, C es la profundidad del eje neutro, consistente con δ_u , y H_T es la distancia entre el último nivel significativo del edificio y la sección crítica del muro. Cabe mencionar que el DS60 exige estimar la curvatura última del muro considerando la máxima carga axial actuante en el muro consistente con δ_u y además que los valores de ϕ_y y δ_y estén justificados [2], no entregando expresiones para estos últimos.

Las principales diferencias de las ecuaciones (1-1) y (1-2) son las siguientes: la ecuación (1-1) asume que el muro presenta una rótula plástica en la base (o sección crítica), considera que rota como un cuerpo rígido respecto a este punto y desprecia el desplazamiento de fluencia. En cambio, la ecuación (1-2) incluye la deformación de fluencia en la estimación de la capacidad de deformación de los muros, previo a la rotación del muro en torno a la rótula plástica. Antecedentes adicionales y más discusión en torno a estas ideas puede hallarse

en [4], en donde la autora estima desplazamientos de fluencia para muros rectangulares de distintas características, que forman parte de un sistema estructural (edificio). En citado trabajo la modelación se realiza con elementos tipo viga de plasticidad concentrada, con diferentes consideraciones para modelar el comportamiento seccional (relación momento/curvatura) de los muros.

Si se considera la ecuación (1-2) en la estimación de la capacidad de deformación de los muros, se tendrá que el desplazamiento de fluencia es uno de los parámetros más importantes en el diseño sísmico de muros en voladizo; ya que, conceptualmente, de éste depende la longitud de confinamiento (elementos de borde) para lograr el desplazamiento impuesto por un determinado sismo. Varios autores han propuesto expresiones para determinar este parámetro: Paulay and Priestley [1], Paulay [5], Quintana Gallo [6], Alfaro Montoya [7], entre otros. Si bien estas relaciones son útiles y prácticas para estimar el desplazamiento de fluencia, en general se basan en análisis incrementales tipo “pushover” donde no se considera explícitamente el fenómeno dinámico que implica la respuesta de un edificio frente a un sismo. Una excepción se presenta en [6], donde se asocia el desplazamiento de fluencia a un factor de amplificación dinámica, este último, función del número de pisos del edificio. Respecto a este último punto, estudios recientes demuestran que el factor de amplificación dinámica promedio ω_v , con un nivel aceptable de dispersión, también es función del nivel de incursión no lineal de los muros analizados [8,9].

Adicionalmente, un supuesto usual para el cálculo de la capacidad de desplazamiento en muros es que la rigidez a flexión se mantiene constante en la altura. Está ampliamente documentado [1] que la rigidez flexural de elementos de hormigón armado es proporcional a su capacidad nominal o resistencia a flexión, por lo tanto, debido a que la resistencia del muro varía en la altura del mismo, la rigidez no es contante.

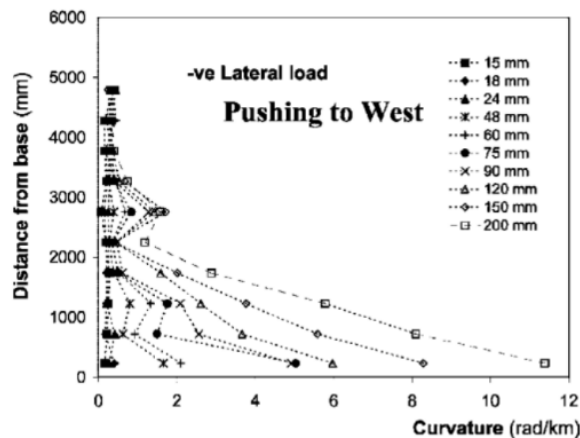


Figura 1.1. Relación altura de muro vs curvatura [10]

La Figura 1.1 muestra resultados experimentales obtenidos por Perry Adebar et al. [10]. En ella se aprecia que en los niveles superiores el muro tiene curvaturas considerablemente menores que en los niveles inferiores, esto está asociado directamente a la demanda de momento y su variación en la altura, el muro fue cargado lateralmente en su borde superior provocando un diagrama de momentos triangular, consistente con la distribución de curvatura mostrada. Resulta claro en la Figura 1.1 que la variación de la curvatura en la altura no es similar a un diagrama triangular de momento, se visualiza un marcado quiebre aproximadamente a media altura del muro. Este cambio abrupto se debe a que los niveles por sobre la mitad del muro no están agrietados. En cambio, en la mitad inferior del muro hay un nivel considerable de fisuración, incrementándose en puntos más cercanos a la base donde incluso hay incursión no-lineal.

En síntesis, asumir que la rigidez se mantiene constante con la altura y aplicar cargas monotónicas o estáticas a los muros, puede generar errores en la estimación del desplazamiento de fluencia y, eventualmente, sobreestimar lo que hará considerar una longitud de confinamiento menor, resultando un diseño no conservador, con refuerzo y longitud de confinamiento no adecuado.

Es por ello que, en este trabajo, mediante análisis no-lineales dinámicos realizados a muros en voladizo individuales [11,12], representativos de edificios con muros de hormigón armado, se estima el desplazamiento de fluencia y se proponen rangos para el mismo, complementando y mejorando las expresiones y recomendaciones existentes. Los resultados y análisis presentados consideran la naturaleza de la demanda sísmica y su relación con las características de los muros de hormigón armado, particularmente la variación de la rigidez en la altura, por medio de la implementación de un modelo de fibras unidireccionales en el programa SeismoStruct [13].

Se analiza una serie de muros con distintas dimensiones, cuantías de acero, relación de aspecto, entre otros. Para el análisis no-lineal se aplican excitaciones sísmicas en la base de los muros considerando tres registros sísmicos naturales obtenidos en suelos tipo B, C y D, clasificados según el Decreto supremo 61 (DS61) [3] y tres registros sintéticos obtenidos a partir de los espectros elásticos definidos en la norma NCh433 of 96 mod 2012 [14].

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo principal

Proponer un rango de valores que permita determinar el desplazamiento de fluencia de muros rectangulares esbeltos de hormigón armado en voladizo, considerando la naturaleza de la demanda sísmica. Es decir, evaluar el comportamiento de los muros frente a diferentes registros sísmicos, cada uno de ellos con distintas características tales como: amplitudes de aceleraciones, frecuencias dominantes, tipo de suelo donde se registró, entre otras variables relevantes que influyen en la respuesta dinámica.

1.1.2. Objetivos específicos

- Definir distintos casos de estudio y de esta forma hacer menos particulares los resultados.
- Modelar los casos de estudio con elementos de fibras unidireccionales.
- Realizar análisis no-lineal tiempo-historia con registros sintéticos compatibles con espectros de diseño chilenos.
- Realizar análisis no-lineal tiempo-historia con registros naturales del Terremoto del Maule (Chile, 2010).
- Analizar y discutir los diversos resultados, estimando (de ser posible) correlaciones entre los mismos.

1.2. Organización del documento

Capítulo II: Revisión bibliográfica

En esta sección se recopiló la bibliografía, con el fin de comprender y comparar modelos que estimen el desplazamiento de fluencia. Se presentan publicaciones encontradas en la literatura que estiman el desplazamiento elástico y se mencionan las principales consideraciones hechas para estimar este mismo. Se muestra un ejemplo simple que ilustra como la variación en los patrones de cargas influye en la respuesta y además se muestran ensayos experimentales que ilustran el cambio de la rigidez en la altura.

Capítulo III: Casos de estudio y aspectos de modelación

En este capítulo se presentan los muros rectangulares de hormigón armado y se realiza una breve descripción de los modelos de fibras [15] con sus respectivos materiales y propiedades. Además, se realiza una comparación entre las curvas de histéresis obtenidas del ensayo realizado a una probeta de un muro de hormigón armado [16] y los resultados de esta misma estructura modelada en SeismoStruct [13], con el fin de asegurar que se cuenta con resultados confiables y representativos de la realidad. En este capítulo también se presenta las consideraciones propuestas para los modelos.

Capítulo IV: Análisis tiempo-historia no lineal y principales resultados

En este capítulo se realiza un análisis tiempo-historia no-lineal, para estimar el desplazamiento de techo que produce la fluencia en la base (desplazamiento elástico definido de acuerdo con el DS60 [2]) de todos los muros en estudio, presentando la metodología utilizada para estimar este parámetro. Además, se presentan los resultados más relevantes del análisis y se determinan los parámetros más influyentes en la estimación del desplazamiento de fluencia. Adicionalmente, también se presenta una expresión con los valores límites obtenidos del análisis para estimar el desplazamiento elástico de los muros.

Capítulo V: Conclusiones, limitaciones y futuros trabajos

Finalmente, en base a los resultados obtenidos y a los análisis de resultados realizados en el capítulo IV se presentan las principales conclusiones del estudio y se realizan comentarios relevantes del trabajo. Asimismo, se mencionan las principales limitaciones de la investigación sugiriendo que sean consideradas en estudios futuros.

CAPÍTULO II

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se presenta la revisión bibliográfica considerada en este trabajo, con el fin de analizar, estudiar y comparar diversas modelos propuestas que estiman el desplazamiento de fluencia para muros de hormigón armado en voladizo, sus implicancias, supuestos y limitaciones.

2.1. Desplazamiento de fluencia

La capacidad de desplazamiento elástico δ_y , ha sido definida en la literatura de variadas formas. La más común considera δ_y como el desplazamiento asociado a la curvatura que se produce en la intersección de la recta que forma la rigidez inicial con la rigidez asociada a post fluencia (ϕ_y, M_n), tal como muestra la Figura 2.1. Una definición alternativa es considerar el desplazamiento asociado a la primera fluencia de la barra de refuerzo más traccionada (ϕ'_y, M_y), entre otros. En este trabajo, se consideró la primera definición.

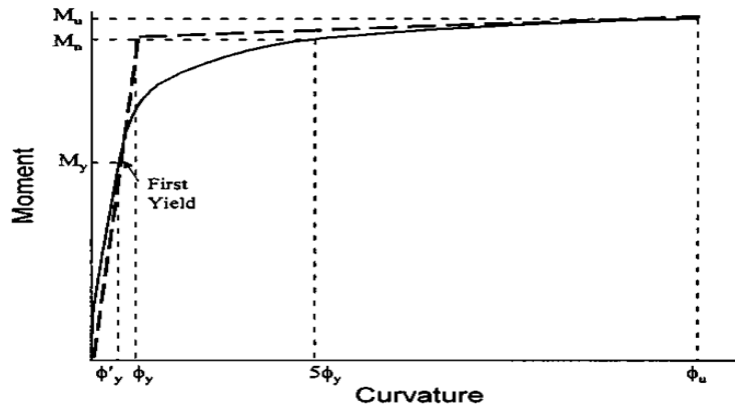


Figura 2.1. Curva bilineal de momento curvatura [17]

De manera general y considerando la Teoría de Resistencia de Materiales, la deformación elástica de un muro en voladizo se obtiene mediante la doble integración de la distribución de curvaturas a lo largo (entiéndase altura del muro) del mismo [18], con la expresión (2-1) definida por Mohr en los teoremas de área de momento:

$$\frac{d^2 \delta_d}{dx^2} = \frac{M(x)}{k} = \phi \quad (2 - 1)$$

Donde k es la rigidez del elemento y $M(x)$ es la distribución de momentos en la altura del muro y se calcula para cada distribución de carga, mediante equilibrio de fuerzas.

Este método considera sólo las deformaciones debidas a la flexión, por ende, desprecia la deformación debida al cortante, ya que estas últimas solo representan un pequeño porcentaje de la deformación para muros con grandes relaciones de aspecto. Cabe mencionar que, este procedimiento es apropiado para deflexiones elásticas y donde las deformaciones son muy pequeñas [18].

Luego, reescribiendo la ecuación (2-1):

$$\delta_y = \int \int \phi dx = \int \int \frac{M(x)}{k} dx \quad (2-2)$$

De esta manera, desde el diagrama bilineal de momento curvatura mostrado en la Figura 2.1, utilizando relaciones trigonométricas y el rango previo a la fluencia, se obtiene lo siguiente:

$$M = EI\phi \quad (2-3)$$

Donde $EI = k$ es igual a la rigidez del elemento.

De manera general, luego de considerar las ecuaciones (2-2) y (2-3), se obtiene que la capacidad de desplazamiento de muros en voladizo asociada a distintos patrones de carga puede escribirse como sigue:

$$\delta_y = K\phi_y h_w^2 \quad (2-4)$$

Donde h_w es la altura del muro sobre la sección crítica, ϕ_y es la curvatura asociada a la fluencia y K es la constante del desplazamiento de fluencia.

A continuación, se presentan las variables más importantes en la estimación del desplazamiento de fluencia (ϕ_y y K) con el fin de complementar la información expuesta con anterioridad.

2.1.1. Curvatura de fluencia ϕ_y

La curvatura de primera fluencia ϕ'_y es la curvatura que se produce cuando la primera barra de refuerzo más traccionada fluye. Paulay [5] propone estimar la curvatura de primera fluencia en base al perfil de deformación que se presenta en la Figura 2.2.

Desde el perfil de deformaciones y utilizando relaciones trigonométricas se obtiene lo siguiente:

$$\phi'_y = \frac{\epsilon_y}{d - C_y} = \frac{\epsilon_y}{\xi L_w} \quad (2-5)$$

Donde $\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s}$ es la deformación unitaria de fluencia del acero de refuerzo, C_y corresponde a la distancia del eje neutro asociado a la primera fluencia, L_w es el largo del muro y ξ es una constante que define la posición del eje neutro.

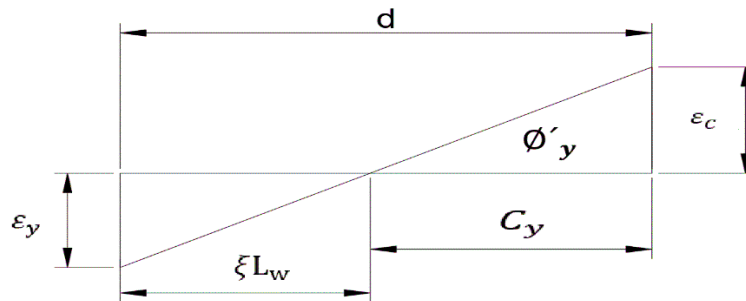


Figura 2.2. Perfil de deformaciones de un muro de hormigón armado

Luego, extrapolando el diagrama de momento curvatura mostrado en la Figura 2.1, la curvatura de fluencia puede escribirse como sigue:

$$\phi_y = \frac{M_n}{M_y} \phi'_y \quad (2 - 6)$$

Utilizando las ecuaciones (2-5) y (2-6) se obtiene lo siguiente:

$$\phi_y = \left(\frac{M_n}{M_y} \right) \frac{\varepsilon_y}{\xi L_w} \quad (2 - 7)$$

Desde la ecuación (2-7) Paulay incluye una constante η , y señala que esta constante depende del tipo de elemento considerado.

$$\left(\frac{M_n}{M_y \xi} \right) = \eta \quad (2 - 8)$$

Paulay [5] propone para muros rectangulares de hormigón armado $\eta=1.8$ si se utiliza un modelo bilineal en el diagrama de momento curvatura y $\eta=1.25$ si no se considera aproximación bilineal en el diagrama de momento (ambos valores son considerando cargas axiales menores a $0.12 f'_c A_g$). Esta diferencia se produce al asumir un comportamiento bilineal de curvatura, ya que no necesariamente la curvatura de fluencia coincidirá con la primera fluencia de la barra más traccionada de acero.

Reescribiendo la ecuación (2-7), se obtiene:

$$\phi_y = \eta \frac{\varepsilon_y}{L_w} \quad (2 - 9)$$

2.1.2. Constante de fluencia K

La constante del desplazamiento de fluencia es una variable que depende de la distribución de cargas, en otras palabras, de la demanda sísmica. En el ejemplo 1 se analiza el comportamiento de un muro frente a distintas exigencias sísmicas impuestas (patrones de carga) y se determina como la variación en la demanda influye en la estimación de la constante de fluencia y la capacidad de desplazamiento elástico de los muros.

Ejemplo 1: Variación del desplazamiento de fluencia en función de la distribución de cargas.

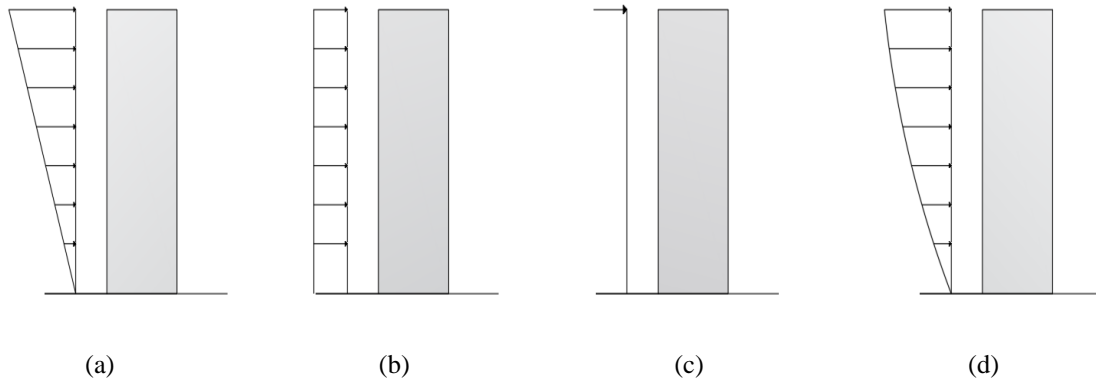


Figura 2.3. Distribuciones de carga; (a) Carga triangular invertida, (b) Carga rectangular, (c) Carga puntual, (d) Carga parabólica

Suponiendo las distribuciones de cargas mostradas en Figura 2.3 y utilizando las ecuaciones 2-2 y 2-3 para estimar el desplazamiento elástico, se obtuvieron los valores que se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Desplazamiento de fluencia versus caso de análisis

Caso de análisis	(a)	(b)	(c)	(d)
δ_y	$\frac{11}{40}\phi_y h_w^2$	$\frac{1}{4}\phi_y h_w^2$	$\frac{1}{3}\phi_y h_w^2$	$\frac{33}{125}\phi_y h_w^2$
K	0.275	0.250	0.333	0.264

Considerando que todos los muros presentan la misma geometría, se obtiene que el mayor desplazamiento se obtiene cuando el muro concentra toda la carga en un punto, por otro lado, la carga distribuida rectangular es la que presenta el menor desplazamiento. Se infiere que el patrón de carga es una variable importante en la estimación del desplazamiento de fluencia, ya que muros que tienen exactamente la misma geometría, presentan diferentes deformaciones elásticas ya que como se aprecia de la Tabla 2.2. Existen diferencias en la estimación de la constante K al alterar la distribución de cargas, por lo tanto, se concluye que la capacidad de desplazamiento de un muro de hormigón armado está directamente relacionada con la demanda sísmica, sus características y la relación de estas con la estructura.

2.2. Estudios y ensayos experimentales

Varios autores han propuesto expresiones para determinar el desplazamiento de fluencia δ_y : Paulay & Priestley [1], Paulay [5], Quintana Gallo [6], Alfaro Montoya [7], Park & Paulay [19], Wallace and Moehle [20], L. Massone y J. Alfaro [21], entre otros. Estos autores modelan el comportamiento de un muro mediante un elemento tipo viga en voladizo con deformaciones dominadas por flexión.

2.2.1. Paulay & Priestley [1] y Park & Paulay [19]

Paulay & Priestley [1] y Park & Paulay [19] estiman el desplazamiento de fluencia modelando el muro como un elemento tipo viga en voladizo, tal como se presenta en la Figura 2.4 (a). En la estimación de la capacidad de desplazamiento elástico consideran solo las deformaciones a flexión, supuesto válido para elementos esbeltos donde las deformaciones por cortante son despreciables. Además, utilizan una aproximación bilineal del momento curvatura, como la presentada en la Figura 2.1 y, por último, asumen que la rigidez es constante con la altura.

Los autores [1,19] proponen la siguiente expresión para estimar el desplazamiento elástico de muros esbeltos en voladizo:

$$\delta_y = \frac{1}{3} \phi_y l^2 \quad (2 - 10)$$

Donde $l = h_w$ es la altura del muro sobre la sección crítica.

Esta ecuación fue obtenida mediante las ecuaciones (2-2) y (2-3) a partir de una distribución de carga puntual, como la que se presenta en la Figura 2.4. Por lo tanto, los autores consideran que toda la carga lateral equivalente se concentra a nivel de techo.

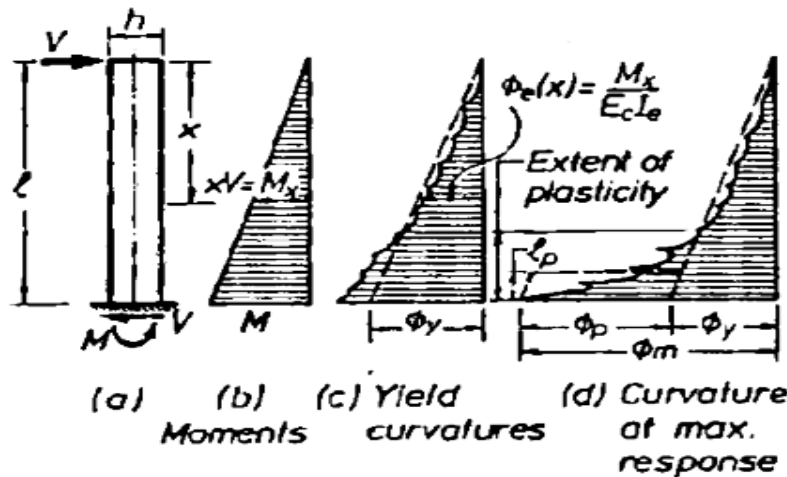


Figura 2.4. Relaciones de momento, curvatura y deformación para un muro de hormigón armado en voladizo [1]

2.2.2. Wallace & Mohele [20] y Paulay [5]

Wallace & Mohele [20] y Paulay [5] utilizaron las mismas hipótesis mencionados en la sección 2.2.1 y el mismo procedimiento para estimar el desplazamiento elástico de muros en voladizo. Sin embargo, consideraron una carga triangular invertida como distribución de carga, como se observa en la Figura 2.5. Esta distribución de carga busca imponer una forma representativa de la deformada del primer modo de vibración del muro.

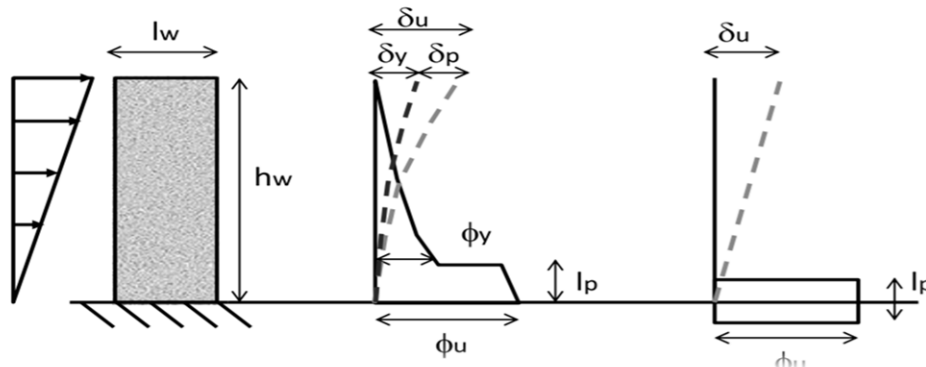


Figura 2.5. Modelo de rótula plástica del muro. (a) Componentes elásticas e inelásticas, (b) Modelo simplificado de rótula plástica [5]

Para estimar el desplazamiento elástico del muro en el borde superior [5,20] proponen la siguiente ecuación:

$$\delta_y = \frac{11}{40} \phi_y H_w^2 \quad (2 - 11)$$

La ecuación (2-11) es una de las más comunes utilizadas por diseñadores para evaluar el máximo desplazamiento elástico, ya que simula la participación modal del primer modo de vibración. Esta consideración puede ser válida para edificios bajos y rígidos (con períodos fundamentales pequeños), ya que estos generalmente responden con la deformada del primer modo [5]. Cabe mencionar que podría no ser adecuada cuando se consideran estructuras altas, ya que está ampliamente documentado que en estructuras flexibles la respuesta generalmente está dominada por la contribución modal de los modos superiores [1].

2.2.3. Quintana Gallo [6]

Quintana Gallo [6] sí considera en la estimación de la capacidad de deformación elástica del muro la acción sísmica, puesto que asocia el desplazamiento de fluencia a un factor de amplificación dinámico, este último, función del número de pisos del edificio.

El desplazamiento se estima modelando el muro como una viga en voladizo con rigidez constante en la altura y considerando que el muro está cargado lateralmente con una distribución de carga que incluye la participación de modos superiores de vibrar (ver Figura 2.6).

Primero se estima la capacidad de desplazamiento elástico, utilizando la altura de la fuerza resultante que se produce por una distribución de cargas que impone el primer modo de vibrar (carga triangular invertida, por ejemplo). Posteriormente, simulando una distribución de carga representativa de los modos superiores (Figura 2.6 (b)), introduce el factor de amplificación dinámico, concebido para diseño al corte por capacidad [Paulay y Priestley 1992]. Este factor es la razón entre la altura de la fuerza resultante impuesta por el primer modo y aquella de menor magnitud correspondiente a la deformada que incluye modos adicionales (ver Figura 2.6(b)) $\omega_v = h_v/h_1$, mayor que 1.0. Este factor se incluye con el fin de tener en cuenta la participación modal de los modos superiores en el cálculo del desplazamiento de fluencia, y se puede estimar según el procedimiento empleado en el diseño al corte por capacidad según la norma Neozelandesa de diseño en hormigón armado NZS3101 [22].

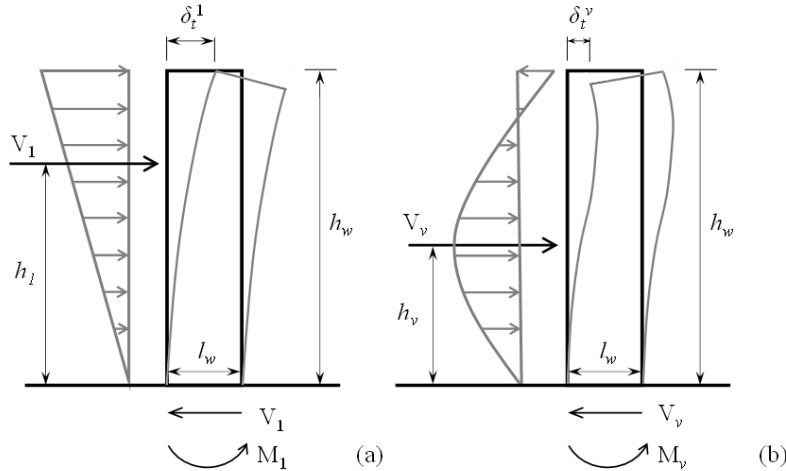


Figura 2.6. Carga lateral equivalente y su ubicación (a) Distribución de carga triangular invertida, primer modo de vibrar y (b) Distribución de carga de un modo superior y su deformada [6]

Al igual que los autores mencionados con anterioridad [6] considera ecuación (2-4) en la estimación del desplazamiento de fluencia y utilizando relaciones algebraicas el autor sugiere la ecuación (2-2) para estimar la constante de fluencia.

$$K = (\alpha/6\omega_v)(3 - \alpha/\omega_v) \quad (2 - 12)$$

Donde:

ω_v : factor de amplificación que depende del número de pisos (altura del edificio), según lo definido por Paulay y Priestley [1]; y α : razón entre la altura de la resultante de cargas laterales equivalentes y la altura del muro, tal que:

$$\alpha = \frac{h_1}{h_w} \quad (2 - 13)$$

La altura h_1 se puede timar como aquella que sea apropiada para representar una distribución de cargas laterales equivalentes, tal como $2/3h_w$ en el caso de una carga triangular invertida. Además, en [6] se propone que h_1 se obtenga, para fines de una implementación en un código de diseño, se podría calcular según (2-14).

$$h_1 = \frac{\sum_{k=1}^n h_{1,k} F_{1,k}}{\sum_{k=1}^n F_{1,k}} \quad (2 - 14)$$

Donde:

$F_{1,k}$ y $h_{1,k}$ son la magnitud y la altura de la fuerza resultante asociada a la distribución de carga k.

En resumen [6] determina una ecuación más conservadora que las mencionadas anteriormente, debido a que en su análisis con un ejemplo práctico comprueba que, para una misma demanda de desplazamiento la ecuación

propuesta genera mayores extensiones horizontales de los elementos de borde. Esto se debe a que mediante relaciones matemáticas demostró que el no considerar los efectos dinámicos, genera una sobre estimación del desplazamiento de fluencia. Esto implica un menor desplazamiento inelástico de techo requerido para lograr el mismo desplazamiento lateral de techo, en consecuencia, conceptualmente se definiría una menor extensión de los elementos de borde que los que realmente podrían ser necesarios. Es importante destacar que en el caso del DSN°60 el desplazamiento elástico, a pesar de ser considerado para estimar la curvatura requerida, no tiene influencia en la determinación de la longitud de confinamiento.

Respecto al factor de amplificación dinámica ω_v , estudios demuestran que también es función del nivel de incursión no lineal de los muros [8,9].

De acuerdo con [8] los factores más importantes para la amplificación dinámica por corte son: la incursión no lineal, el contenido de frecuencias, la contribución de los modos superiores y la intensidad del sismo; está última considerada como la relación entre las aceleraciones de los registros utilizados con respecto a las consideradas como referencia en el diseño [23].

Por otro lado, en [9] demostraron que ω_v aumenta con el número de pisos y con la intensidad de la demanda sísmica, además señalan que ω_v depende de la dirección en la que trabaja el muro. La direccionalidad de la demanda (o dirección en la que trabaja el muro) es también considerada explícitamente en [6], a través del factor η (ver ecuación 2-15) que toma distintos valores según en ala de los muros este traccionada o comprimida.

$$\frac{\delta_y}{H_w} = (\alpha/6\omega_v)(3 - \alpha/\omega_v)\eta\varepsilon_y A_r \quad (2 - 15)$$

Desde la ecuación (2-15), $A_r = H_w/L_w$ se define como la relación de aspecto del muro.

2.2.4. Alfaro Montoya [7] y L Massone [21]

En estos estudios los autores señalaron que considerar la rigidez constante en la altura conlleva a errores en la estimación del desplazamiento. Por esta razón, ellos modelaron el comportamiento del muro considerando el agrietamiento en la altura, mediante un modelo numérico de fibras no-lineales unidireccionales implementado en el programa Opensees [24]; con estos modelos ellos plasmaron el cambio de rigidez flexural en la altura y, al igual que en los otros estudios, también desprecian las deformaciones generadas por el corte.

En este estudio los muros son cargados monótonicamente por una distribución de carga triangular invertida (ver Figura 2.5) considerando diferentes variables como: la carga axial y la cuantía de refuerzo de borde. Al igual que los demás autores, en [7] estiman el desplazamiento de fluencia utilizando las ecuaciones propuestas por Paulay [5] (ecuaciones 2-1 y 2-2). Donde K y η se obtienen de un estudio experimental realizado a muros rectangulares de hormigón armado [7].

A partir de los análisis determinan una expresión simplificada (2-16) para la estimación de la curvatura de fluencia, la cual está directamente relacionada con la carga axial. Sin embargo, en sus comentarios sugieren utilizar el valor de $\eta = 1.4$, de manera de considerar un valor conservador.

$$\phi_y = \left(1.31 + \frac{1.69P}{f'_c A_g} \right) \left(\frac{\varepsilon_y}{L_w} \right) = 1.4 \left(\frac{\varepsilon_y}{L_w} \right) \quad (2 - 16)$$

Donde P es la carga axial, f'_c es la resistencia a compresión del concreto y A_g es el área bruta de la sección transversal del muro.

Asimismo, determinan la expresión analítica (2-17) para determinar el desplazamiento de fluencia, que depende de la cuantía de refuerzo de borde ρ_{borde} . Al igual que en la estimación de la curvatura de fluencia, ellos de manera conservadora sugieren que el valor de la constante de fluencia sea $K = 0.22$ para cuantías de borde mayores al 5%.

$$\delta_y = (0.33\rho_{borde}^{0.14})\phi_y H_w^2 = 0.22\phi_y H_w^2 \quad (2 - 17)$$

En este estudio los autores demostraron que las variables que tienen mayor influencia en la estimación del desplazamiento de fluencia son la cuantía de acero del refuerzo de borde y la carga axial. También, señalaron que existe un aumento del 25% en el valor del coeficiente K cuando se asume rigidez constante a lo largo del muro. Esto se produce debido a que, en las ecuaciones planteadas por otros autores asumen curvaturas mayores que las que realmente ocurren, por lo tanto, consideran un desplazamiento elástico mayor.

2.2.5. Comentarios

Si bien las relaciones expuestas en este capítulo son útiles para estimar la capacidad de deformación elástica de un muro en voladizo, en general consideran cargas estáticas que simulan la deformada del primer modo de vibración, donde no se considera el fenómeno dinámico que implica la respuesta de un edificio frente a un sismo, una excepción se presenta en [6], debido a que incluye explícitamente este efecto mediante el factor de amplificación dinámica. Está ampliamente documentado que el modo fundamental es el que caracteriza el comportamiento casi total de los muros, ya que es el que necesita la menor energía para ocurrir, debido a que está asociado a la frecuencia más pequeña y es el modo que presenta el mayor porcentaje de participación modal. No obstante, algo importante de señalar es que las estructuras responden acorde con las condiciones impuestas por la demanda; por ejemplo, si la excitación sísmica posee una frecuencia de vibración cercana a la frecuencia del segundo modo, estas tenderán a responder con la deformada de este modo de vibración y por lo tanto, considerando que la distribución de cargas varía respecto de un sismo y otro, la respuesta no es la misma. Este cambio en el comportamiento de los muros se demostró en el ejemplo 1, donde por medio de distintos patrones de carga se simuló el cambio de la excitación, lo que mostró que el desplazamiento elástico del muro variaba, incluso considerando las mismas propiedades físicas. Por lo tanto, no se puede predecir el comportamiento del muro imponiendo una distribución triangular invertida que simula la contribución del primer modo, ya que este supuesto no está acorde a la realidad, debido a que las estructuras nunca responderán solo en el primer modo de vibrar (sino que es una combinación de todos los modos), debido a que el comportamiento del muro varía con el tiempo y depende del predominio de los modos de vibración y también del período de la propia estructura.

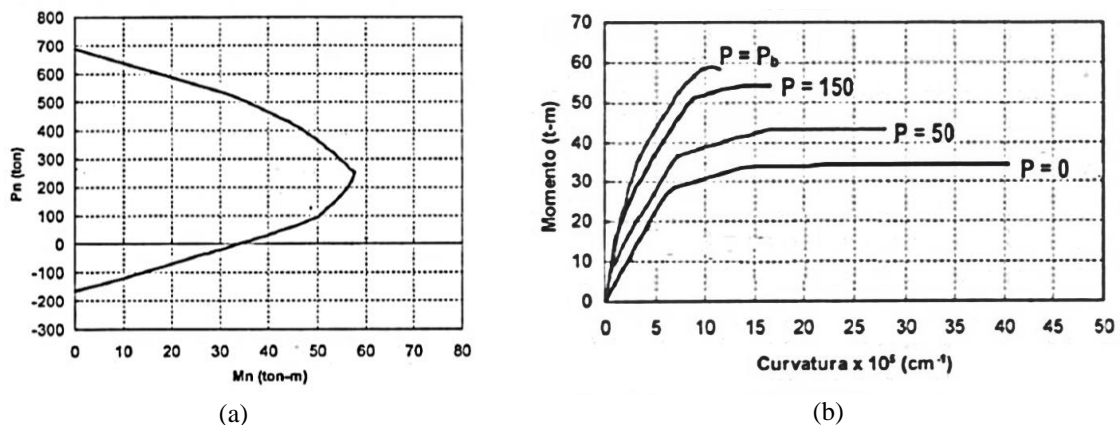


Figura2.7. (a) Diagrama de interacción muro, (b) Diagrama de momento curvatura muro [19].

Otro supuesto usual de los autores de las ecuaciones anteriores es que la rigidez con la altura se mantiene constante. Esta situación no ocurre así ya que, por ejemplo, si se considera el diagrama de interacción de un muro, a medida que la carga axial es mayor, el momento de flexión aumenta (ver Figura 2.7) incrementando la rigidez en flexión del muro. Cabe mencionar que esto ocurre si es que el muro fue diseñado para presentar una falla dúctil por flexión (comportamiento del muro bajo el punto de balance), ya que de lo contrario no se puede asumir lo descrito con anterioridad.

Desde la Figura 2.7 (b) se observa que la rigidez a flexión, post agrietamiento y previo a la fluencia, disminuye cuando el muro presenta una reducción en su carga axial. Asimismo, si se considera que la base del edificio la sección del muro esta agrietada, se obtendrá que en este punto del muro se tendrá menor rigidez en comparación a las secciones superiores del muro (ver Figura 1.1). Por lo tanto, se infiere que la rigidez cambia a lo alto de un muro de hormigón armado. Complementando esta idea, en la Figura 2.8 se presenta la típica distribución de curvaturas en la altura de un muro.

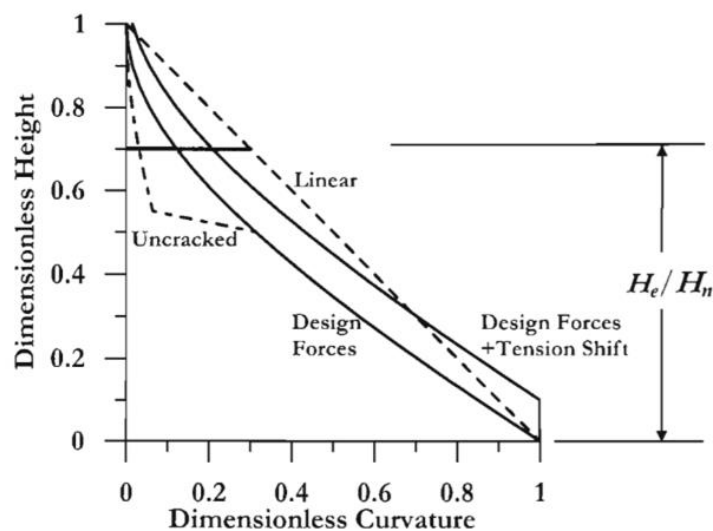


Figura 2.8. Altura vs curvatura del muro [23]

Como se observa en la Figura 2.8, la curvatura no es lineal y en la parte superior del muro (línea segmentada uncracked), la distribución de curvatura es mucho menor a la curvatura de la sección agrietada (base del muro). Esto se explica con la teoría de la elasticidad, donde se asume que la resistencia es proporcional a la rigidez, por lo tanto, la curvatura es proporcional a la demanda momento, y si se considera que la base de la sección se encuentra agrietada con una menor rigidez, se tendrá mayor curvatura.

En consecuencia, considerar que la rigidez se mantiene constante con la altura y asumir una distribución de cargas monotónicas o estáticas es un supuesto debatible ya que, como se expuso a lo largo de este capítulo, estas consideraciones podrían generar errores en la estimación de la capacidad de desplazamiento elástico de los muros, debido a que sobreestiman la capacidad de desplazamiento elástico de los mismos.

Para finalizar se recalca la importancia de tener en cuenta que la capacidad de desplazamiento elástico es una variable importante por considerar en el diseño y detalle de los elementos de bordes de muros esbeltos de hormigón armado, dentro del modelo de rótula plástica, actualmente descrito en el DS60. Debido a que, conceptualmente, una sobreestimación en este parámetro conllevará a un menor desplazamiento inelástico a nivel de techo requerido y en consecuencia una longitud de confinamiento menor, por lo tanto, un diseño no adecuado, puesto que no se suministrará el refuerzo de confinamiento necesario. Aunque, en el caso del DSN°60, no considera el desplazamiento elástico para la estimación de la longitud de confinamiento.

CAPÍTULO III

3. ASPECTOS DE MODELACIÓN Y CASOS EN ESTUDIO

En este capítulo se presenta el programa utilizado para desarrollar los análisis propuestos. Además, se realiza una breve descripción de modelos de fibras no-lineales unidireccionales utilizadas para modelar los muros, comentando sus ventajas y limitaciones.

Por otro lado, para comparar los resultados que entrega el programa SeismoStruct [13] con resultados experimentales, se realiza una simulación de un ensayo cuasiestático a un espécimen rectangular llevado a cabo por Thomsen y Wallace en el año 1995 [16]. Los resultados numéricos son comparados con los resultados experimentales reportados por los autores.

Por último, se presentan los muros en estudio o prototipos, describiéndolos completamente en función de los tipos de elementos utilizados, propiedades de los materiales, la relación de aspecto, las cuantías de acero, entre otros parámetros relevantes del modelo.

3.1. Programa SeismoStruct

SeismoStruct es un programa de elementos finitos que analiza el comportamiento de estructuras sometidas a cargas estáticas o dinámicas, pudiendo considerar tanto las no-linealidades geométricas como también la inelasticidad de los materiales. Posee siete diferentes tipos de análisis, pero para efectos de este trabajo se consideran sólo dos. Primero, mediante un análisis cuasi-estático se simuló el ensayo realizado por Thomsen y Wallace [16] y, segundo, con un análisis dinámico tiempo-historia no-lineal, se analizaron los muros propuestos.

En este programa [13] se pueden modelar elementos estructurales por medio de fibras unidireccionales para representar el comportamiento de las secciones transversales, donde a cada fibra se le asignan las propiedades del acero de refuerzo y las del hormigón que la componen [13], tal como se observa en la Figura 3.1.

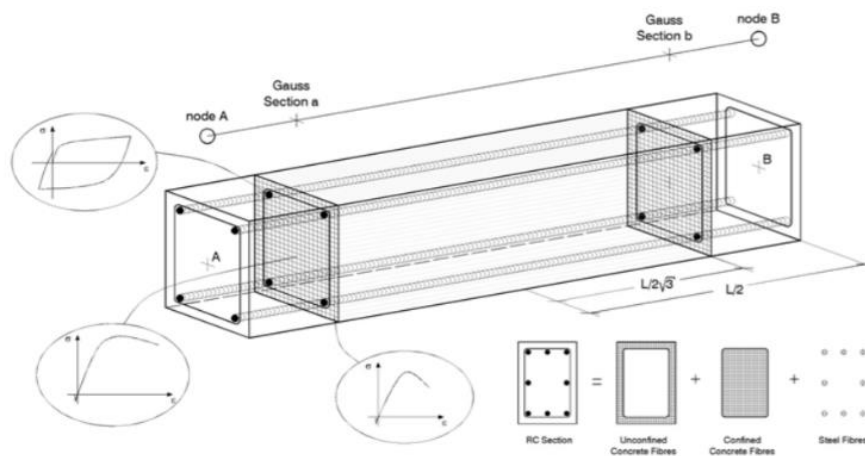


Figura 3.1 Discretización de una sección transversal típica de hormigón armado [13]

Para la modelación de los muros se utiliza el elemento tipo *viga-columna con fibras* (ver Figura 3.1), ya que mediante su uso es posible determinar fácilmente la influencia de la fisuración, fluencia y falla de los miembros

estructurales. Es decir, se logra no considerar la rigidez constante con la altura y además permite considerar la contribución de los modos superiores, debido a que el programa capta constantemente los cambios de rigidez de la estructura, así como su cambio en el período debido al agrietamiento, ya que captura la propagación de la inelasticidad a lo largo de la longitud o altura del muro.

3.1.1. Modelo de fibras

Los modelos de fibras consisten en una discretización de las secciones transversales en fibras uniaxiales, cada una con propiedades mecánicas del acero y el hormigón [13]. Estas fibras generalmente son modeladas como se muestra en Figura 3.2.

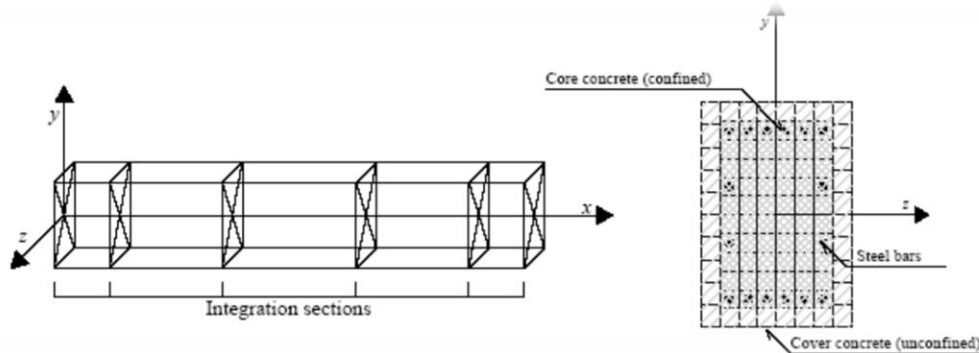


Figura 3.2. Elemento viga en el sistema de referencia local: subdivisión de la sección en fibras [13]

De la Figura 3.2 se logra observar la subdivisión de la sección viga en elementos tipo fibras. Cada sección es subdividida en fibras, esto con el fin de tomar en cuenta la variación del acero de refuerzo y el cambio en la sección transversal a lo largo del elemento.

En el sistema de coordenadas local del elemento viga-columna se definen seis grados de libertad, tanto para desplazamiento como para fuerzas, tal como se presentan en la Figura 3.3.

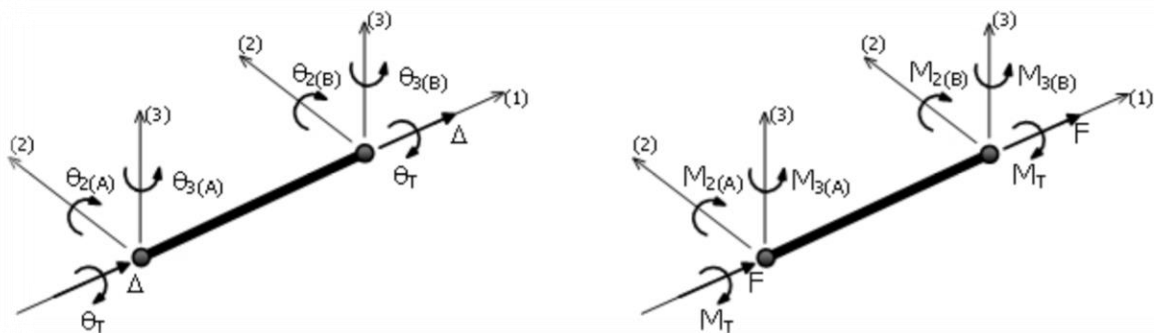


Figura 3.3. Fuerzas generalizadas y deformaciones en el elemento y nivel de la sección [13]

Estos modelos están basados en el Método de Flexibilidad donde el equilibrio se alcanza a partir de las fuerzas. Esta formulación basada en fuerzas es la que permite ilustrar la distribución no lineal de la curvatura a lo largo de la fibra.

Uno de los supuestos más relevantes del modelo de fibras, y una limitación a la vez, es que considera la Hipótesis de Bernoulli “secciones planas permanecen planas luego de la deformación” [18]. Esta suposición ha sido demostrada en numerosos ensayos de muros rectangulares, donde se observó que la distribución de la deformación unitaria a través de una sección transversal de hormigón armado resulta esencialmente lineal, aún cerca de la resistencia última [25], tal como se observa en la Figura 3.4. Se asume, además, perfecta adherencia entre el acero de refuerzo y el hormigón

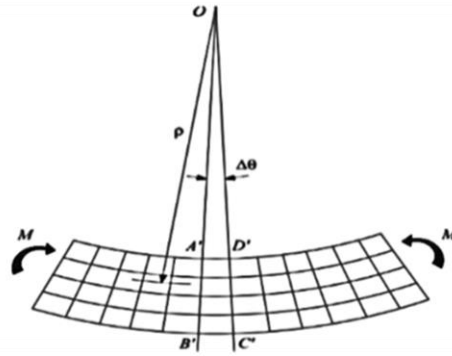


Figura 3.4. Hipótesis de Bernoulli, secciones planas permanecen planas

Por otro lado, cabe mencionar que estos elementos compuestos por fibras modelan adecuadamente el comportamiento del muro debido a la flexión y la carga axial, considerando el aporte del corte elásticamente a través del área transversal y la rigidez de corte. Sin embargo, esto no es relevante debido a que en muros esbeltos de hormigón armado generalmente estos efectos son despreciables [26].

3.2. Modelación espécimen RW2 [16]

A modo de evaluación y como una forma de mostrar que los modelos de fibras entregan resultados satisfactorios, se reprodujo el ensayo cuasiestático del espécimen RW2 desarrollado por Thomsen y Wallace [16]. La Figura 3.5 muestra la sección transversal del espécimen, destacándose sus dimensiones, el tipo de refuerzo y la distribución del mismo. La idea es reproducir el ensayo (ver Figura 3.6) en SeismoStruct y comparar la respuesta cíclica medida en laboratorio, particularmente con la curva de fuerza versus desplazamiento lateral. Para lograr este objetivo, es necesario considerar, además de los aspectos geométricos involucrados en el ensayo, las propiedades y curvas de comportamiento de los materiales (hormigón y refuerzo) medidas en laboratorio.

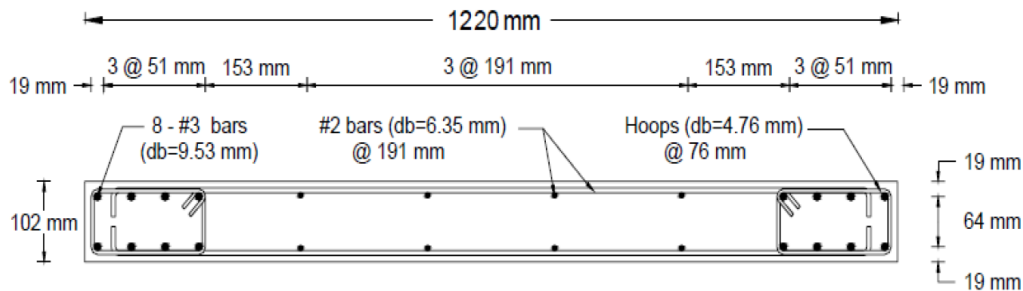


Figura 3.5. Corte transversal del espécimen de hormigón armado [16]

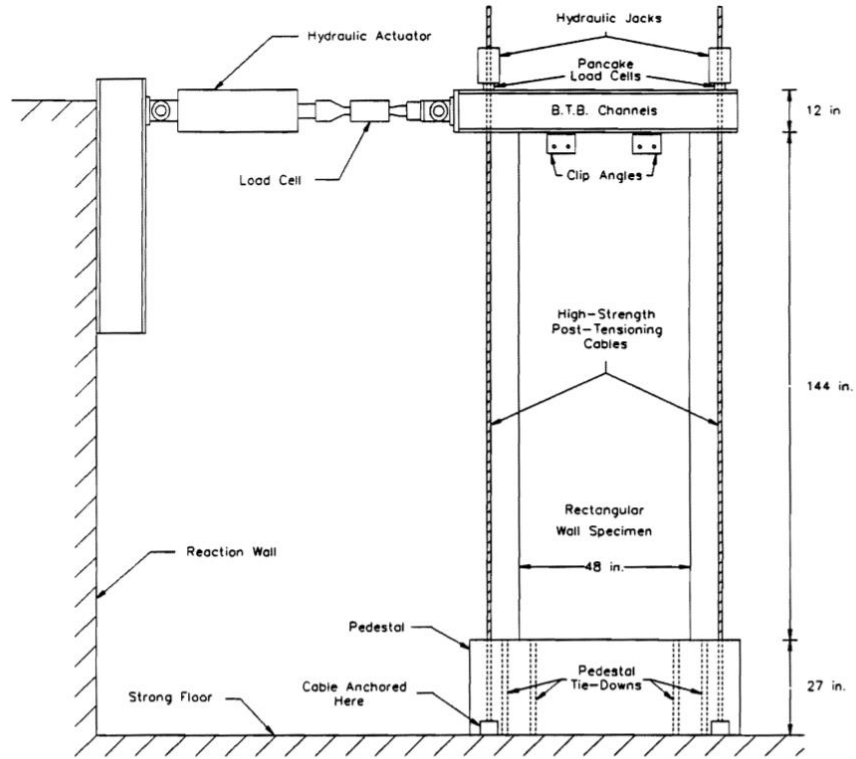


Figura 3.6. Vista lateral del espécimen [16]

A la probeta RW2 mostrada en la Figura 3.5 y 3.6 se le impuso en el borde superior la historia de desplazamiento lateral mostrada en la Figura 3.7. Estos desplazamientos fueron aplicados en el borde izquierdo del espécimen con un gato hidráulico, tal como se presenta en la Figura 3.6.

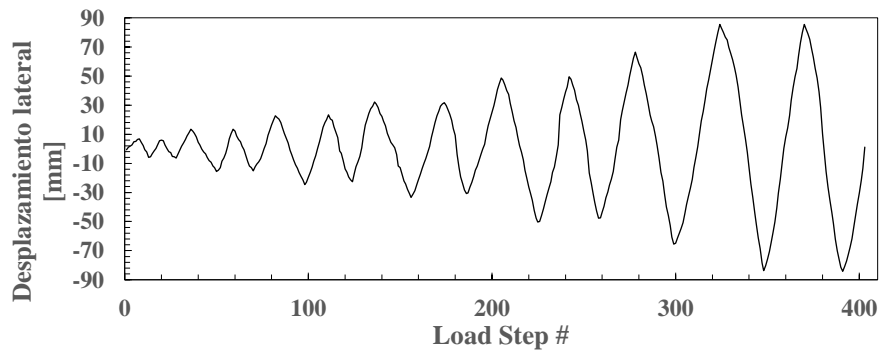


Figura 3.7. Historia de desplazamiento aplicada a la probeta [16]

El espécimen se sometió a una carga axial constante de aproximadamente $0.07 A_g f'_c$, en la parte superior del muro por medio de gatos hidráulicos.

Para efectos de modelación en SeismoStruct se utilizó la curva de Menegoto Pinto [27] para representar el comportamiento del refuerzo, con los parámetros que se mostrarán más adelante en la sección 3.3.3.1.

Determinar qué ley constitutiva usar para representar el comportamiento del hormigón requirió un proceso de prueba y error, evaluándose para estos efectos las cuatro curvas mostradas a continuación:

(a) Curva Trilineal del hormigón [13]

(b) Mander et al. [28]

(c) Chang y Mander [29]

(d) Kappos [30]

La Figura 3.8 muestra los resultados de la modelación en SeismoStruct, para cada modelo de hormigón considerado.

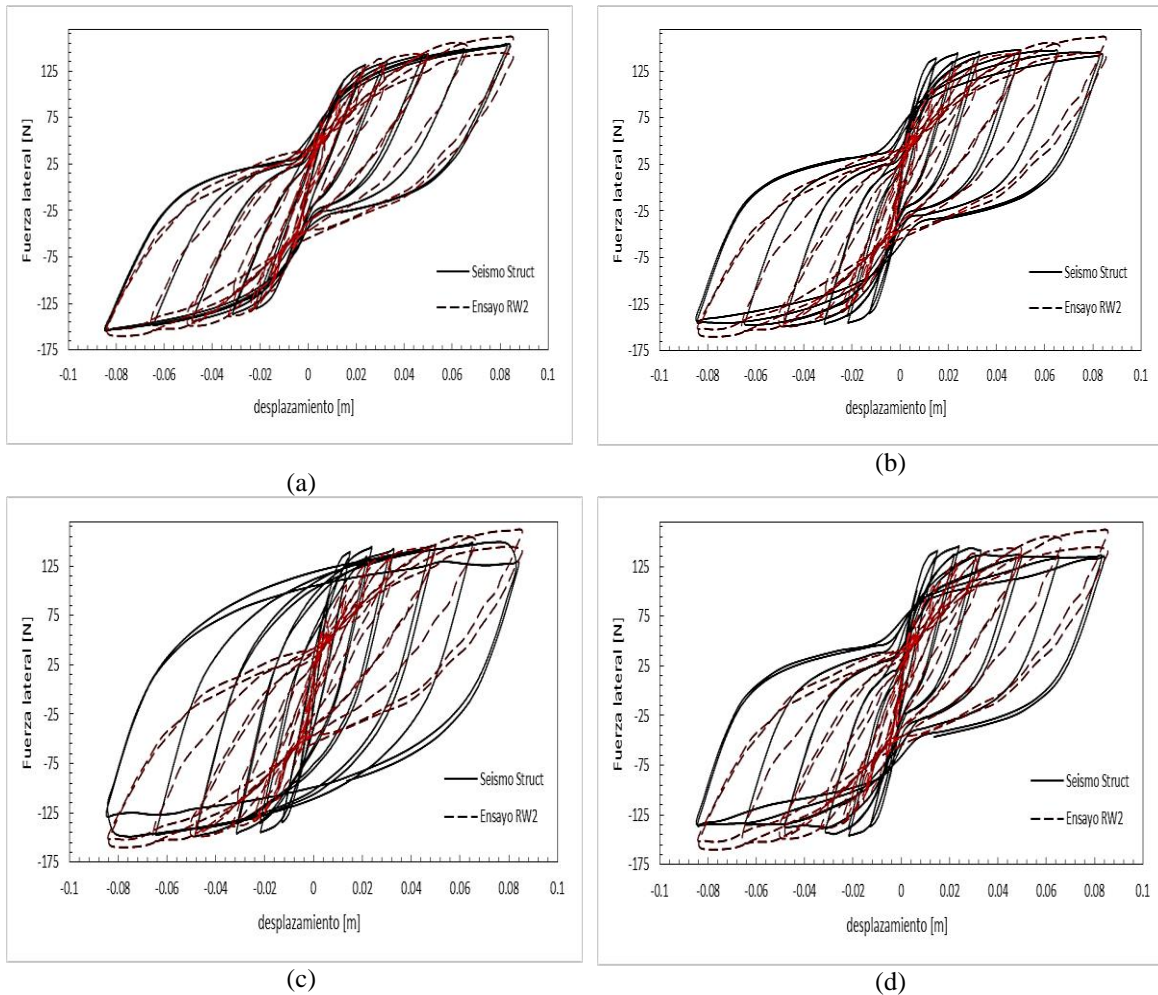


Figura 3.8. Curvas de esfuerzo vs deformación asociado a distintas curvas de comportamiento: (a) Curva Trilineal del hormigón, (b) Mander et al, (c) Chang y Mander y (d) Kappos.

Una inspección visual simple de la Figura 3.8 muestra que el mejor ajuste con los datos experimentales se consigue representando el comportamiento del hormigón con el modelo Uniaxial Trilineal. Es por esta razón que en este trabajo se utilizará esta curva como material base para los muros de hormigón armado.

3.3. Características de los muros estudiados

En esta sección se presentan las principales características de los muros analizados, en términos geométricos y de propiedades de los materiales considerados. Se detalla además la masa (y su distribución) y cargas consideradas para efecto de desarrollar los análisis dinámicos y que los resultados de estos sean representativos de edificios estructurados con muros.

3.3.1. Dimensiones y cuantía de acero de los muros en estudio

Para este estudio se consideraron 15 diferentes muros de hormigón armado en voladizo, todos con distinta altura H_w , espesor e y largo L_w . Además, en el diseño de los muros se consideraron dimensiones, detallamiento y cuantías típicas encontradas en edificios chilenos.

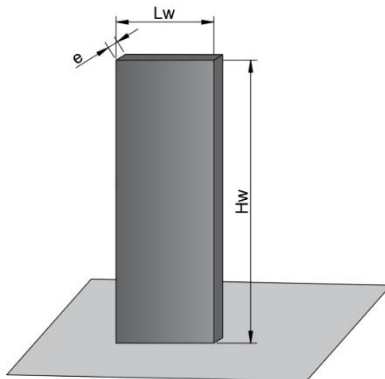


Figura 3.9. Sección tipo de muros de hormigón armado

En el diseño de los muros se consideró refuerzo distribuido y concentrado en los bordes, además de confinamiento en los extremos (elementos especiales de borde). El detalle de la distribución de refuerzo de los muros analizados, junto con su relación de aspecto, largo, ancho, cuantía total y recubrimiento, se presentan en las Tablas 3.1 y 3.2.

Tabla 3.1- Propiedades geométricas de muros en estudio

Nº de pisos	Nombre	Altura del muro H_w [m]	Largo del muro L_w [m]	Relación de aspecto	Espesor e [m]	Rec [m]
10	A	27.0	8	3.38	0.25	0.03
10	B	27.0	6	4.50	0.25	0.03
10	C	27.0	4	6.75	0.25	0.03
15	D	40.5	12	3.38	0.25	0.03
15	E	40.5	8	5.06	0.25	0.03
15	F	40.5	6	6.75	0.25	0.03
20	G	54.0	15	3.60	0.30	0.03
20	H	54.0	10	5.40	0.30	0.03
20	I	54.0	8	6.75	0.30	0.03
25	J	67.5	15	4.50	0.30	0.03
25	K	67.5	10	6.75	0.30	0.03
25	L	67.5	8	8.44	0.30	0.03
30	M	81.0	15	5.40	0.35	0.03
30	N	81.0	10	8.10	0.35	0.03
30	Ñ	81.0	8	10.13	0.35	0.03

Tabla 3.2 -Distribución de refuerzo en los muros

Nombre del muro	L_c [m]	Distribución borde	Distribución centro	Cuantía total ρ
A	1.23	14 ϕ 16	2M ϕ 8@15	0.0031
B	0.83	10 ϕ 16	2M ϕ 8@15	0.0030
C	0.83	10 ϕ 16	2M ϕ 8@15	0.0032
D	1.23	14 ϕ 18	2M ϕ 8@15	0.0031
E	0.83	10 ϕ 18	2M ϕ 8@15	0.0031
F	0.83	10 ϕ 18	2M ϕ 8@15	0.0033
G	2.03	22 ϕ 22	2M ϕ 10@20	0.0036
H	1.63	18 ϕ 22	2M ϕ 10@20	0.0038
I	1.23	14 ϕ 22	2M ϕ 10@20	0.0037
J	2.03	22 ϕ 25	2M ϕ 10@20	0.0041
K	1.63	18 ϕ 25	2M ϕ 10@20	0.0039
L	1.23	14 ϕ 25	2M ϕ 10@20	0.0043
M	2.03	22 ϕ 25	2M ϕ 10@15	0.0041
N	1.63	18 ϕ 25	2M ϕ 10@15	0.0043
Ñ	1.23	14 ϕ 25	2M ϕ 10@15	0.0042

Donde ρ es la cuantía de acero y L_c es el largo del elemento de borde.

3.3.2. Cargas y masas de los muros en estudio

El modelo de análisis propuesto tiene las masas concentradas (ver Figura 3.10) y ha sido usado ampliamente en estudios previos [11,12], inicialmente se consideró una masa de 60 toneladas por nivel. Además, se asignó como carga vertical por nodo, la carga que tributa generalmente en edificios con estructuración de muros, que equivale a la suma del peso propio de la losa, sobrelosa, estucos, tabiquería y la sobrecarga de uso [32].

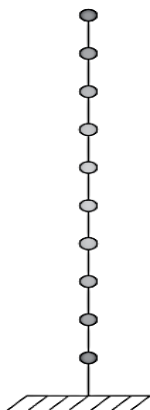


Figura 3.10. Modelo de muros en voladizo con masa y carga concentrada por nivel

El peso total está dado por la ecuación (3-1)

$$P = P_p + S_c \quad (3 - 1)$$

Donde el peso propio P_p se calcula en base a la ecuación (3-2):

$$P_p = e * A * \gamma \quad (3 - 2)$$

Y la sobrecarga de uso S_c se estima en base a la ecuación (3-3):

$$S_c = S_u * A \quad (3 - 3)$$

Tabla 3.3. Datos de las cargas

e: espesor de la losa	15 [cm]
A: área tributaria	60[m ²]
γ : peso específico del hormigón	2.5 [Ton/m ³]
S_u : sobrecarga de uso	0.2[Ton/m ²]
P_p : Peso propio	22.5[Ton]
S_c : Sobrecarga de uso	12[Ton]
P	34.5[Ton]

Luego de modelar los muros con las cargas mencionadas anteriormente no se logró obtener períodos acordes con los que se obtienen generalmente en edificios de muros reales, este es un problema usual al usar este tipo de modelos simplificados [31]. Valores típicos del período natural en estructuras con muros pueden obtenerse de las ecuaciones (3-4) y (3-5) comúnmente encontradas en la literatura [33, 34].

$$T_a = C_t h_h^x \quad (3 - 4)$$

Donde C_t y x son 0.0488 y 0.75 respectivamente y h_h es la altura del edificio.

$$T_a = \frac{N}{15} \quad (3 - 5)$$

Con N el número de pisos del edificio.

En base a estas ecuaciones se consideraron rangos en los cuales debía establecerse el período natural. Para lograr obtener períodos naturales acorde con estos límites, se ajustó la masa por nivel hasta lograr que el período del elemento este acorde con los períodos de edificios típicos existentes. Los resultados se presentan en la Tabla 3.4 y en la Figura 3.11.

Tabla 3.4. Períodos naturales de vibración de los muros en estudio

Nombre del muro	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ
Período [s]	0.59	0.62	0.64	0.74	0.86	0.9	0.97	1.06	1.19	1.3	1.27	1.63	1.45	1.83	2.1

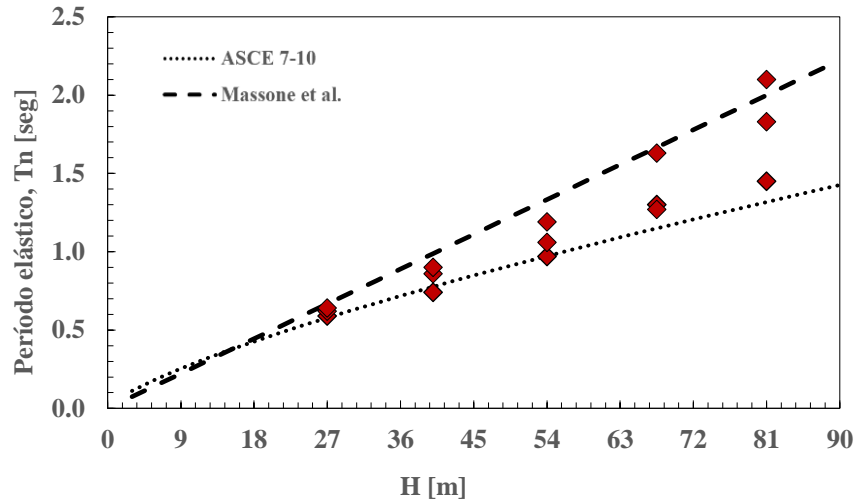


Figura 3.11. Períodos de muros en estudio versus períodos esperados de acuerdo con las ecuaciones (3-4) y (3-5), figura adaptada de [31].

3.3.3. Materiales

En esta sección se presentan los materiales utilizados para los muros de hormigón armado. Se muestran las curvas de comportamiento tanto del hormigón como del acero.

3.3.3.1. Acero de refuerzo

Para el acero de refuerzo se consideraron barras de acero con resaltes de calidad A630-420H y se utilizó el modelo constitutivo de Menegotto Pinto [27], que consiste en un modelo uniaxial basado en la relación de esfuerzo deformación propuesta por Menegotto & Pinto, considerando las leyes de endurecimiento isotrópico propuestas por Filippou et al. [13], tal como muestra la Figura 3.11.

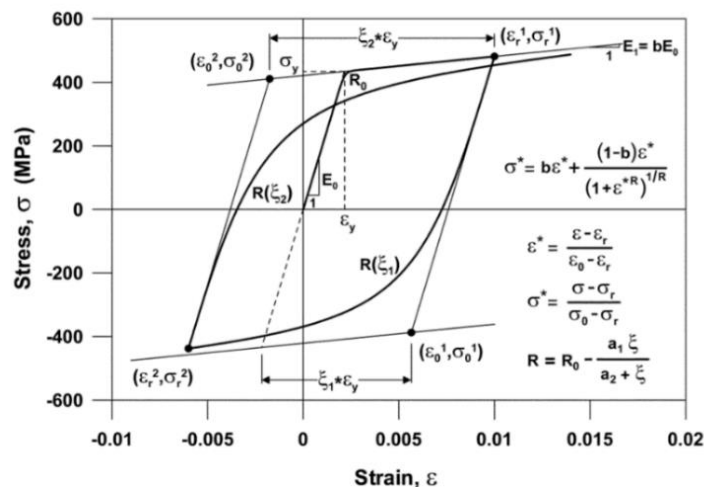


Figura 3.12. Modelo de Menegotto Pinto para el acero [27]

La Tabla 3.5 resume los parámetros necesarios y considerados para definir el material en el programa SeismoStruct.

Tabla 3.5- Propiedades del refuerzo para modelación

PROPIEDADES DEL MATERIAL	VALORES DEFINIDOS
Módulo de elasticidad E_s [kgf/cm^2]	$2.1 * 10^6$
Tensión de fluencia F_y [kgf/cm^2]	4200
Parámetro de endurecimiento por deformación μ	0.01
Parámetro de forma inicial de la curva de transición R_0	20(-)
Deformación de rotura/pandeo	0.1(-)
Peso específico- γ [kgf/m^3]	7953

Donde el módulo de elasticidad es la rigidez inicial del material, la tensión de fluencia es el esfuerzo de fluencia del acero, el parámetro de endurecimiento por deformación es la razón entre la rigidez post fluencia y la rigidez elástica inicial del material Su valor varía habitualmente entre 0.005 y 0.015. Asimismo, el parámetro de forma inicial de la curva es el parámetro que controla la forma de la curva de transición entre la rigidez inicial y la que se encuentra posterior a la fluencia (el valor por defecto es 20), el coeficiente de calibración de del endurecimiento isotrópico A3 y A4 son dos coeficientes utilizados para definir el grado y por último la deformación de rotura/pandeo es la deformación para la cual ocurre fractura o pandeo y por defecto es 0.1, valor razonable para barras de armadura en secciones de hormigón armado [27].

3.3.3.2. Hormigón

Para el hormigón confinado y no confinado se utilizó la curva de comportamiento tri-lineal del hormigón [13], cuya envolvente se muestra en la Figura 3.13, se trata de un modelo uniaxial tri-lineal simplificado que asume resistencia nula a tracción y presenta un umbral de resistencia residual.

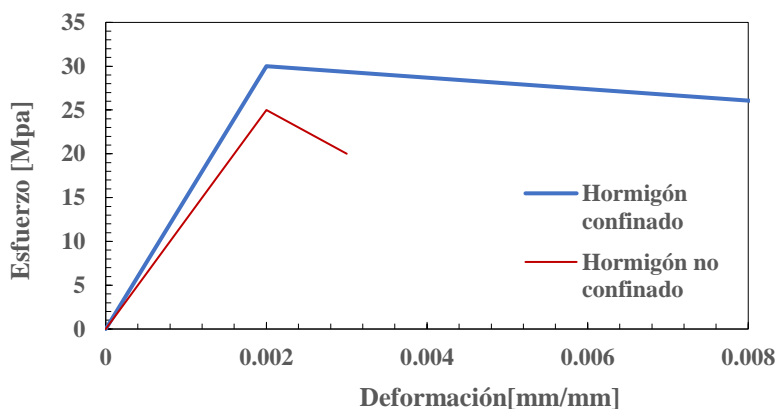


Figura 3.13. Curva tri-lineal esfuerzo deformación del hormigón.

Cabe mencionar que el eje x (absisa) de la Figura 3.13 fue truncado hasta una deformación de 0.008 [mm/mm], con el fin de ilustrar con mayor nitidez el cambio entre las curvas de comportamiento del hormigón confinado y no confinado.

Para modelar el comportamiento del hormigón confinado y no confinado, en el programa SeismoStruct se establecen los parámetros que se presentan en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6: Propiedades del hormigón.

PROPIEDADES DEL MATERIAL	VALORES DEFINIDOS
Resistencia a compresión f'_c [kgf/cm ²]	250
Resistencia a tracción f_t [kgf/cm ²]	0.000
Deformación al valor peak del esfuerzo ε_c [m/m]	0.002
Factor de confinamiento K_c	1.200
Peso específico γ [kgf/m ³]	2450

La resistencia a tracción del hormigón es considerada nula. Esto se debe a que se recomienda, para determinar el desplazamiento global del muro, despreciar la resistencia a tracción para obtener estabilidad numérica en el análisis con mayor facilidad [13].

Asimismo, para las secciones confinadas se utilizó el factor de confinamiento, este se determina mediante la razón entre la resistencia a compresión confinada y no confinada del hormigón y se utiliza para amplificar la relación esfuerzo-deformación a lo largo del rango completo de deformaciones (su valor generalmente es 1 y 2 para elementos de hormigón armado) [13]. Este aumento se utiliza debido a que el confinamiento produce un aumento de la resistencia y ductilidad. Por otro lado, para el hormigón no confinado (parte central del muro) el factor de confinamiento se consideró como 1.

Cabe mencionar que para este estudio se consideró que cada muro en estudio tiene elementos de borde que cubren el 15% del largo del muro ($0.15L_w$) y estribos de confinamiento de diámetro 10 [mm] espaciados a 10 [cm] ($\emptyset 10@10$).

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS TIEMPO HISTORIA NO LINEAL Y PRINCIPALES RESULTADOS

En este capítulo se presentan las demandas sísmicas consideradas y aplicadas a los muros en estudio. Además, se detalla el procedimiento para estimar el desplazamiento de fluencia y se presentan los principales resultados del análisis tiempo-historia no-lineal.

Complementariamente, se analizan los resultados obtenidos buscando dar explicación al comportamiento observado en los muros. Para lograr este objetivo se realizó análisis de sensibilidad, buscando correlacionar parámetros y variables presentes en la respuesta de los muros, particularmente el desplazamiento fluencia.

4.1. Análisis tiempo historia no-lineal

Para los análisis tiempo-historia no-lineal se consideraron 6 registros sísmicos: tres sintéticos y tres naturales. Los registros sísmicos naturales y sintéticos tienen conocidas y documentadas diferencias, evaluar qué efecto tiene este hecho en la respuesta de los muros es uno de los objetivos de esta sección.

4.1.1. Registros sintéticos

Para obtener los registros sintéticos de aceleración sísmica se utilizó el programa SeismoArtif [13]. Este permite, entre otras cosas, generar acelerogramas sintéticos que sean compatibles con un espectro de respuesta definido.

Para este estudio se consideraron tres espectros elásticos definidos en la norma chilena NCh433 [14], para los tipos de suelo mostrados en la Tabla 4.1. En otras palabras, se crearon registros sintéticos que se ajustan a los espectros antes mencionados.

Tabla 4.1- Clasificación sísmica del terreno de fundación

Suelo Tipo		V_{s30} (m/s)
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o firme	≥ 500
C	Suelo denso o firme	≥ 350
D	Suelo medianamente denso, o firme	≥ 180

Donde V_{s30} es la velocidad de onda de corte equivalente de los 30 metros superiores del terreno.

Para generar el espectro de respuesta en base a la normativa chilena, se utiliza la siguiente ecuación:

$$S_a = \frac{SIA_0\alpha}{R^*} \quad (4-1)$$

La ecuación (4-1) está asociada a un amortiguamiento viscoso igual al 5% del amortiguamiento crítico.

Donde:

S_a : Pseudo aceleración espectral de diseño.

I : Coeficiente relativo a la importancia, uso y riesgo de falla de un edificio.

R^* : Factor de reducción espectral (1 para este caso de análisis).

A_0 : Aceleración efectiva máxima del suelo.

$$A_0 = 0.40g \quad (4 - 2)$$

α : Factor de amplificación de la aceleración efectiva máxima.

$$\alpha = \frac{1 + 4.5 \left(\frac{T_n}{T_0}\right)^p}{1 + \left(\frac{T_n}{T_0}\right)^3} \quad (4 - 3)$$

Para las ecuaciones mostradas anteriormente se utilizaron los siguientes parámetros:

Tabla 4.2- Parámetros asociados al tipo de suelo

Suelo tipo	Zona Sísmica	$\frac{A_0}{g}$	I	S	T_0	p	R	R_0
B	3	0.4	1	1.00	0.30	1.5	7	11
C	3	0.4	1	1.05	0.40	1.6	7	11
D	3	0.4	1	1.20	0.75	1.0	7	11

En la Figura 4.1 se muestran los espectros de pseudo-aceleración elásticos considerados.

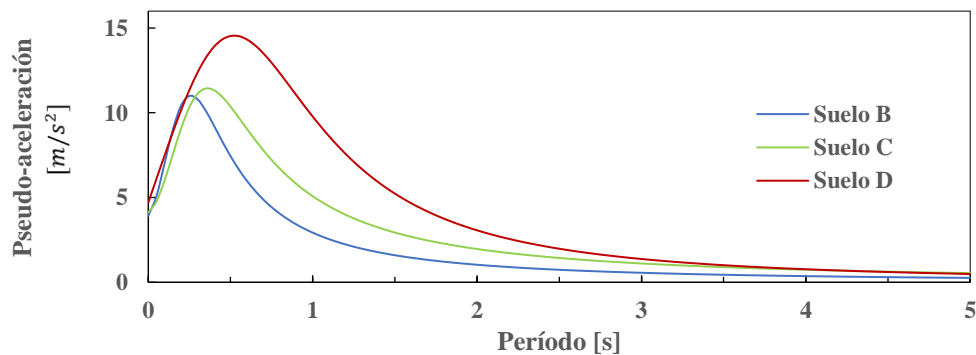


Figura4.1. Espectros de respuesta normativa chilena suelos B, C y D

De la Figura 4.1 se observa que los suelos B y C presentan comportamientos similares en cuanto pseudo-aceleraciones máximas ya que estas son parecidas, por otro lado, cuando se consideran períodos superiores a

0.5 [s] las curvas presentan variación en los resultados, incluso para algunos casos se obtiene el doble de pseudo-aceleración con un espectro u otro. Por otro lado, en el espectro creado para el suelo D se aprecian diferencias significativas con respecto a las demás curvas, debido a que la amplitud es mayor y el peak de pseudo-aceleraciones se desfasa ya que ocurre para períodos más largos, por ende, este espectro representa zonas con alta sismicidad.

Luego de obtener los espectros de respuesta de los tres suelos, se determinó un acelerograma compatible con cada espectro de respuesta creado, mediante el siguiente procedimiento:

Primero se asignó el espectro de respuesta en SeismoArtif [13] y con ello el programa realizó un proceso iterativo, con el fin de determinar el acelerograma sintético que sea compatible con el espectro de respuesta. Asimismo, el programa determinó una función de densidad espectral de potencia, que se define como la variación de la energía contenida en un registro, en función de la frecuencia por unidad de masa.

$$G(w)_{i+1} = GG(w)_i * \left(\frac{S_v^w}{S_{v(w)}^i} \right)^2 \quad (4 - 4)$$

Donde:

S_v : es el valor del espectro asignado

S_v^i : es el valor del espectro calculado

Con la ecuacion (4-4) SeismoArtif modeló un nuevo movimiento y en cada iteración calculaba un espectro de respuesta nuevo y si este espectro no era compatible con el asignado comenzaba nuevamente el proceso y así sucesivamente hasta encontrar la convergencia.

En la Figura 4.2 se presenta el resumen esquemático del método para tener más claridad del proceso.

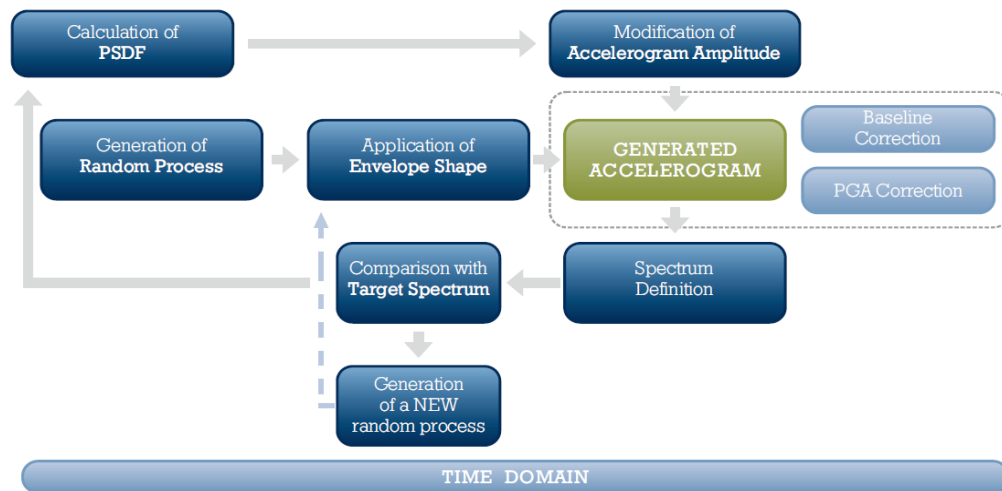


Figura4.2. Esquema de generación de acelerograma sintético [13]

Los registros sintéticos obtenidos se presentan en las Figuras 4.3, 4.4 y 4.5.

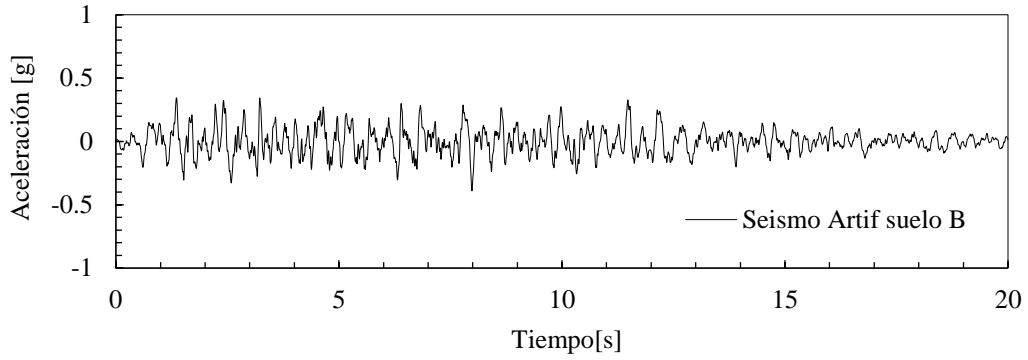


Figura 4.3. Registro sísmico sintético asociado al espectro elástico del suelo tipo B

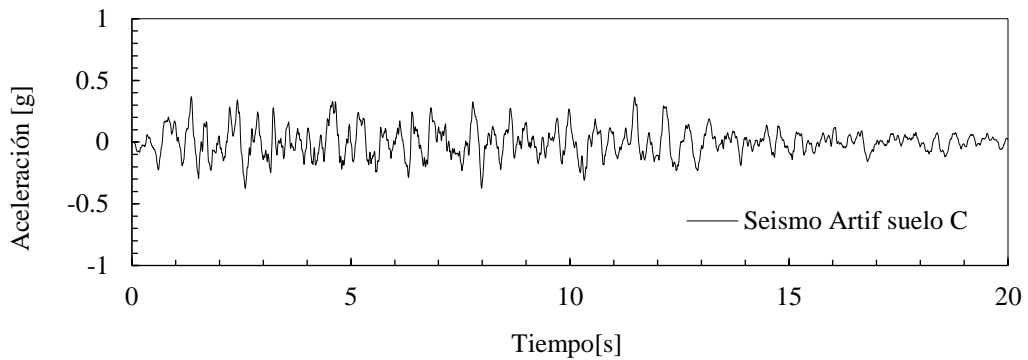


Figura 4.4. Registro sísmico sintético asociado al espectro elástico del suelo tipo C

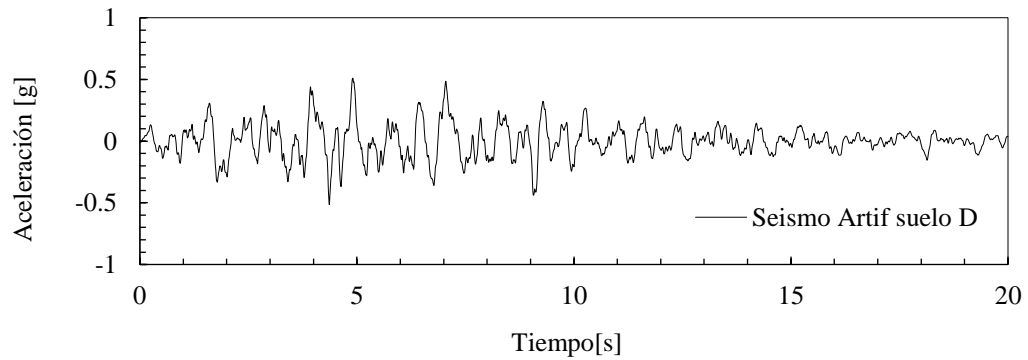


Figura 4.5. Registro sísmico sintético asociado al espectro elástico del suelo tipo D

En la Tabla 4.3 se presentan las máximas aceleraciones de los registros sísmicos sintéticos:

Tabla 4.3- Aceleraciones máximas de los registros sintéticos

Máxima aceleración registro sísmico sintético suelo B	0.34[g]
Máxima aceleración registro sísmico sintético suelo C	0.37[g]
Máxima aceleración registro sísmico sintético suelo D	0.51[g]

4.1.2. Registros naturales

A modo de comparación se utilizaron tres registros naturales del Terremoto del Maule, ocurrido en febrero del año 2010 en Chile. Estos registros se obtuvieron desde la red de cobertura nacional de acelerógrafos (RENADIC) del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

Se utilizaron tres estaciones de monitoreo sísmico, las cuales fueron seleccionadas de acuerdo al tipo de suelo, considerando la clasificación realizada en [35]. Esta clasificación está hecha según la investigación elaborada por Borcherd en 1994 [36]; en esta investigación el autor propone un método de clasificación de suelos utilizando la velocidad promedio de las ondas de corte en los 30 metros superiores, mismo criterio utilizado en Chile en el Decreto Supremo N°61 [3].

En base a la investigación mencionada anteriormente, las velocidades de onda de corte se calculan como sigue:

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{s-i}}} \quad (4 - 5)$$

Con:

V_{s30} : Velocidad de onda de corte equivalente de los 30 metros superiores del terreno

h_i : Espesor del estrato i en metros

V_{s-i} : Velocidad de ondas de corte del estrato i en (m/s)

Por lo tanto, utilizando la ecuación 4-5 y por medio de la clasificación realizada en [35], se consideraron los acelerogramas registrados las estaciones de monitoreo sísmico presentadas en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4.-Estaciones de monitoreo sísmico, terremoto del Maule, 2010.

Terremoto	M_w	Estación	Tipo de Suelo
Maule 2010	8.8	Talca	B
Maule 2010	8.8	Maipú	C
Maule 2010	8.8	Angol	D

Estos registros se presentan en las Figuras 4.6, 4.7 y 4.8.

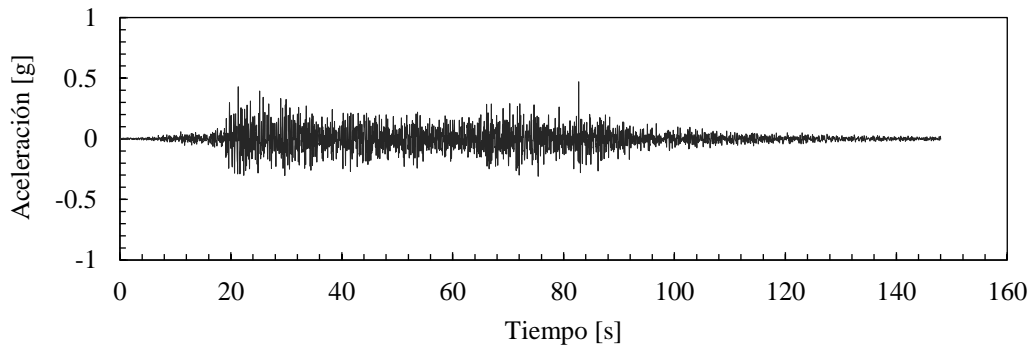


Figura4.6. Registro sísmico natural estación de Talca, Terremoto del Maule 2010

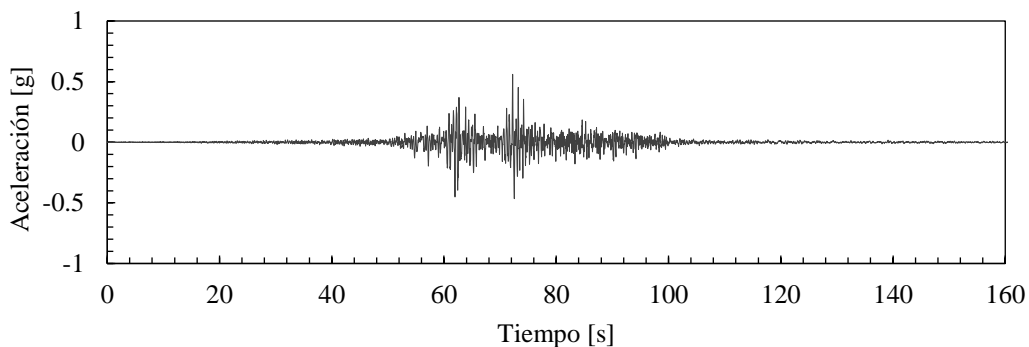


Figura4.7. Registro sísmico natural estación de Maipú, Terremoto del Maule 2010

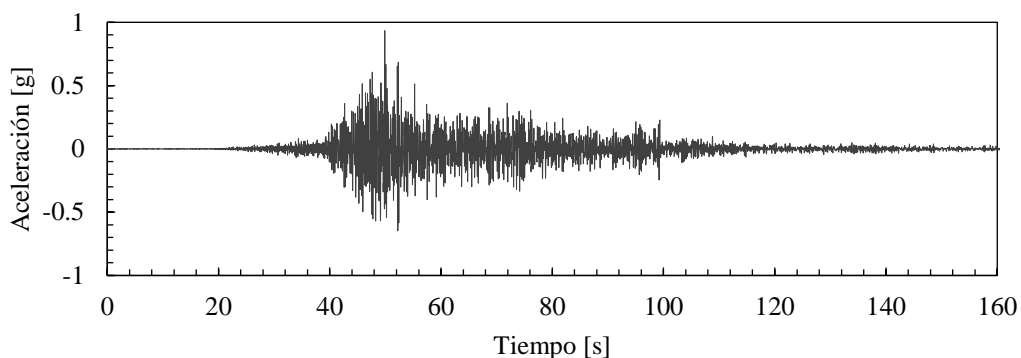


Figura4.8. Registro sísmico natural estación de Angol, Terremoto del Maule 2010

En la Tabla 4.5 se presentan las máximas aceleraciones registradas de los registros naturales.

Tabla 4.5- Aceleraciones máximas registros naturales

Máxima aceleración registro sísmico Talca-Suelo B	0.47[g]
Máxima aceleración registro sísmico Maipú-Suelo C	0.56[g]
Máxima aceleración registro sísmico Angol-Suelo D	0.93[g]

Luego de someter los muros en estudio a estos registros se obtuvieron análisis extremadamente largos, por lo que se optó por truncar los registros. Cabe mencionar que la respuesta no se verá afectada al realizar este procedimiento, puesto que se demostró en el estudio [37] que, al truncar los registros se obtiene una muy buena estimación de envolventes máximas de la respuesta de una estructura, tales como: deformaciones de entrepiso, esfuerzos, desplazamientos y aceleraciones. Para realizar este procedimiento se utilizó la metodología de Bommer y Martínez Pereira [38] la cual determina la duración significativa del sismo, basándose en la acumulación de energía del registro, relacionando la Intensidad de Arias con la aceleración del suelo. La intensidad de Arias es una variable que representa el potencial destructivo un sismo, en otras palabras, determina la energía contenida en el registro sísmico [39].

Posteriormente utilizando el programa WOLFRAM MATHEMATICA se truncaron los registros que se presentan en las Figuras 4.9, 4.10 y 4.11.

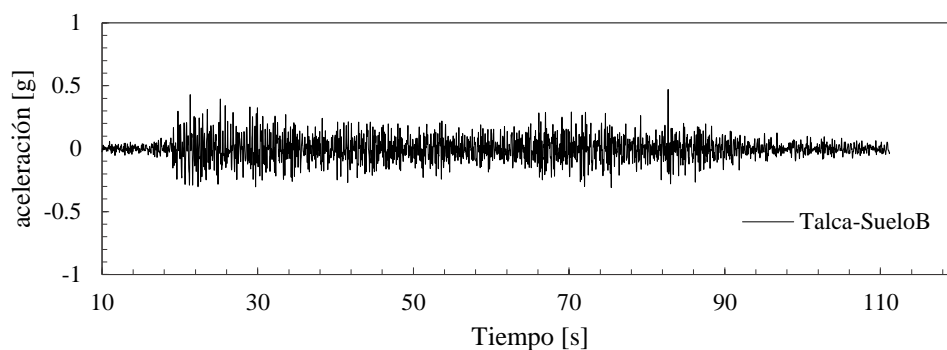


Figura4.9. Registro sísmico truncado ocurrido en Talca

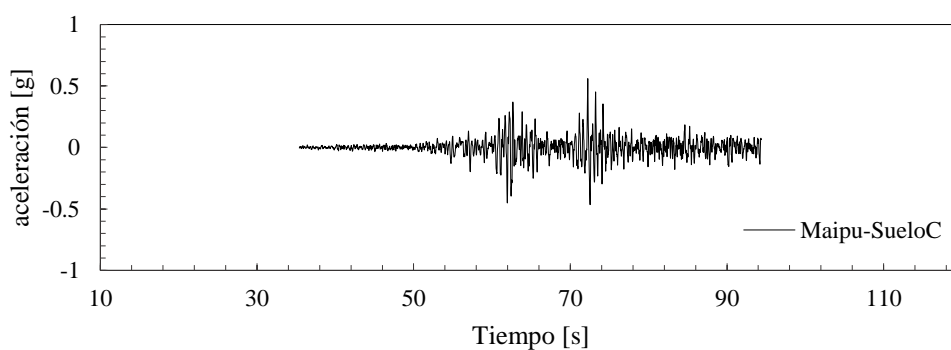


Figura4.10. Registro sísmico truncado ocurrido en Maipú

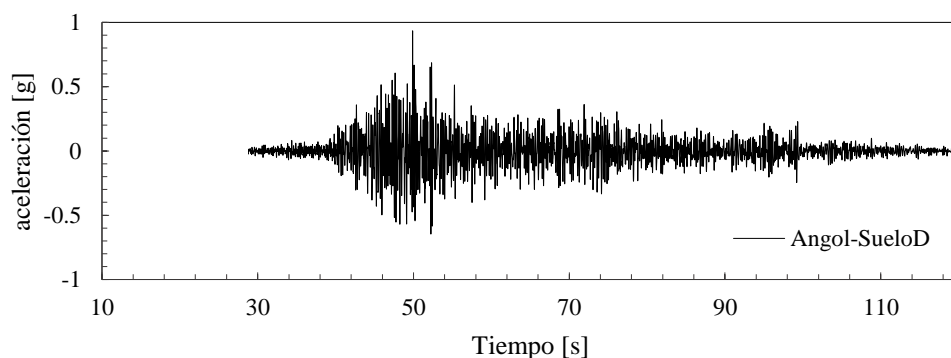


Figura4.11. Registro sísmico truncado ocurrido en Angol

Como se observa de la Figuras 4.9, 4.10 y 4.11 los registros truncados quedan con una menor duración, lo que facilita el análisis, puesto que, al acortar los registros el programa realiza los cálculos con mayor rapidez.

4.1.3. Espectros de respuestas de los registros sísmicos

En la Figura 4.12, mediante el programa SeismoSignal se presentan los espectros de aceleraciones de cada registro, con el fin de realizar una visualización de los generados artificialmente según la normativa chilena como también los asociados a terremotos reales ocurridos en Chile. Cabe mencionar que cada espectro está asociado a un amortiguamiento viscoso igual al 5% del amortiguamiento crítico.

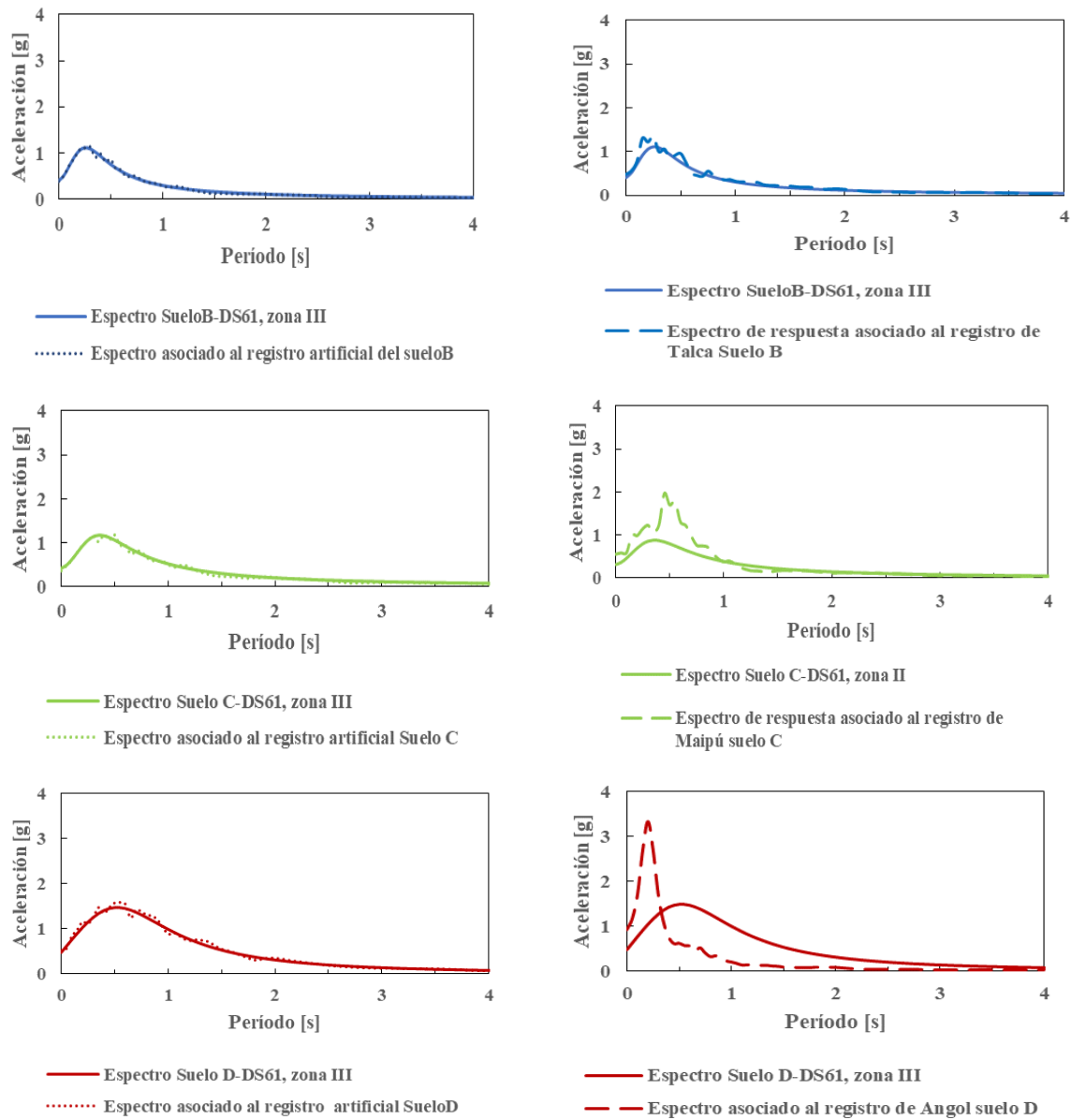


Figura 4.12. Espectros de la normativa chilena, espectros de los registros sísmicos sintéticos y espectros asociados al terremoto del Maule del 2010.

Como se aprecia de la Figura 4.12 los espectros asociados a los suelos B presentan comportamientos semejantes, debido a que el espectro asociado a los registros sintéticos y el espectro creado con los registros sísmicos chilenos presentan peak de amplitudes y formas similares.

Por otro lado, no existe el mismo comportamiento en el suelo D, puesto que el espectro elástico creado con el registro sísmico chileno ocurrido en este suelo presenta mayores peak de pseudo aceleraciones. En cambio, el espectro creado chilena partir del registro sintético presenta una curva más suavizada, con una amplitud menor. Además, existe un desfase en los períodos para los que ocurre en el peak de pseudo-aceleraciones entre ambos espectros.

Por último, como era de esperarse, los espectros generados mediante los registros sísmicos sintéticos se ajustan de buena manera con el espectro de diseño en todo el rango de períodos.

4.2. Estimación del desplazamiento de fluencia

El diagrama de flujo mostrado en la Figura 4.13 resume el procedimiento desarrollado para estimar el desplazamiento de fluencia de los muros en cada análisis hecho.

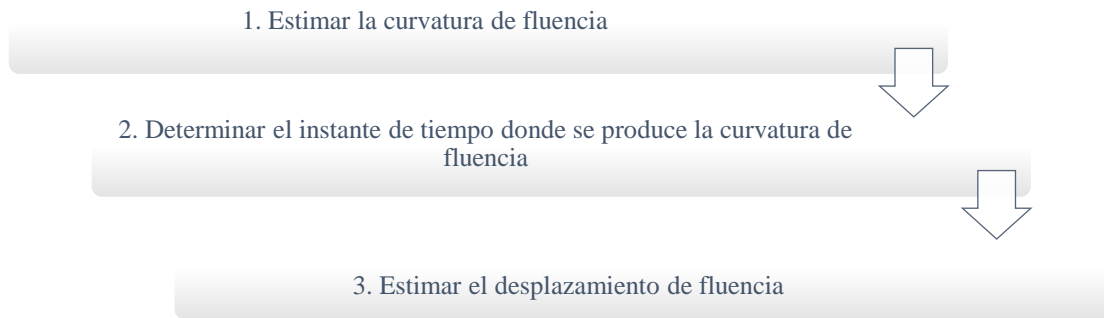


Figura4.13. Diagrama de flujo con la metodología para estimar el desplazamiento elástico

4.2.1. Curvatura de fluencia

Para estimar la curvatura nominal de fluencia se utilizó la ecuación (2-9) descrita en el Capítulo II. Desde esta ecuación Priestley y Kowalsky [40] mediante ensayos experimentales determinaron el valor de la curvatura de fluencia de muros de hormigón armado, desde el análisis los autores comprobaron que la constante η estaba dentro del rango de valores que se presentan en la Figura 4.14.

Como se aprecia de la Figura 4.14 los autores basan su estudio estableciendo una relación entre las curvaturas de fluencia nominal de los muros de hormigón armado estudiados, considerando distintas cuantías de acero. Desde el análisis se obtiene que la variable que estima la curvatura de fluencia η , estaba en un rango cercano a 2.0 con una probabilidad de exceder ese número en un 5%. En base a estas observaciones los autores plantearon utilizar la ecuación (4-6) para determinar la curvatura de fluencia.

$$\phi_y L_w = 2\varepsilon_y \pm 10\% \quad (4 - 6)$$

En este trabajo se utilizaron las recomendaciones de Priestley y Kowalsky, estimando la curvatura de fluencia con la ecuación (4-7).

$$\phi_y = 2 \frac{\varepsilon_y}{L_w} \quad (4 - 7)$$

Como una forma de obtener resultados más representativos se consideraron los límites inferior y superior de curvatura, ver ecuación (4-6). En consecuencia, para cada análisis dinámico se consideraron tres curvaturas de fluencias, por ende, se determinaron tres desplazamientos de fluencia. Esto con el fin de determinar si existe variación en los resultados al considerar una curvatura u otra.

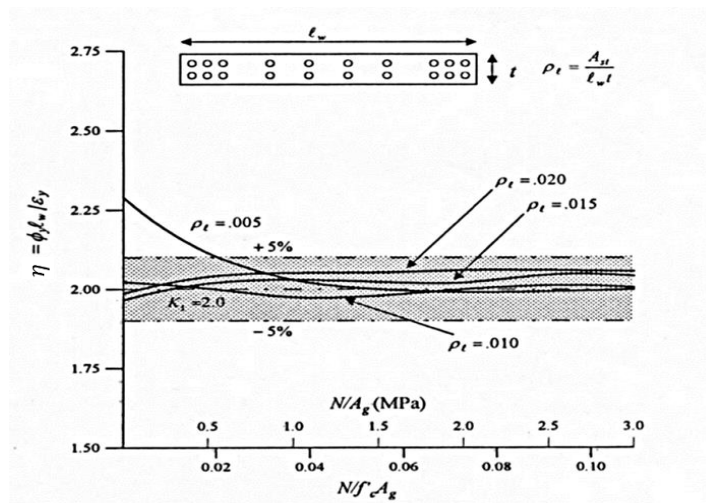


Figura 4.14. Rango de valores del parámetro k en la estimación de la curvatura de fluencia para muros de hormigón armado [36]

En la Tabla 4.5 se presentan las curvaturas asociadas a cada muro en estudio:

Tabla 4.6- Curvaturas de fluencia de los muros en estudio

Muro	$\phi_y Inf$ [1/m]	ϕ_y [1/m]	$\phi_y Sup$ [1/m]
A	0.00045	0.00050	0.00055
B	0.00060	0.00067	0.00073
C	0.00090	0.00100	0.00110
D	0.00030	0.00033	0.00036
E	0.00045	0.00050	0.00055
F	0.00060	0.00067	0.00073
G	0.00024	0.00027	0.00029
H	0.00036	0.00040	0.00044
I	0.00045	0.00050	0.00055
J	0.00024	0.00027	0.00029
K	0.00036	0.00040	0.00044
L	0.00045	0.00050	0.00055
M	0.00024	0.00027	0.00029
N	0.00036	0.00040	0.00044
\tilde{N}	0.00045	0.00050	0.00055

Para ilustrar como opera el procedimiento propuesto, se presenta en la Figura 4.3 el diagrama de momento curvatura del muro A, destacándose en este, con un punto rojo, el instante donde la curvatura de fluencia se alcanza por primera vez durante la respuesta del muro.

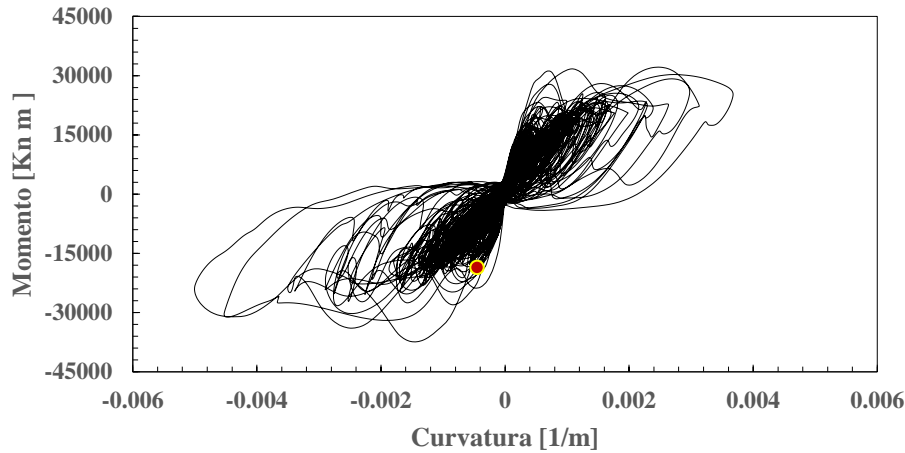


Figura 4.15. Punto en el que se produce la fluencia en el diagrama de momento curvatura

Cabe mencionar que el diagrama de momento curvatura mostrado en la Figura 4.15 se usó como excitación sísmica el registro sintético asociado al espectro de diseño del suelo tipo B (ver Figura 4.3).

4.2.2. Instante de tiempo donde se alcanza la curvatura de fluencia.

Con las curvaturas definidas en la Tabla 4.6, para cada análisis se identificó el tiempo en el que el muro alcanzó cada una de las tres curvaturas de fluencia, desde el gráfico de curvatura versus tiempo (por ejemplo, Figura 4.15). Nuevamente, a modo ejemplo, en la Figura 4.16 se presenta y destaca el tiempo donde el muro A alcanza la curvatura de fluencia, considerando el registro sintético asociado al suelo tipo B (ver Figura 4.3).

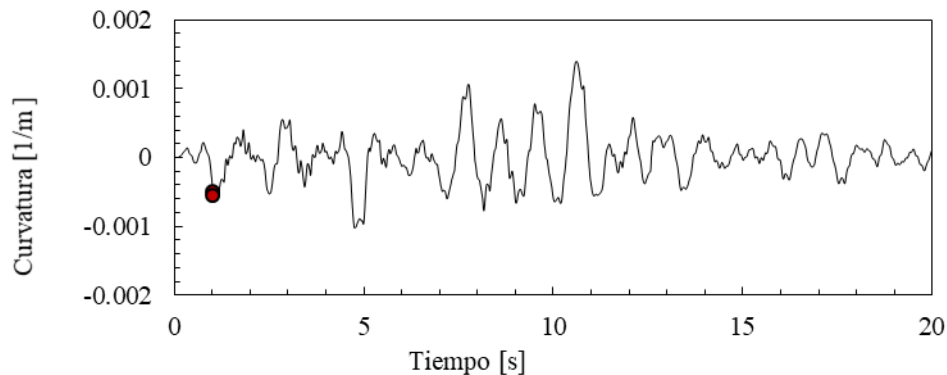


Figura 4.16. Curvatura versus tiempo del muro A.

Se aprecia de la Figura 4.16 que la curvatura de fluencia ocurre al segundo de ser sometido al registro sísmico sintético.

4.2.3. Desplazamiento de fluencia

Subsiguientemente de encontrar el punto de fluencia de la gráfica momento-curvatura, se determinó el valor del desplazamiento de fluencia mediante el gráfico de desplazamiento en el tiempo (ver Figura 4.17), tomando como desplazamiento de fluencia el valor asociado al tiempo determinado anteriormente, considerando el registro sintético asociado al suelo tipo B (ver Figura 4.3). En la Figura 4.17 se presenta la gráfica del desplazamiento de fluencia y los Drift de techo en el tiempo.

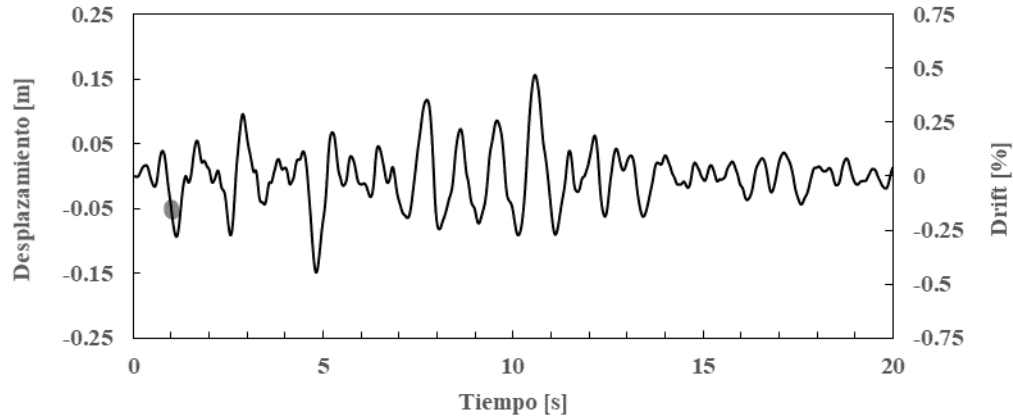


Figura 4.17. Desplazamiento en el tiempo del borde superior del muro A

Mediante este procedimiento se obtuvieron todos los desplazamientos de fluencias de los todos muros en estudio.

4.3. Principales resultados y análisis

En este ítem se presentan los principales resultados del análisis tiempo historia no lineal realizado a los muros, obtenidos con los seis registros sísmicos descritos en el ítem anterior.

4.3.1. Desplazamiento de fluencia obtenido con registros sísmicos sintéticos

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del desplazamiento de fluencia y la constante K (ver ecuación (2-4)) asociada a cada uno de ellos en las Tablas 4.6, 4.7 y 4.8.

Tabla 4.7: Desplazamiento de fluencia y constante K de muros en estudio, sismo sintético suelo B.

Muro	δ_{yB_1} [m]	K_{B_1}	δ_{yB_2} [m]	K_{B_2}	δ_{yB_3} [m]	K_{B_3}
A	0.05	0.15	0.05	0.15	0.09	0.22
B	0.07	0.15	0.07	0.14	0.08	0.14
C	0.09	0.13	0.15	0.20	0.16	0.20
D	0.07	0.14	0.07	0.13	0.08	0.13
E	0.10	0.13	0.11	0.13	0.08	0.09
F	0.11	0.11	0.11	0.10	0.11	0.10
G	0.09	0.13	0.10	0.13	0.11	0.13
H	0.09	0.08	0.17	0.15	0.17	0.13
I	0.20	0.15	0.20	0.13	0.19	0.12
J	0.13	0.11	0.13	0.10	0.13	0.09
K	0.25	0.15	0.25	0.14	0.25	0.12
L	0.27	0.13	0.27	0.12	0.27	0.11
M	0.24	0.15	0.24	0.14	0.24	0.13
N	0.20	0.08	0.21	0.08	0.22	0.08
Ñ	0.30	0.10	0.19	0.06	0.19	0.05

Tabla 4.8: Desplazamiento de fluencia y constante K de muros en estudio, sismo sintético suelo C

Muro	δ_{yC_1} [m]	K_{C_1}	δ_{yC_2} [m]	K_{C_2}	δ_{yC_3} [m]	K_{C_3}
A	0.05	0.16	0.06	0.15	0.06	0.15
B	0.07	0.16	0.08	0.16	0.08	0.16
C	0.11	0.16	0.12	0.16	0.12	0.15
D	0.08	0.17	0.09	0.16	0.09	0.15
E	0.12	0.16	0.13	0.16	0.12	0.14
F	0.13	0.13	0.16	0.15	0.17	0.14
G	0.12	0.17	0.13	0.16	0.13	0.16
H	0.15	0.14	0.15	0.12	0.14	0.11
I	0.28	0.21	0.24	0.16	0.24	0.15
J	0.20	0.18	0.20	0.16	0.20	0.15
K	0.39	0.24	0.23	0.12	0.39	0.20
L	0.36	0.18	0.37	0.16	0.38	0.15
M	0.31	0.20	0.32	0.18	0.32	0.17
N	0.28	0.12	0.29	0.11	0.29	0.10
Ñ	0.25	0.08	0.26	0.08	0.27	0.07

Tabla 4.9- Desplazamiento de fluencia y constante K de muros en estudio, sismo sintético suelo D

Muro	δ_{yD_1} [m]	K_{D_1}	δ_{yD_2} [m]	K_{D_2}	δ_{yD_3} [m]	K_{D_3}
A	0.06	0.17	0.06	0.16	0.07	0.17
B	0.07	0.15	0.08	0.16	0.08	0.15
C	0.11	0.17	0.12	0.17	0.14	0.18
D	0.07	0.14	0.07	0.13	0.07	0.12
E	0.11	0.16	0.12	0.15	0.13	0.15
F	0.15	0.16	0.17	0.15	0.19	0.16
G	0.09	0.13	0.15	0.20	0.17	0.20
H	0.25	0.24	0.27	0.23	0.28	0.21
I	0.28	0.21	0.29	0.20	0.29	0.18
J	0.22	0.20	0.24	0.20	0.24	0.18
K	0.19	0.12	0.26	0.14	0.45	0.22
L	0.26	0.13	0.37	0.16	0.34	0.14
M	0.20	0.13	0.23	0.13	0.26	0.14
N	0.28	0.12	0.27	0.10	0.27	0.09
Ñ	0.21	0.07	0.21	0.06	0.21	0.06

Donde δ_{yB} , δ_{yC} y δ_{yD} son los desplazamientos de fluencia de los suelos B, C y D respectivamente y K_B , K_C y K_D son las constantes de fluencias asociadas a los suelos B, C y D respectivamente.

Cabe mencionar que el subíndice (1,2 y 3) presentado en las tablas 4.7, 4.8 y 4.9, indican la curvatura de fluencia asociada que se está considerando.

1. $\phi_{y1} : \phi_y - 10\%$
2. $\phi_{y2} : \phi_y$
3. $\phi_{y3} : \phi_y + 10\%$

En las Figuras 4.18, 4.19 y 4.20 se presentan los resultados de los desplazamientos de fluencia asociados a las tres curvaturas de fluencia detalladas en Tabla 4.6; estos gráficos fueron obtenidos luego de someter los muros a las excitaciones sísmicas sintéticas obtenidas de acuerdo a los espectros de respuesta de los suelos B, C y D.

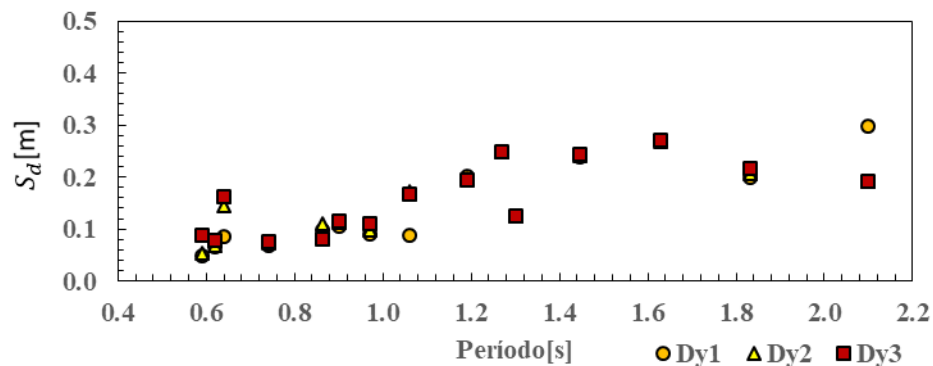


Figura 4.18. Desplazamiento de fluencia de muros versus períodos, registro sintético suelo tipo B

Desde la Figura 4.18 se observa que el desplazamiento de fluencia de los muros se encuentra en el rango de los 5 [cm] hasta los 30 [cm], para períodos en el intervalo de 0.59 [s] a 2.1 [s]. También se aprecia que los desplazamientos tienen una clara tendencia a aumentar hasta el período 1.63 [s], luego de este período se presenta una particularidad, debido a que el desplazamiento tiende a la baja, pasando de un desplazamiento de 27 [cm] a uno de 19 [cm].

También los desplazamientos obtenidos a partir de las tres curvaturas no presentan tanta dispersión, pero cabe destacar que existe una particularidad justo en el período de 2.1 [s] ya que se presenta una alta variación entre los resultados debido a que si se observa de la Figura 4.18 se obtiene que con la curvatura ϕ_1 se alcanza un desplazamiento de 30[cm], en cambio al considerar las curvaturas ϕ_2 o ϕ_3 se adquieren valores cercanos a los 19[cm], por lo tanto, el parámetro de la curvatura es un parámetro sensible a la hora de estimar el desplazamiento elástico en este punto.

Asimismo, para períodos cortos (entre 0.59 [s] y 1 [s]) existe menos dispersión en los resultados y la pendiente de la curva que se forma con los puntos no es tan pronunciada como en el caso de los períodos de mayor magnitud, donde la gráfica de puntos presenta una pendiente más alta y además los datos muestran una mayor dispersión con una correlación poco definida.

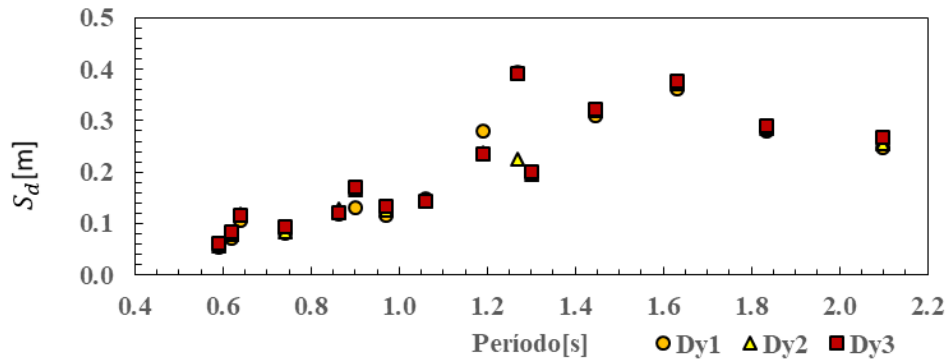


Figura 4.19. Desplazamiento de fluencia de muros versus períodos, obtenido con el registro sintético asociado al espectro del suelo tipo C

Se aprecia de la Figura 4.19 (suelo tipo C) que los desplazamientos de fluencia de los muros se encuentran en el rango 6 [cm] hasta 38 [cm] para períodos comprendidos en el intervalo de 0.59 [s] a 2.1 [s]. También, los desplazamientos elásticos o de fluencia tienen una clara tendencia a aumentar hasta el período 1.63 [s], luego de este período, al igual que con la excitación sísmica asociada al suelo tipo B, el comportamiento de los muros es similar, ya que se observa que el desplazamiento de fluencia presenta una leve tendencia a aumentar hasta el período de 1.63 [s] y posterior a este período el valor de este parámetro comienza a disminuir, puesto que de un desplazamiento de 38 [cm] llega hasta uno de 27 [cm].

Además, se visualiza de la Figura 4.19 que para períodos cortos (entre 0.59 [s] y 1 [s]) existe menos dispersión en los resultados y la pendiente de la curva no es tan pronunciada como en el caso de los períodos de mayor magnitud, donde la tendencia de los puntos presenta una pendiente más alta y además los datos presentan una mayor dispersión y una relación no tan definida. Cabe mencionar que los desplazamientos asociados a las tres curvaturas en casi todos los casos no difieren mucho entre uno u otro, pero se presenta una alta variación entre estas curvaturas para el período de 1.27 [s].

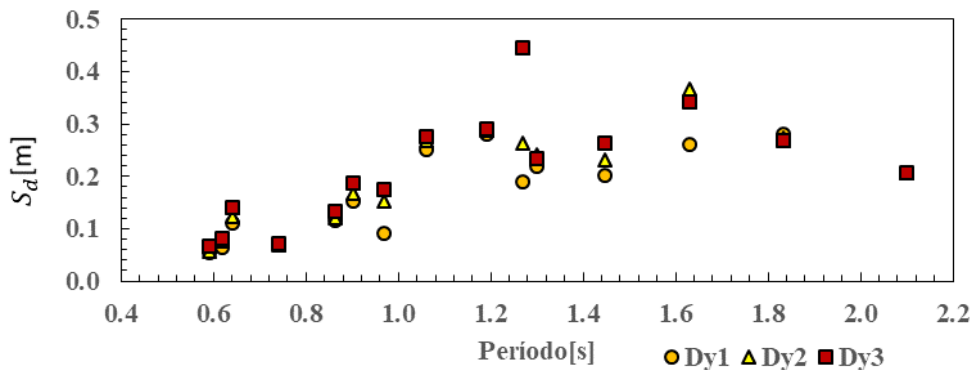


Figura 4.20. Desplazamiento de fluencia de muros vs períodos, sometidos a sismo sintético asociada al espectro elástico del suelo D

Para el suelo tipo D (ver Figura 4.20) los desplazamientos de fluencia de los muros se encuentran en el rango 7 [cm] hasta 36.7 [cm] para períodos en el intervalo de 0.59 [s] a 1.63 [s]. También se aprecia que ocurre lo mismo que en los otros dos análisis, debido a que los desplazamientos tienen una clara tendencia a aumentar hasta el período 1.63 [s] y luego de este período el desplazamiento comienza a disminuir llegando a tomar un valor de 0.2 [m] para el último período de mayor magnitud presentado en la Figura 4.20.

Cabe mencionar que al igual que en la Figura 4.19, para el período 1.27 [s] existe una mayor diferencia entre los resultados obtenidos con las distintas curvaturas, ya que para la curvatura ϕ_3 el desplazamiento de fluencia toma el valor de 45[cm], en cambio con las otras dos curvaturas ϕ_1 y ϕ_2 el desplazamiento adquiere los valores de 19 [cm] y 26[cm] respectivamente, por lo tanto en este caso el desplazamiento de fluencia es sensible al cambio de la curvatura de fluencia, incluso cuando existe poca variación en este parámetro.

Complementando las ideas expuestas con anterioridad, respecto a los resultados obtenidos con las tres curvaturas (ver Tabla 4.6), se obtiene que los desplazamientos elásticos difieren con mayor notoriedad cuando a los muros se le aplica la excitación sintética asociada al suelo tipo D en comparación con los registros asociados a los suelos B y C (esta variación se visualiza más notoriamente en los períodos comprendidos entre 0.9 [s] y 1.63 [s]). Por último, la excitación asociada al suelo tipo B es la que genera menores deformaciones en los muros en estudio.

Otro punto relevante por considerar es que no necesariamente la respuesta es mayor en estructuras más flexibles, ya que puede ocurrir que la excitación afecte en mayor medida a estructuras con períodos más cortos, tal como se observa en los tres gráficos de desplazamiento mostrados en las Figuras 4.18, 4.19 y 4.20, donde para el período de 1.6 [s] se obtienen desplazamientos mayores que para períodos más altos.

A continuación, en las Figuras 4.21, 4.22 y 4.23 se presentan las gráficas con los resultados obtenidos de la variable K asociada al desplazamiento de fluencia. Se comienza por presentar el grafico del registro sintético para el suelo tipo B.

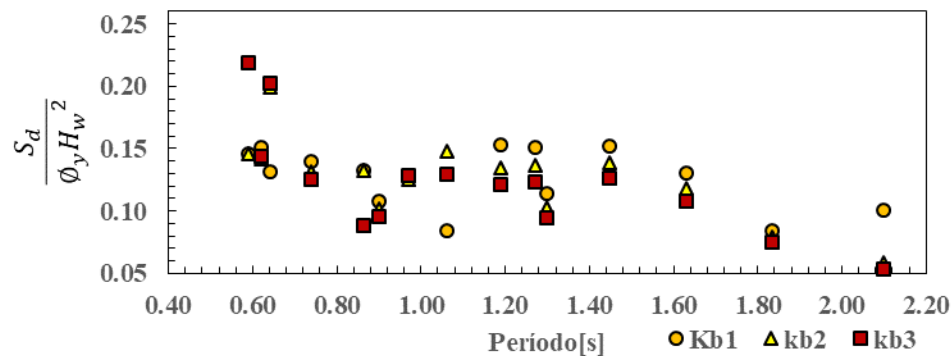


Figura 4.21. Constante K vs período, sometidos a sismo sintético asociada al espectro elástico del suelo B

De la Figura 4.21 se visualiza que a mayor período natural de vibración, la constante K es menor, llegando a considerarse cercana a cero en el período de 2.1 [s]. También a períodos más grandes, la constante K de la ecuación del desplazamiento de fluencia (ver ecuación (2-4)) va tomando valores más chicos, de manera contraria se aprecia para períodos pequeños una tendencia a valores colindantes a $K = 0.15$, existiendo una excepción a esta tendencia para los períodos más bajos (0.59 [s] y 0.66 [s]), ya que se tienen puntos que sobrepasan este valor.

Por otro lado, existe dispersión para los datos en períodos comprendidos de 0.59 [s] a 1.45 [s],

A continuación, en la Figura 4.22 se presenta el gráfico asociado al registro sintético del suelo tipo C.

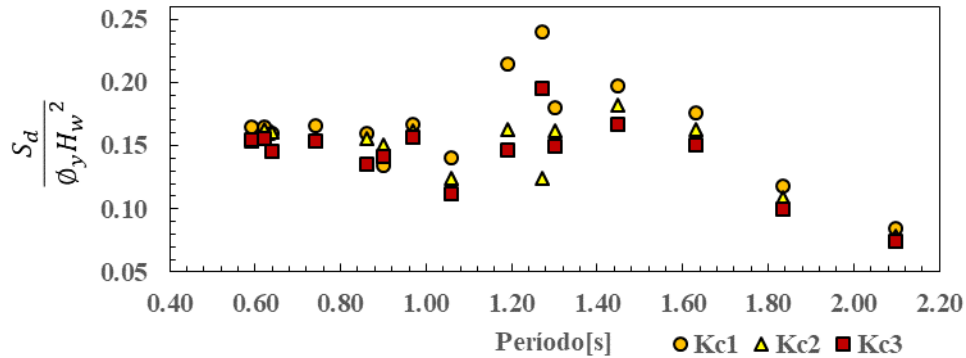


Figura 4.22. Constante K vs período, sometidos a sismo sintético asociada al espectro elástico del suelo C

Desde la Figura 4.22 se observa que, para períodos cortos existe una tendencia de $K = 0.15$, en cambio para períodos más largos la constante K de la ecuación del desplazamiento de fluencia va adquiriendo valores más pequeños; nuevamente, ocurre una excepción a esta tendencia para los períodos entre (1.19 [s] y 1.45 [s]) ya que se obtienen puntos que sobrepasan este valor.

De igual manera que en las Figuras 4.20 y 4.21 se observa que existe dispersión para los datos en períodos comprendidos en el rango de 1.06 [s] a 1.45 [s]. Por lo tanto, se deduce que a períodos intermedios el cambio en la curvatura de fluencia es de gran relevancia en la estimación del desplazamiento de fluencia, puesto que incluso un leve cambio en esta genera una gran discrepancia en el valor del desplazamiento de fluencia.

Por último, en la Figura 4.23 se presenta el gráfico asociado al registro sintético del suelo tipo D.

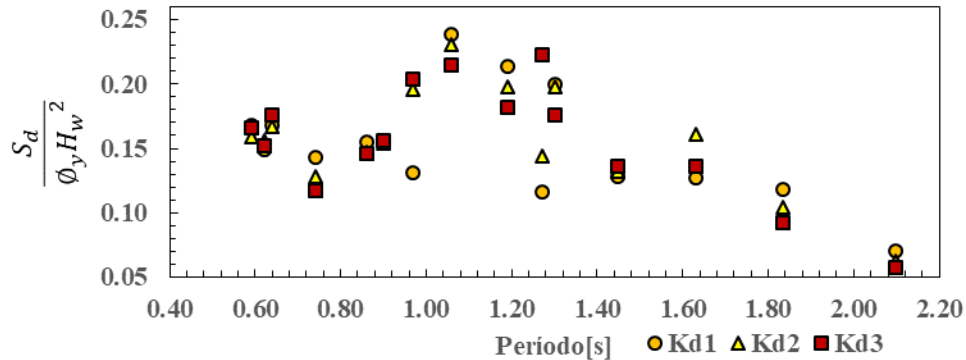


Figura 4.23. Constante K vs período, sometidos a sismo sintético asociada al espectro elástico del suelo D

De la Figura 4.23 se obtiene que en muros flexibles (períodos de 1.63[s] a 2.1[s]), la constante K de fluencia alcanza números muy pequeños, ya que de un valor de $K = 0.16$ disminuye a $K = 0.06$ siguiendo una tendencia a una línea recta, en cambio para períodos de menor magnitud el gráfico no presenta una tendencia definida, debido a que existe gran dispersión en los resultados, sobre todo en períodos entre 0.64 [s] y 1.63 [s].

De manera general de las Figuras 4.21, 4.22 y 4.23 se obtiene que los valores de la constante K en el suelo tipo C y D presentan mayores valores en períodos intermedios (de 1 [s] a 1.4 [s]), con valores cercanos a $K = 0.25$.

Además, los puntos presentan una tendencia lineal desde el período 1.06 [s] hasta el período 2.1 [s], con valores que van desde $K = 0.24$ a $K = 0.06$.

Por último, en las Figuras 4.24 y 4.25 se muestran las gráficas con los resultados del desplazamiento elástico y de la constante de fluencia para todos los tipos de suelos considerados, con el objetivo de determinar visualmente si existe alguna relación entre los resultados obtenidos con los distintos registros.

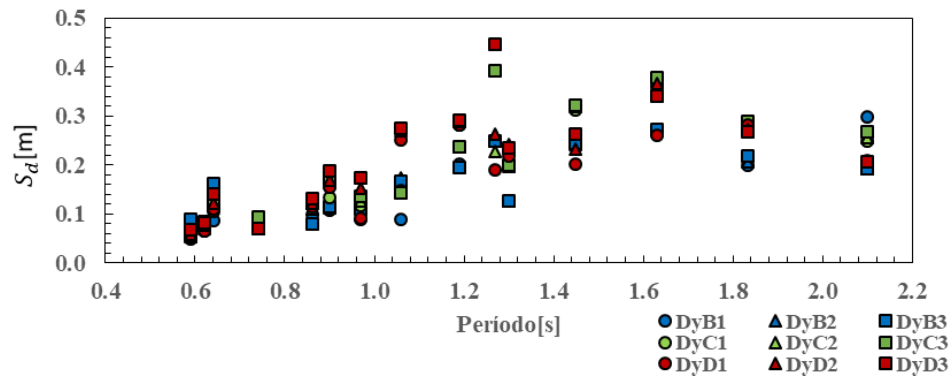


Figura 4.24. Desplazamiento de fluencia en función de los períodos, utilizando los registros sísmicos compatibles con el espectro de los suelos B, C y D.

Se infiere desde la Figura 4.24 que el comportamiento de los muros sometidos a los registros sísmicos compatibles con los espectros de los suelo B, C y D es similar, ya que en un principio para períodos cortos existen deformaciones muy pequeñas, luego se presenta una tendencia del desplazamiento elástico a aumentar de manera lineal hasta el período 1.2 [s], asimismo, se presenta un punto de inflexión en el gráfico en el período de 1.27 [s] debido a que los valores comienzan a disminuir para luego aumentar nuevamente hasta el período de 1.63 [s] y posteriormente disminuir hasta el período 2.1 [s]. Respecto a este último comentario se puede afirmar que no se debe asumir que en estructuras con períodos más largos las deformaciones serán mayores en comparación con las estructuras rígidas.

Por otro lado, en casi todos los muros las mayores deformaciones se presentaron para el registro sintético asociado al suelo tipo D y los desplazamientos de menor magnitud se mostraron cuando los muros fueron sometidos al registro sísmico compatible con el espectro del suelo tipo B. Además, desde la Figura 4.24 se aprecia que existe mayor dispersión en los resultados en períodos entre 1.19 [s] y 1.63 [s].

Luego de los análisis realizados a los muros con registros sísmicos sintéticos, se obtuvo que la respuesta dinámica de los muros se ve influenciada en gran medida al variar la excitación sísmica, esto quiere decir, que el comportamiento que tendrán los muros está directamente relacionado con las características de la excitación. Debido a que, si bien los muros presentan la misma geometría y propiedades físicas, el comportamiento dinámico no es el mismo, puesto que de la Figura 4.24 se obtiene que los muros al ser sometidos a registros sísmicos distintos, las deformaciones obtenidas no son las mismas, esta variación se aprecia con mayor claridad para períodos comprendidos entre 1 [s] y 1.6 [s].

En la Figura 4.35 se presentan los resultados de la constante K en función del período de los muros considerando los tres registros sintéticos creados.

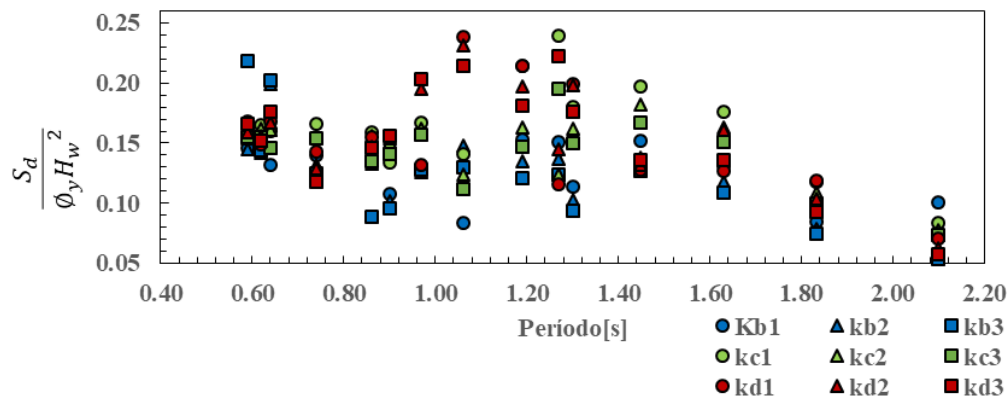


Figura 4.25. Constante de fluencia en función de los períodos, utilizando los registros sísmicos sintéticos compatibles con el espectro de los suelos B, C y D.

De la Figura 4.25 se aprecia que existe gran dispersión en los resultados para períodos comprendidos entre 0.86 [s] a 1.3 [s], por lo que no se tiene relación definida entre los distintos tipos de suelo en este rango de períodos. Por otro lado, se visualiza una tendencia a una línea recta con pendiente negativa luego del período 1.3 [s], esta recta toma el valor 0.20 para el período de 1.3 [s] y luego llega a un valor de la constante del desplazamiento de fluencia casi despreciable en el período 2.1 [s], ya que el valor de la constante es cercano a cero. Además, gran parte de los muros presenta menores valores para la constante K con el registro sísmico compatible con el espectro del suelo tipo B, por otro lado, los mayores valores para la constante, en general, se obtienen con el registro sísmico sintético compatible con el espectro del suelo tipo D.

Si bien en ambas graficas se obtienen comportamientos similares, no se puede asumir que existe una relación clara y definida entre los resultados obtenidos con los tres registros, debido a que existen variaciones entre un valor u otro dependiendo de la excitación, sobre todo en períodos intermedios.

Cabe mencionar que, si se tomaran en consideración las fórmulas empíricas mencionadas en el Capítulo II para estimar el desplazamiento de fluencia, el valor del desplazamiento se sobre estimaría en gran medida en períodos altos, ya que estas ecuaciones tienen valores como $K = 0.275$ (carga triangular invertida), $K = 0.33$ (carga puntual), entre otras. Cabe destacar que estos son valores que se encuentran muy alejados de los datos obtenidos en este trabajo, sobre todo cuando se consideran períodos altos. En consecuencia, si el diseñador en el diseño a flexo-compresión del muro, específicamente en el detalle de los elementos de borde, considera estas relaciones en la estimación del desplazamiento de fluencia, se obtendrían menores extensiones de los elementos de borde e incluso en algunos casos el diseñador podría determinar no confinar el muro, debido que se sobreestimaría la capacidad de deformación del muro.

4.3.2. Desplazamiento de fluencia con registros sísmicos naturales

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del desplazamiento de fluencia versus el período natural de los muros en estudio. Estos resultados se obtuvieron luego de aplicar los registros sísmicos del terremoto del Maule del año 2010 (ver sección 4.1.2. “Registros Naturales”).

En las Tablas 4.10, 4.11 y 4.12, se presentan los principales resultados obtenidos del desplazamiento de fluencia y el parámetro K .

Tabla 4.10- Desplazamiento de fluencia y constante K de muros en estudio, sismo natural suelo B

Muro	δ_{yB_1} [m]	K_{B_1}	δ_{yB_2} [m]	K_{B_2}	δ_{yB_3} [m]	K_{B_3}
A	0.07	0.20	0.07	0.20	0.07	0.18
B	0.07	0.15	0.08	0.16	0.09	0.16
C	0.12	0.18	0.12	0.16	0.14	0.18
D	0.09	0.18	0.09	0.17	0.10	0.16
E	0.08	0.11	0.08	0.10	0.19	0.21
F	0.11	0.12	0.11	0.11	0.12	0.10
G	0.09	0.13	0.10	0.13	0.10	0.12
H	0.14	0.13	0.23	0.20	0.21	0.16
I	0.16	0.12	0.19	0.13	0.16	0.10
J	0.13	0.11	0.13	0.10	0.13	0.09
K	0.18	0.11	0.22	0.12	0.18	0.09
L	0.19	0.09	0.16	0.07	0.16	0.06
M	0.21	0.13	0.21	0.12	0.17	0.09
N	0.22	0.09	0.28	0.11	0.33	0.11
Ñ	0.19	0.07	0.19	0.06	0.29	0.08

Tabla 4.11- Desplazamiento de fluencia y constante K de muros en estudio, sismo natural suelo C

Muro	δ_{yC_1} [m]	K_{C_1}	δ_{yC_2} [m]	K_{C_2}	δ_{yC_3} [m]	K_{C_3}
A	0.06	0.17	0.07	0.20	0.08	0.21
B	0.08	0.19	0.09	0.18	0.09	0.16
C	0.14	0.21	0.15	0.20	0.16	0.20
D	0.08	0.16	0.11	0.20	0.11	0.19
E	0.12	0.17	0.13	0.16	0.18	0.20
F	0.24	0.24	0.24	0.22	0.26	0.21
G	0.12	0.17	0.13	0.17	0.11	0.13
H	0.16	0.15	0.19	0.17	0.22	0.17
I	0.21	0.16	0.28	0.19	0.28	0.18
J	0.09	0.08	0.10	0.08	0.10	0.08
K	0.31	0.19	0.32	0.18	0.17	0.09
L	0.18	0.09	0.18	0.08	0.19	0.07
M	0.14	0.09	0.14	0.08	0.14	0.07
N	0.37	0.16	0.37	0.14	0.36	0.13
Ñ	0.38	0.13	0.38	0.11	0.38	0.10

Tabla 4.12- Desplazamiento de fluencia y constante K de muros en estudio, sismo natural suelo D

Muro	δ_{yD_1} [m]	K_{D_1}	δ_{yD_2} [m]	K_{D_2}	δ_{yD_3} [m]	K_{D_3}
A	0.03	0.08	0.03	0.08	0.03	0.07
B	0.05	0.12	0.05	0.11	0.05	0.09
C	0.06	0.09	0.08	0.11	0.10	0.12
D	0.04	0.08	0.04	0.07	0.04	0.07
E	0.05	0.07	0.04	0.05	-	-
F	0.10	0.10	0.10	0.09	0.11	0.09
G	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04
H	0.05	0.05	0.09	0.08	0.09	0.07
I	0.08	0.06	0.08	0.06	0.09	0.06
J	0.06	0.06	0.01	0.01	-	-
K	0.07	0.04	0.08	0.04	0.04	0.02
L	0.34	0.17	0.37	0.16	0.39	0.15
M	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02
N	0.15	0.09	0.15	0.06	0.15	0.05
Ñ	0.25	0.09	0.26	0.08	0.25	0.07

A continuación, en las Figuras 4.26, 4.27 y 4.28 se presentan los gráficos de desplazamiento de fluencia versus período natural de los muros.

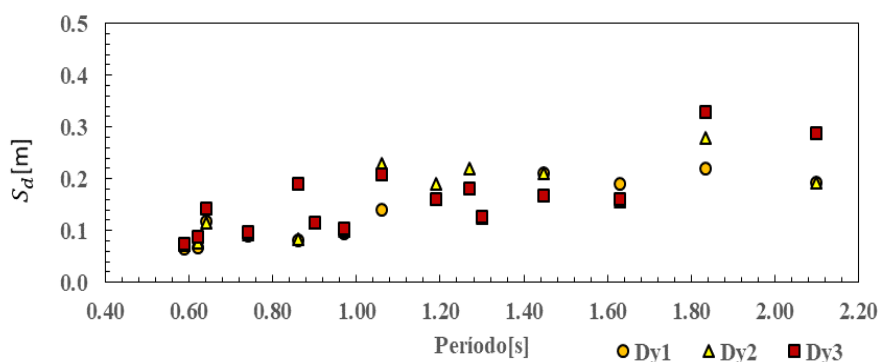


Figura 4.26 Desplazamiento de fluencia de muros vs períodos, sismo natural ocurrido en Talca-Suelo B

Se observa de la Figura 4.26 que los valores de los desplazamientos de fluencia de los muros se localizan en el rango de 7 [cm] hasta 29[cm] para períodos en el intervalo de 0.59[s] a 2.1[s]. También, los desplazamientos aumentan formando una recta, lo que refleja un comportamiento más estable en comparación con el análisis realizado con registros sintéticos, donde se presenta una recta similar con pendiente positiva, pero luego posee un punto de inflexión en el período de 1.63[s] que produce el cambio de pendiente positiva a pendiente negativa y por ende los valores de desplazamiento comienzan a disminuir para los períodos altos, lo que no ocurre en este caso.

La Figura 4.27 muestra los resultados del desplazamiento de fluencia versus el período de los muros analizados, obtenidos con el registro sísmico natural de la estación ubicada en Maipú asociada a un suelo tipo C.

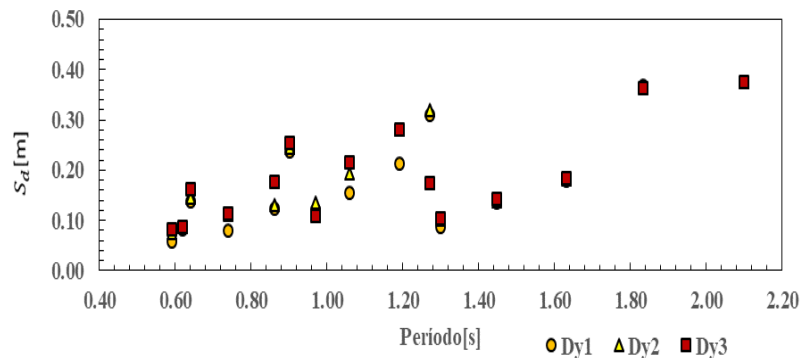


Figura 4.27 Desplazamiento de fluencia de muros vs períodos, sismo natural ocurrido en Maipú-Suelo C

El desplazamiento elástico de los muros se encuentra desde 7.4[cm] hasta 37.6 [cm] a lo largo del rango de períodos considerados. También, desde la Figura 4.27 se obtiene que los desplazamientos de fluencia aumentan hasta el período 1.27[s], posteriormente se presenta una excepción a esta predisposición, debido a que el desplazamiento tiende a la baja, ya que de un desplazamiento de 32[cm] llega hasta uno de 10[cm] entre períodos de 1.27[s] y 1.3[s], comportamiento similar al obtenido con la excitación sísmica asociada al espectro elástico del suelo B, C y D. Posterior a este período el desplazamiento de fluencia vuelve a aumentar de 10[cm] hasta 37.6[cm].

Por otro lado, los desplazamientos elásticos que se obtienen de utilizar las tres curvaturas de fluencia difieren en mayor medida cuando a los muros se le aplica la excitación asociada al espectro del suelo C, variación que se visualiza en los períodos comprendidos entre 1.06[s] y 1.27[s]. Al igual que en la Figura 4.26, para el período 1.27 [s] existe una mayor diferencia entre los resultados obtenidos, ya que para la curvatura ϕ_3 el desplazamiento de fluencia alcanza el valor de 17[cm], en cambio con las otras dos curvaturas ϕ_1 y ϕ_2 el desplazamiento adquiere los valores de 31[cm] y 32[cm] respectivamente.

Por último, en la Figura 4.28 se presentan los resultados del desplazamiento de fluencia vs el período, obtenidos del registro sísmico natural de la estación ubicada en Angol asociada al suelo D.

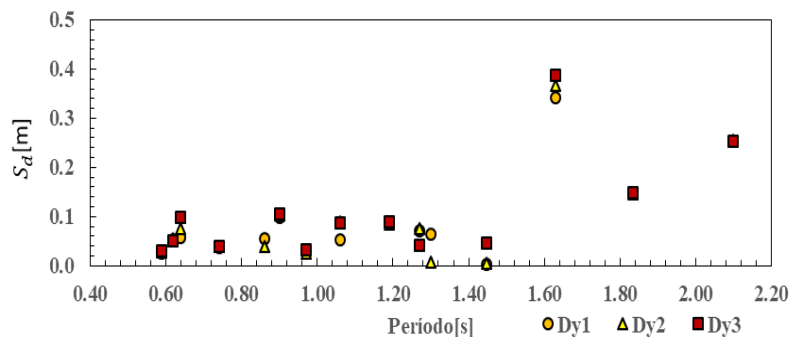


Figura 4.28. Desplazamiento de fluencia de muros vs períodos, sismo natural ocurrido en Angol-Suelo D

De la Figura 4.28 se obtiene que los desplazamientos elásticos de los muros están comprendidos desde los 3[cm] hasta 38.8 [cm] para períodos en el intervalo de 0.59[s] a 2.1[s]. También existe una tendencia definida para períodos cortos debido a que se obtienen valores de 10[cm], posterior al período 1.4 [s] no se aprecia una

tendencia definida, puesto que existe un peak en el período de 1.63[s] y subsiguientemente este desplazamiento disminuye. Cabe mencionar que para este análisis en particular existe poca variación en los resultados al utilizar una curvatura u otra, por ende, la variación en la curvatura de fluencia no es de gran relevancia.

También, desde las tres Figuras 4.26, 4.27 y 4.28 se obtiene que los resultados conseguidos con el registro sísmico asociado al suelo D-Angol, es el que presenta las menores deformaciones de los análisis. Además, en muros flexibles el desplazamiento de fluencia es mayor en los análisis realizados con los registros sísmicos del suelo C y D, y en cuanto a estructuras con períodos más cortos existen resultados similares en los tres análisis.

A continuación, en las Figuras 4.29, 4.30 y 4.31 se presentan las gráficas de la constante K vs el período natural de los muros. Se comienza por presentar la Figura 4.29, grafico asociado al registro natural del suelo B.

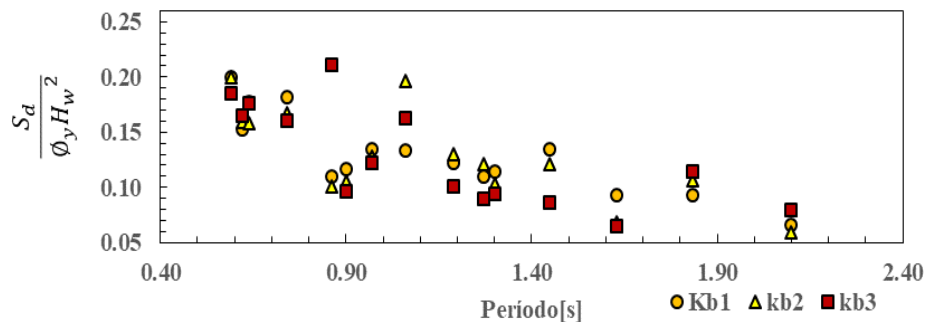


Figura 4.29. Constante K vs período, registro sísmico natural asociado al suelo B

De la Figura 4.29 al igual que de los resultados obtenidos con registros sintéticos se visualiza que a mayor período natural de vibración el valor de la constante K es menor. Por otro lado, los valores de la constante K están en el rango de valores de $K = 0.06$ a $K = 0.20$ y se aprecia una tendencia a una recta, cabe destacar que existen resultados que se alejan de esta, como en el caso de los períodos comprendidos entre 0.86[s] y 1.06[s].

En la Figura 4.30 se presenta los resultados obtenidos del parámetro K con el sismo natural de Maipú.

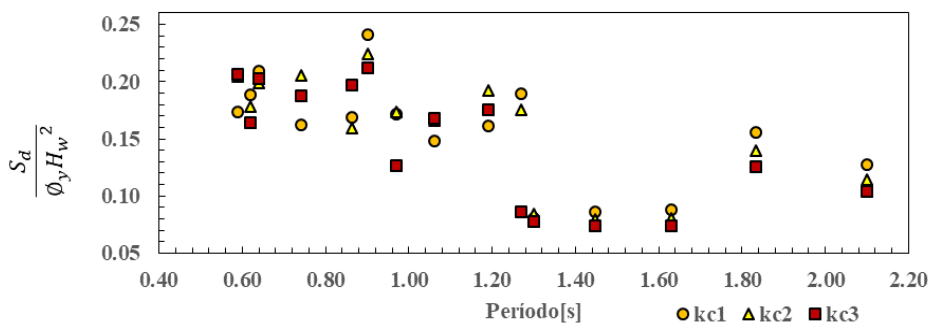


Figura 4.30. Constante K vs período, registro sísmico natural asociado al suelo C

De la Figura 4.30 se obtiene para períodos bajos entre 0.59[s] y 1.27[s] que los valores de la constante K están entre 0.13 y 0.24, luego en el rango de períodos entre 1.27[s] y 1.63[s] la constante toma los valores de 0.08 y posteriormente para períodos mayores (1.83[s] a 2.1[s]) estas constantes están entre 0.16 y 0.13.

Por otro lado, existe dispersión para los datos en períodos comprendidos en el rango de 0.59[s] a 1.19[s], por lo tanto, se infiere al igual que con los resultados obtenidos con los registros reales que en periodos intermedios

el cambio en los desplazamientos considerando distintas curvaturas de fluencia es de gran relevancia, puesto que un leve cambio de estas variables genera discrepancia en los resultados.

Por último, en la Figura 4.31 se presentan los resultados de la constante K en función del período para el registro de Angol.

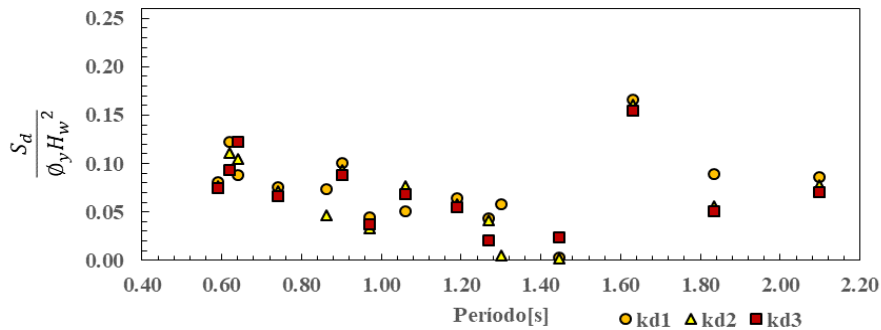


Figura 4.31. Constante K vs período, registro sísmico natural asociado al suelo D

Desde la Figura 4.31 la constante K está entre el valor de 0.01 a 0.15 en periodos en el rango de 0.59[s] a 2.1[s]. Se obtiene que no existe una tendencia definida para los valores del desplazamiento de fluencia, ya que si bien para periodos cortos existe una tendencia a una recta con datos de 0.1 a casi cero para el período 1.4 [s], luego existe un peak en el período de 1.63[s] donde K presenta un valor de 0.15 y posteriormente esta constante disminuye. Asimismo, existen pocas diferencias en los resultados al utilizar una curvatura u otra, por lo cual para este análisis la variación en la curvatura de fluencia no es de gran importancia. Por último, se considera que cuando los muros son sometidos a los registros sísmicos asociados al suelo D se obtienen menores valores de K para periodos cortos en comparación con los datos obtenidos con los otros dos registros (Figuras 4.30 y 4.29).

Para complementar la información en la Figura 4.32 se presentan dos gráficos con los resultados obtenidos de los desplazamientos de fluencia utilizando todos los registros sísmicos naturales, con el objetivo de visualizar si existe alguna correlación gráfica.

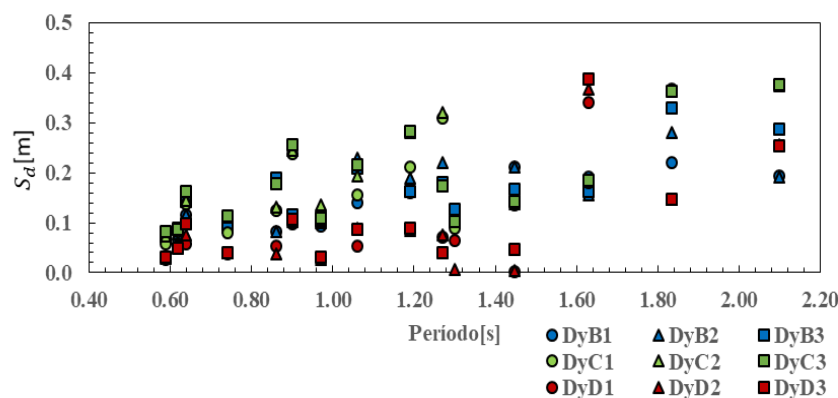


Figura 4.32. Desplazamiento de fluencia en función de los períodos, utilizando los registros sísmicos naturales asociados a los suelos B, C y D.

Se visualiza de la Figura 4.32 que las respuestas dinámicas obtenidas con los tres registros presentan una tendencia a aumentar e incluso se aprecia una tendencia a una recta, pero existe gran discrepancia en los datos, por ejemplo: si se observa la Figura 4.32 se obtienen mayores desplazamientos en el caso de los resultados derivados con el registro sísmico de Maipú-suelo C, para casi todos los muros en estudio, a excepción del

período 1.64[s], donde la respuesta sísmica asociada al acelerograma de Angol-suelo D presenta mayores deformaciones. Igualmente, el registro sísmico que genera las menores deformaciones para el rango de períodos comprendidos entre 0.59[s] y 1.3[s], es el ocurrido en Angol-sueloD.

Con estas observaciones nuevamente se puede afirmar que la respuesta dinámica de los muros está directamente relacionada con el tipo de demanda sísmica, también se puede afirmar que si bien existen tendencia a una recta esta podría no ser representativa del fenómeno, debido a que considerar una aproximación de este tipo, presentaría poca correlación ya que existen muchos puntos que se escapan de esta recta y también porque sobreestimaría en gran parte los desplazamientos de fluencia y como se ha mencionado en los capítulos anteriores esto conduce a errores importantes en la estimación de este parámetro.

De manera similar, en la Figura 4.33 se presentan los resultados obtenidos de la constante K en función del período de los muros considerando los tres registros naturales.

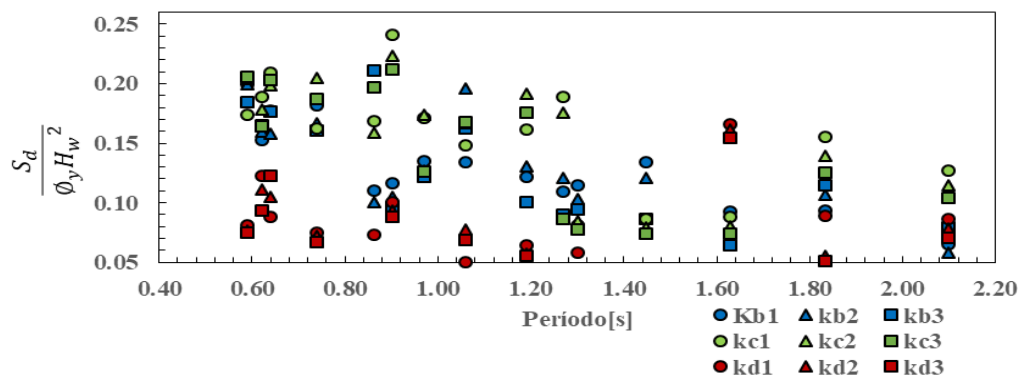


Figura 4.33. Constante de fluencia en función de los períodos, utilizando los registros sísmicos naturales asociados a los suelos B, C y D.

Desde la Figura 4.33 se obtiene que no existe una tendencia definida, puesto que el rango de valores es muy extenso, ya que para un mismo período la constante K puede presentar el valor de 0.05 y 0.20 al mismo tiempo.

Notar desde la Figura 4.33 que existe una mayor variación en la constante del desplazamiento de fluencia con los resultados obtenidos mediante los registros naturales en comparación con los resultados derivados de los registros sintéticos, esto se debe a que los registros naturales presentan mayores diferencias entre uno y otro; ya que poseen distinto contenido de frecuencias, aceleraciones máximas, duración y espectros.

Si bien los resultados de esta constante obtenidos con registros sísmicos sintéticos presentan una tendencia más clara de los datos, este comportamiento se debe principalmente a la condición de que el espectro de respuesta fuese compatible con el de la normativa chilena y es por ello que el comportamiento de los muros es similar utilizando los acelerogramas obtenidos con los espectros de los suelos B y C, debido a que ambos suelos presentan espectros con formas similares, amplitudes máximas cercanas y contenidos de frecuencias parecidas.

4.3.3. Influencia del contenido de frecuencias dominantes de la excitación en la estimación del desplazamiento de fluencia

Desde los resultados anteriormente expuestos se observa que cada muro respondió de manera diferente, esta variación en la respuesta se debió a que cada muro analizado poseía diferentes cualidades físicas tales como: período fundamental (frecuencia natural), altura, masa, entre otros.

Una observación importante de los resultados es que cada muro, incluso teniendo las mismas propiedades físicas, presentó variación en la respuesta, esto se debe a que cada excitación sísmica tiene diferentes cualidades dinámicas tales como: aceleración máxima, duración del sismo y contenido de frecuencias. Respecto de este último punto, distintos estudios han demostrado que el contenido de frecuencias de los registros es fundamental para estimar los daños de una estructura, como, por ejemplo:

Orosco y Alfaro (2007):

“Además de los valores máximos y la duración efectiva de los sismos, el contenido de frecuencias es decisivo para determinar el potencial destructivo de los sismos”.

Debido a que el contenido de frecuencias de la excitación está directamente relacionado con la respuesta de las estructuras de hormigón armado [31], se optó por relacionar el contenido de frecuencias de los sismos con la frecuencia natural de vibración de los muros en estudio.

4.3.3.1. Contenido de frecuencias de los registros sísmicos sintéticos

Para determinar el contenido de frecuencias de los registros se utiliza la Transformada Rápida de Fourier (FAS), ya que permite representar en el dominio de las frecuencias una función que inicialmente estaba en el dominio del tiempo. Cabe mencionar que si la frecuencia de la excitación es cercana a la frecuencia natural del muro se producirá lo que se conoce con el nombre de amplificación dinámica, que se define como el aumento de la respuesta cuando la frecuencia de la excitación es cercana a la de la frecuencia natural de la estructura.

Las gráficas de contenidos de frecuencias para cada registro sintético se presentan en las Figuras 4.34, 4.35 y 4.36.

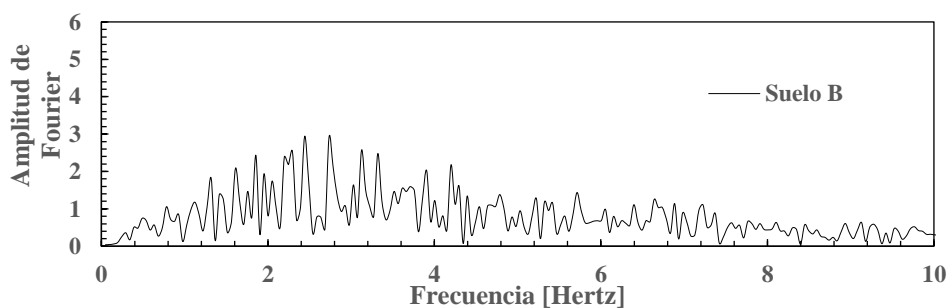


Figura 4.34. Amplitud de Fourier vs frecuencia, registro sísmico sintético suelo B

Desde la Figura 4.34 se visualiza que las frecuencias dominantes del registro asociado al suelo tipo B se encuentran en el rango de 1.6 a 3.3 Hertz.

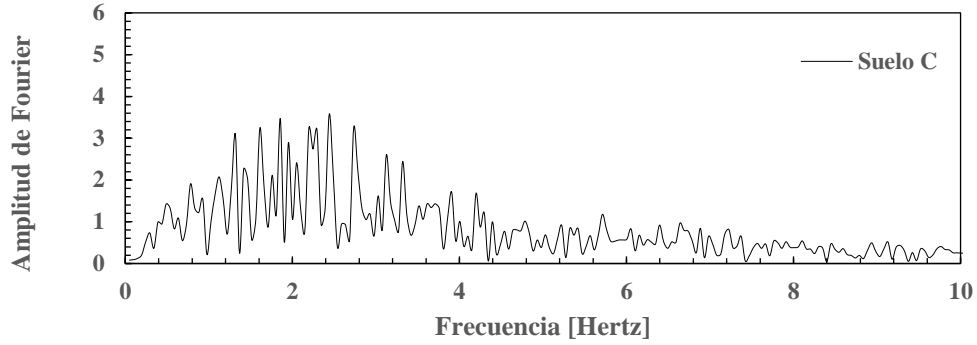


Figura 4.35. Amplitud de Fourier vs frecuencia, registro sísmico sintético suelo C

En la Figura 4.35 se observa que las frecuencias dominantes del registro sintético asociado al suelo C se encuentran entre 1 a 3.3 Hertz.

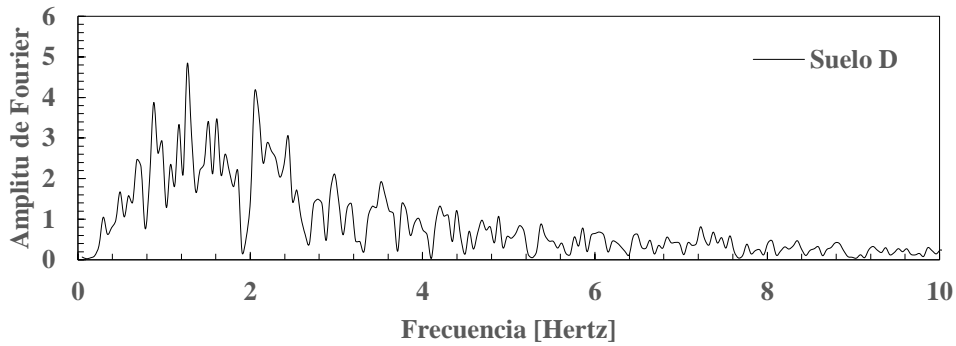


Figura 4.36: Amplitud de Fourier vs frecuencia, registro sísmico sintético suelo D

Por último, desde la Figura 4.36 se tiene que las frecuencias dominantes del registro sísmico sintético asociadas al suelo D están entre 0.3 a 3.5 Hertz.

De las Figuras 4.34, 4.35 y 4.36, se obtiene que existen rangos acotados para las frecuencias dominantes de los registros (frecuencias que generan las máximas amplitudes), por lo tanto, se puede definir una frecuencia como dominante a lo largo del registro y estas se muestran en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13- Frecuencias y períodos asociados a la máxima amplitud del gráfico de contenido de frecuencias de la excitación sísmica sintética

Tipo de suelo	Frecuencia [Hertz]	Período [s]
Suelo B	2.93	0.41
Suelo C	2.44	0.41
Suelo D	1.27	0.79

Una vez obtenidas las frecuencias dominantes de los registros, se dividió el período natural de vibración del muro por el período asociado a la frecuencia dominante, con el objetivo de ilustrar como esto influye en la correlación de los datos. En las Figuras 4.37, 4.38 y 4.39 se presentan las gráficas del desplazamiento de fluencia versus la relación entre los períodos descritos anteriormente.

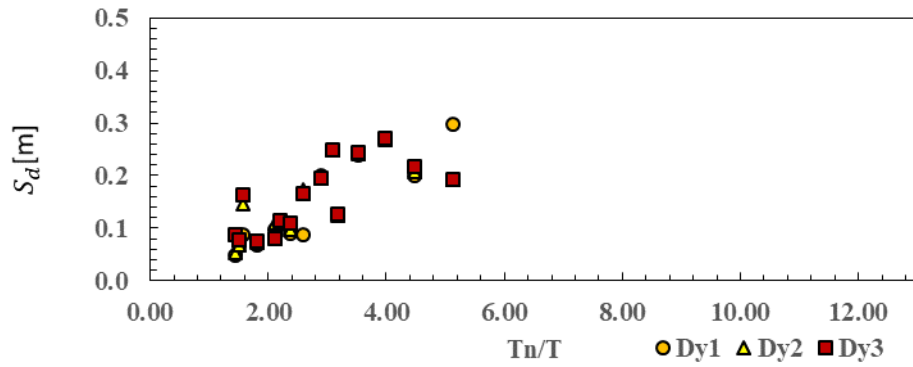


Figura 4.37- Desplazamiento de fluencia vs relación entre períodos, registro sísmico sintético suelo B

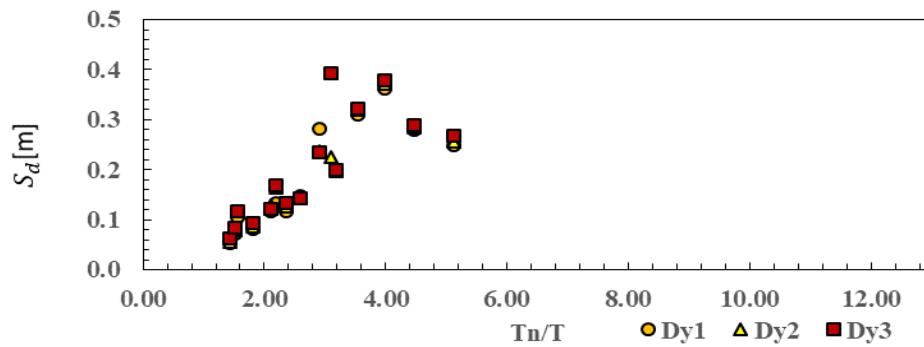


Figura 4.38- Desplazamiento de fluencia vs relación entre períodos, registro sísmico sintético suelo C

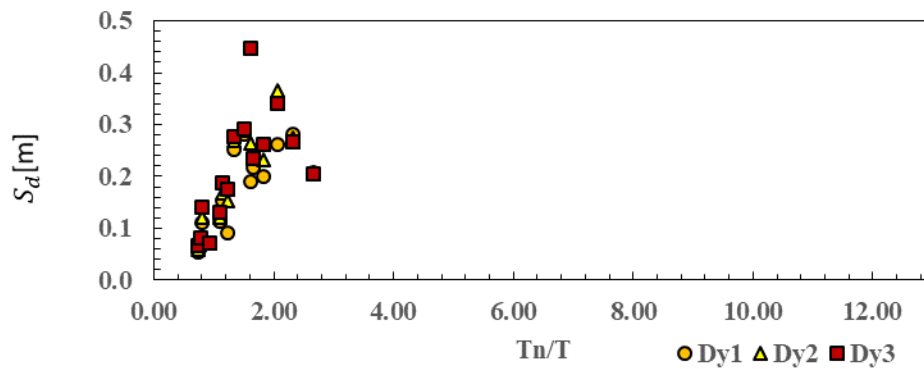


Figura 4.39- Desplazamiento de fluencia vs relación entre períodos, registro sísmico sintético suelo D

Como se observa de las Figuras 4.37, 4.38 y 4.39, al considerar el parámetro del suelo la dispersión en los datos disminuye, debido a que los puntos de las gráficas tienden a juntarse, formando una curva más definida. También se visualiza que cuando la relación entre períodos es más pequeña (cercana a 1) los puntos presentan una tendencia a aumentar y la correlación entre los resultados es más clara, en cambio cuando la relación entre los períodos es mayor las curvas presentan gran dispersión e incluso cambian su comportamiento. Por lo tanto, a primera vista se puede considerar que mientras menos se parezcan las frecuencias dominantes de los registros a la frecuencia natural del modo fundamental, el comportamiento es menos predecible.

Es por ello que una buena forma de estimar el desplazamiento de fluencia podría ser considerar las frecuencias fundamentales de los registros, ya que como se observó de las Figuras 4.34, 4.35 y 4.36 el comportamiento de los muros depende en gran medida de este parámetro.

Por otro lado, en las Figuras 4.40, 4.41 y 4.42 se presentan las gráficas de la constante K versus la relación entre períodos descrita con anterioridad.

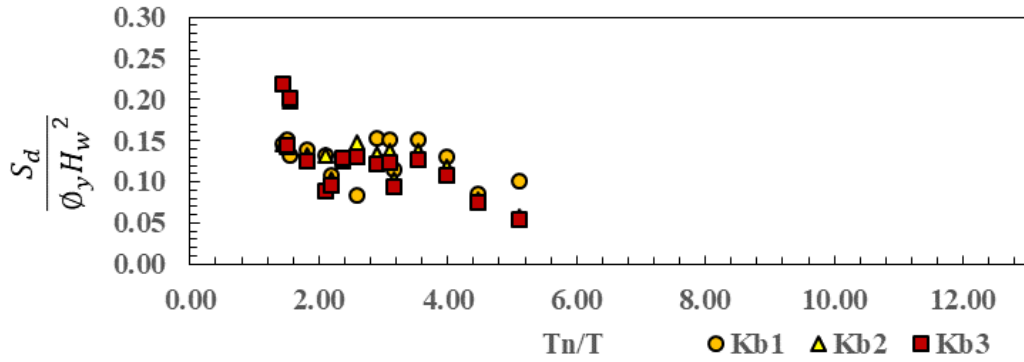


Figura 4.40. Constante K vs relación entre períodos, registro sísmico suelo B

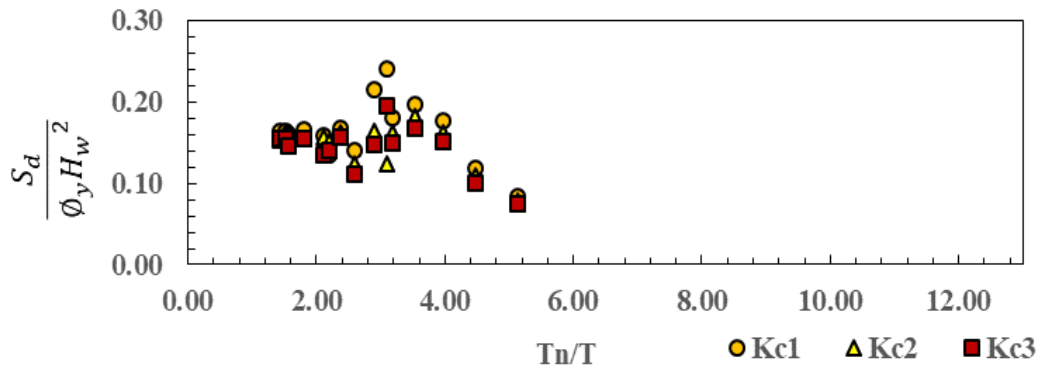


Figura 4.41. Constante K vs relación entre períodos, registro sísmico suelo C

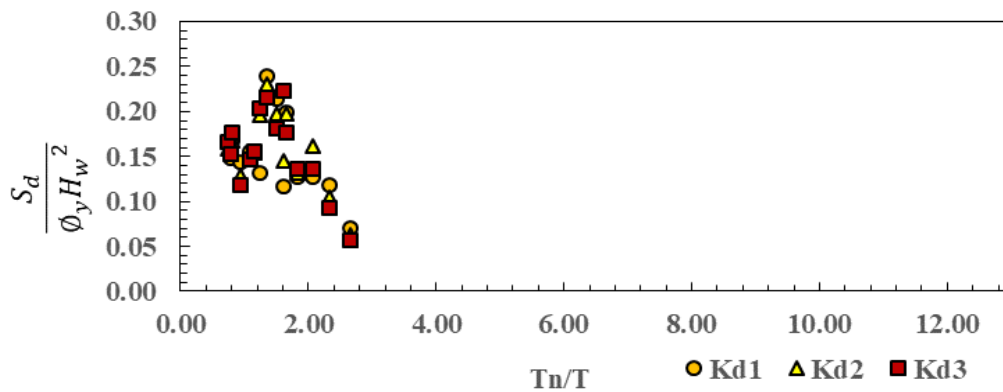


Figura 4.42. Constante K vs relación entre períodos, registro sísmico suelo D

Como se aprecia de las Figuras 4.40, 4.41 y 4.42, al considerar las frecuencias dominantes de los registros la dispersión disminuye considerablemente. Además, se observa que la constante K es inversamente proporcional a la relación entre períodos; por ende, mientras este valor se acerque más a uno, K será de mayor dimensión. Esto se produce debido a que cuando los periodos son pequeños y ocurre que la frecuencia natural de la excitación y frecuencia natural fundamental del muro se asemejan, los muros responderán en el primer modo de vibración, lo que produce que la distribución de cargas se vea como una carga triangular invertida, lo que se verá reflejado en valores más altos en la constante. Esto se demostró en el Capítulo II, ya que se ilustró que a medida que la distribución de cargas se vuelve más compleja; como en el caso de la carga parabólica mostrada en el ejemplo 1, Figura 2.3 (a), los valores se vuelven más pequeños.

4.3.3.2. Contenido de frecuencias registros sísmicos naturales

De manera análoga se repiten los análisis con los registros sísmicos naturales es por ello que a continuación, en las Figuras 4.43, 4.44 y 4.45 se presentan las gráficas del contenido de frecuencias de los registros truncados mostrados en la sección 4.3.2 asociados a los tres tipos de suelo.

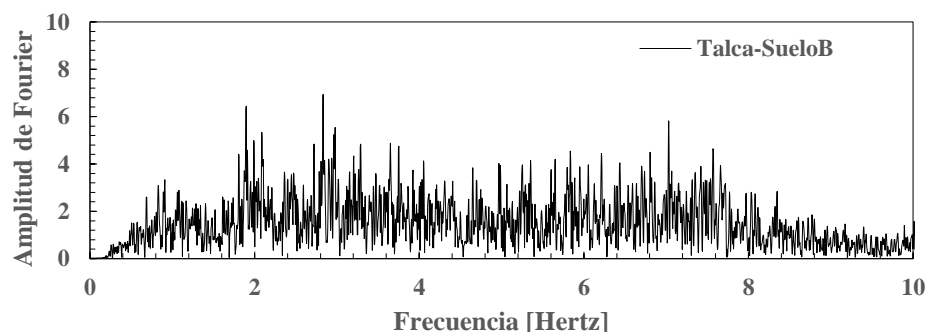


Figura 4.43. Amplitud de Fourier vs frecuencia, registro sísmico natural suelo B

De la Figura 4.43 se obtiene que las frecuencias dominantes del registro sísmico de Talca presentan un rango muy extenso de 1.8 a 7.5 Hertz, por lo tanto, es difícil definir una frecuencia como dominante.

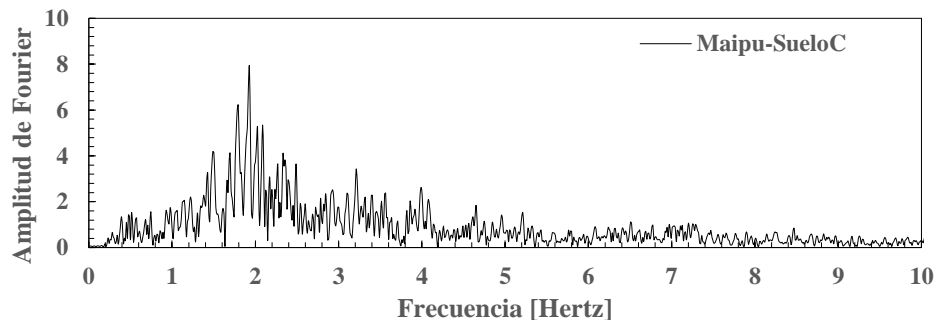


Figura 4.44. Amplitud de Fourier vs frecuencia, registro sísmico natural suelo C

Desde la Figura 4.44 se observa que las frecuencias dominantes del registro sísmico de Maipú se encuentran entre 1.5 a 2.5 Hertz, y se aprecia claramente que la frecuencia dominante está cercana a 2 [Hertz].

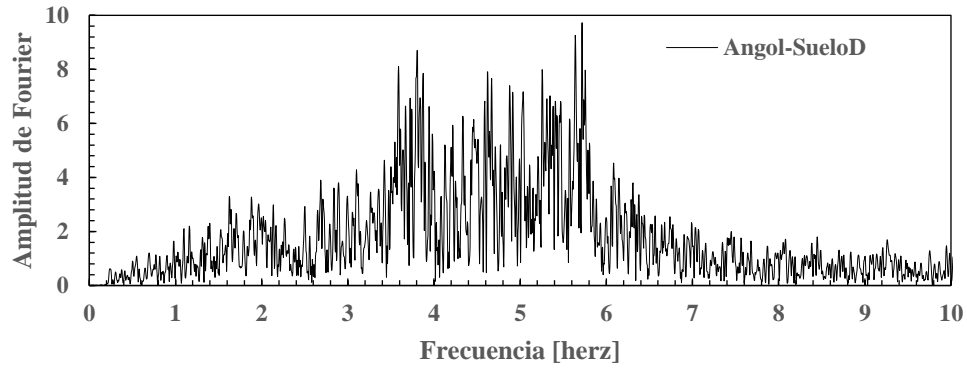


Figura 4.45. Amplitud de Fourier vs frecuencia, registro sísmico natural suelo D

Por último, desde la Figura 4.45 se obtiene que las frecuencias dominantes del registro sísmico de Angol presentan un rango extenso debido a que van desde 3.6 a 5.8 Hertz. Por ende, al igual que en caso del sismo registrado en Talca no se puede definir una frecuencia dominante a lo largo del registro.

A modo resumen de las Figuras 4.43, 4.44 y 4.45, se observó que solo en el suelo C existe un rango de frecuencias definidas, ya que en los suelos B y D el rango es más extenso, por lo que se hace difícil determinar una frecuencia dominante. Para fines prácticos al igual que con los registros sintéticos, se busca relacionar el contenido de frecuencias con la excitación. Es debido a ello que para establecer esta relación se consideraron las frecuencias que generan las máximas amplitudes, estos datos se presentan en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14- Frecuencia y período asociada a la máxima amplitud del gráfico de frecuencias de la excitación sísmica natural

Tipo de suelo	Frecuencia [Hertz]	Período [s]
Suelo B	2.83	0.35
Suelo C	1.93	0.52
Suelo D	5.64	0.18

En las Figuras 4.46, 4.47 y 4.48 se presentan los resultados obtenidos del análisis no lineal, se muestran los gráficos de desplazamiento vs la relación entre períodos, cada uno asociado a un tipo de suelo.

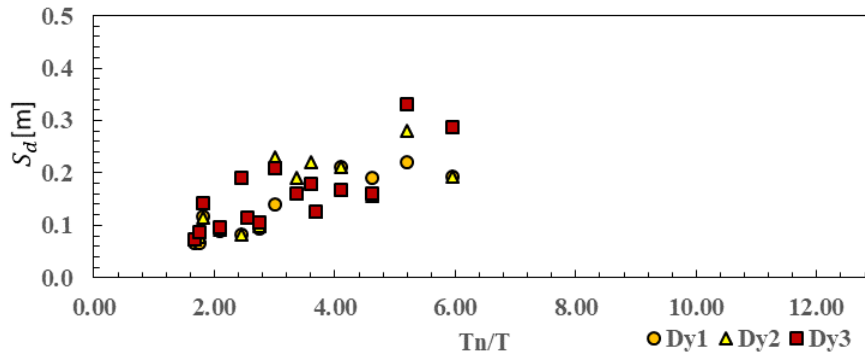


Figura 4.46. Desplazamiento de fluencia vs relación entre períodos, registro sísmico natural suelo B

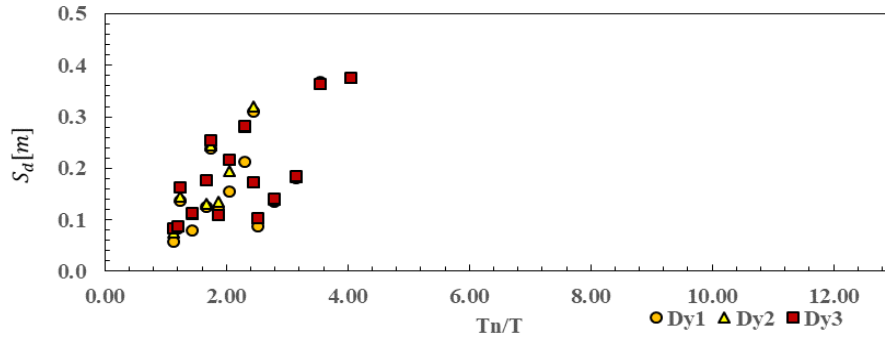


Figura4.47. Desplazamiento de fluencia vs relación entre períodos, registro sísmico natural suelo C

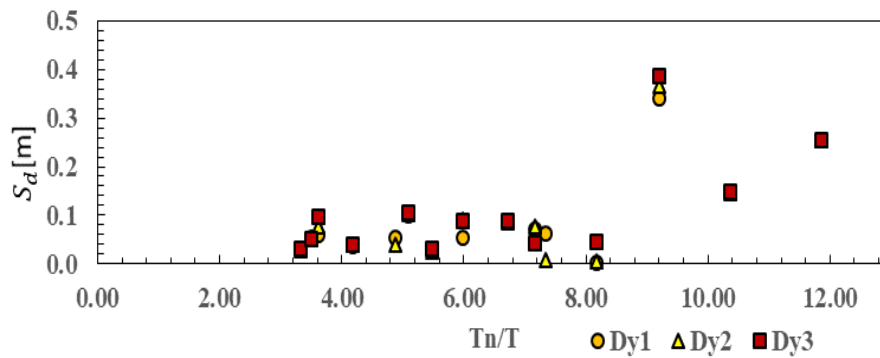


Figura4.48. Desplazamiento de fluencia vs relación entre períodos, registro sísmico natural suelo D

Al igual que en el caso anterior el considerar la frecuencia fundamental del registro sísmico, produjo que la dispersión disminuyera a excepción del registro de Angol, donde se aprecia que la dispersión en los datos se mantuvo. Este comportamiento se debe a que este registro presenta cambios significativos en las frecuencias fundamentales a lo largo de la duración del sismo, lo que eventualmente sugiere que no existe una frecuencia definida.

Por otro lado, en las Figuras 4.46, 4.47 y 4.48 se presentan las gráficas de la constante K vs la relación entre períodos.

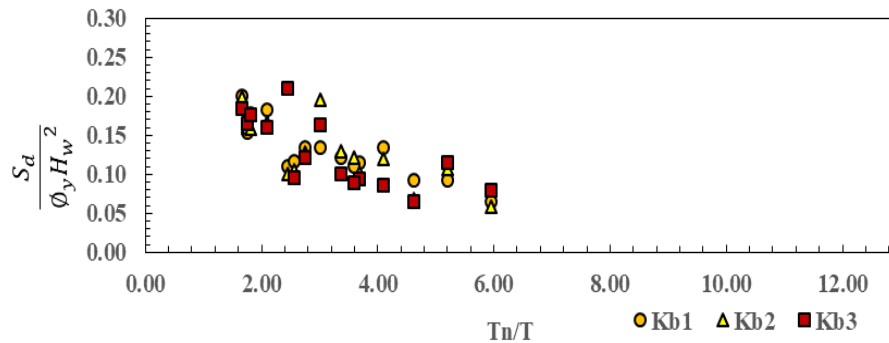


Figura4.49. Constante del desplazamiento de fluencia vs relación entre períodos, sismo natural Talca-Suelo B

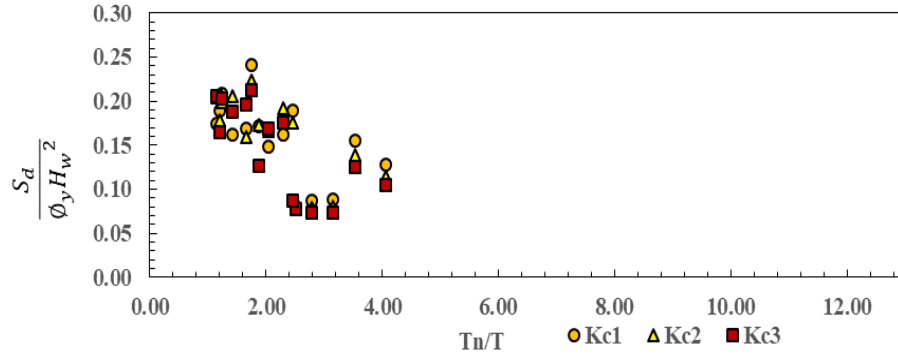


Figura4.50. Constante del desplazamiento de fluencia vs relación entre períodos, sismo natural Maipú-SueloC

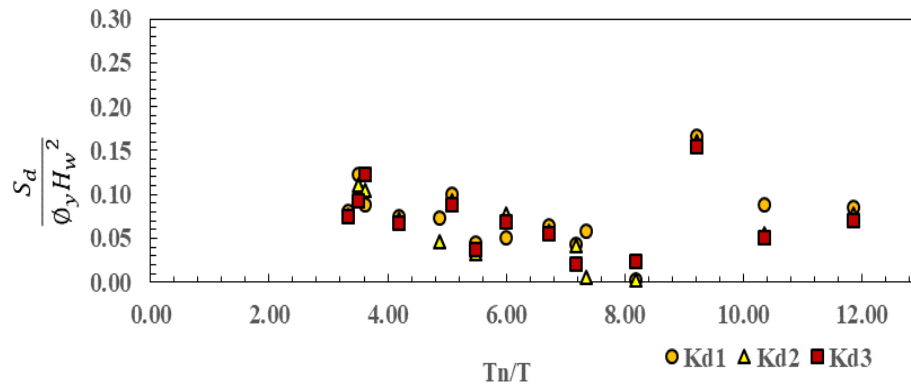


Figura4.51. Constante del desplazamiento de fluencia vs relación entre períodos, sismo natural Angol-SueloD

Para las constantes obtenidas con registros de los suelos B y C se obtiene una tendencia a una recta que toma el valor de 0.2 para una relación entre períodos de 1.2 hasta 0.05 para una relación de 6. En el suelo D se observa una recta con menor pendiente que para los otros dos casos que va desde una relación de 3.6 con un valor de 0.10 hasta una relación de 8 con un valor de 0.

De los espectros de Fourier se obtiene que el registro asociado al espectro de diseño del suelo D presenta una frecuencia dominante de 1.27 [Hertz] y el registro de Angol una frecuencia de 5.6 [Hertz], lo que señala que no existe relación definida entre las frecuencias dominantes de los registros sísmicos naturales y sintéticos basándose en la misma clasificación de tipo de suelo. Esto afecta directamente el comportamiento de los muros, como se observó en las gráficas obtenidas con los dos registros asociadas al suelo D, donde se obtuvo que para un mismo muro las respuestas no eran similares, ya que con el registro sintético se obtuvieron las mayores deformaciones de fluencia de los muros y con el registro natural ocurría lo opuesto, ya que las deformaciones de fluencia eran muy pequeñas. Por otro lado, los suelos B y C si presentan comportamientos similares, ya que si bien las aceleraciones máximas difieren entre unas y otras, el contenido de frecuencias está dentro de rangos acotados (1.9 a 2.9 Hertz), lo que señala que para este estudio la normativa genera una buena clasificación en cuanto al tipo de suelo definido en el DS61, ya que los desplazamientos y constantes obtenidas con los registros naturales y sintéticos asociados al suelo B y C tienen comportamientos similares.

También, de todos los gráficos expuestos con anterioridad se aprecia que el contenido de frecuencias de los registros tiene mayor relevancia en cuanto a nivel de deformaciones en comparación con la aceleración máxima, debido a que, si bien el sismo ocurrido en Angol presenta la máxima aceleración, es el sismo que genera que los muros presenten las menores deformaciones.

4.3.3.3. Variación del contenido de frecuencias dominante en la duración de los registros

Otro punto importante por considerar es la variación de las frecuencias dominantes a lo largo de la duración del registro, ya que, si bien en la sección anterior se determinó la frecuencia fundamental del sismo durante toda la duración de la excitación, hay que destacar que esta frecuencia cambia a medida que se separa el tiempo en intervalos más pequeños, lo que conllevará a que por ejemplo unos muros se vean influenciados más por una frecuencia en cierto intervalo de tiempo que por la dominante a lo largo de todo el registro. Para ilustrar este cambio en la Figura 4.52, se presenta la variación de las frecuencias a lo largo de la duración del registro sísmico de Talca. Esta discretización se realizó en cinco intervalos de tiempo.

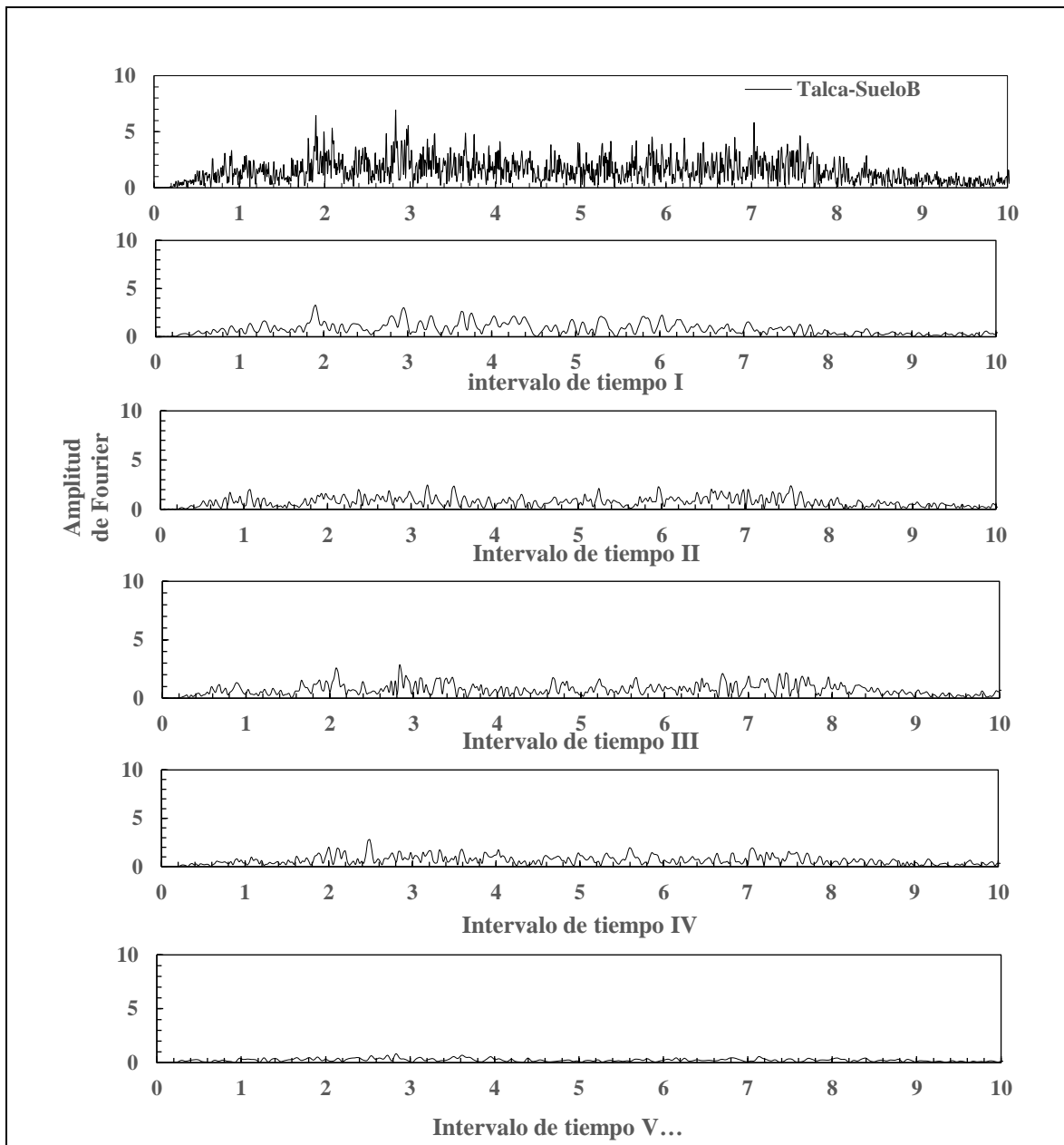


Figura 4.52. Variación de la frecuencia en la duración del registro sísmico natural registrado en la estación de Talca

En la Tabla 4.15 se presentan las frecuencias y períodos dominantes de cada intervalo de tiempo para el registro sísmico de Talca.

Tabla 4.15. Variación de la frecuencia durante la duración del registro sísmico natural de Talca

Intervalo	Tiempo inicial[s]	Tiempo final[s]	Amplitud	Frecuencia W[Hertz]	Período T [s]
I	9.98	31.57	3.27	1.90	0.52
II	31.57	52.97	2.47	3.19	0.31
III	52.97	74.37	2.79	2.83	0.35
IV	74.37	95.77	2.79	2.49	0.40
V	95.77	111.17	0.82	2.83	0.35

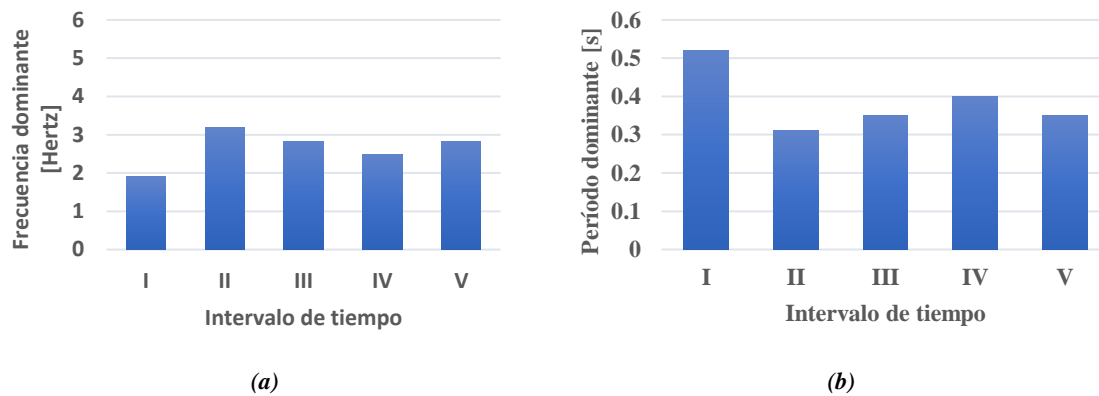


Figura4.53. (a)Frecuencias y (b) períodos dominantes en función de intervalos de tiempo

Como se aprecia de la Figura 4.53 el intervalo uno es el que presenta las frecuencias dominantes más cortas y fue justo en este intervalo de tiempo donde se produjo la fluencia de casi todos los muros en estudio, a excepción de los muros A y B que presentaron la fluencia en el segundo intervalo de tiempo. Por lo tanto, la frecuencia del registro asociada a la fluencia de gran parte de los muros en estudio es de 1.90 [Hertz] y no la considerada a lo largo del registro sísmico de 2.83 [Hertz]. Consecuentemente, es de gran relevancia tener en conocimiento que, si bien existe una frecuencia dominante a lo largo del registro, esta cambia cuando se discretiza en intervalos de tiempo más cortos. Para visualizar como este cambio influye en los resultados, en las Figuras 4.54 y 4.55 se presentan los gráficos de desplazamientos y sus respectivas constantes de desplazamientos en función de la relación entre períodos, para la frecuencia dominante de 1.90 [Hertz].

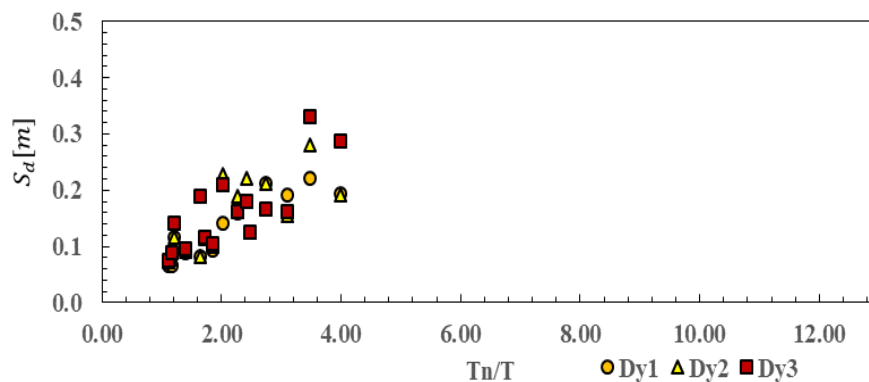


Figura4.54. Desplazamiento de fluencia vs relación entre períodos, asociados al registro sísmico de Talca.

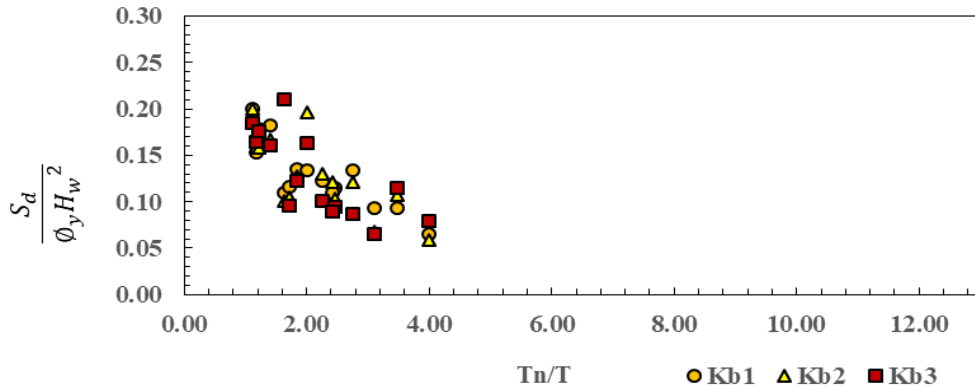


Figura 4.55. Constante de fluencia vs relación entre períodos asociados al registro natural de Talca.

Como se aprecia de las Figuras 4.54 y 4.55 al considerar la frecuencia del tramo donde los muros alcanzaron la fluencia, genera que la dispersión en los datos disminuya aún más, formando una recta con menor variación de los resultados en comparación a cuando se considera la frecuencia dominante a lo largo del registro.

Por otro lado, para el registro de Maipú se realizó el mismo procedimiento de discretización y se obtuvieron las frecuencias y períodos dominantes de cada intervalo. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.16 y la Figura 4.56.

Tabla 4.16- Variación de la frecuencia durante la duración del registro sísmico natural de Maipú

Intervalo	Tiempo inicial[s]	Tiempo final[s]	Amplitud	Frecuencia ω [Hertz]	Período T [s]
I	35.4	47.19	0.29	2.44	0.41
II	47.19	58.98	1.31	2.44	0.41
III	58.98	70.77	3.50	1.76	0.57
IV	70.77	82.56	3.40	2.05	0.49
V	82.56	94.35	1.40	1.95	0.51

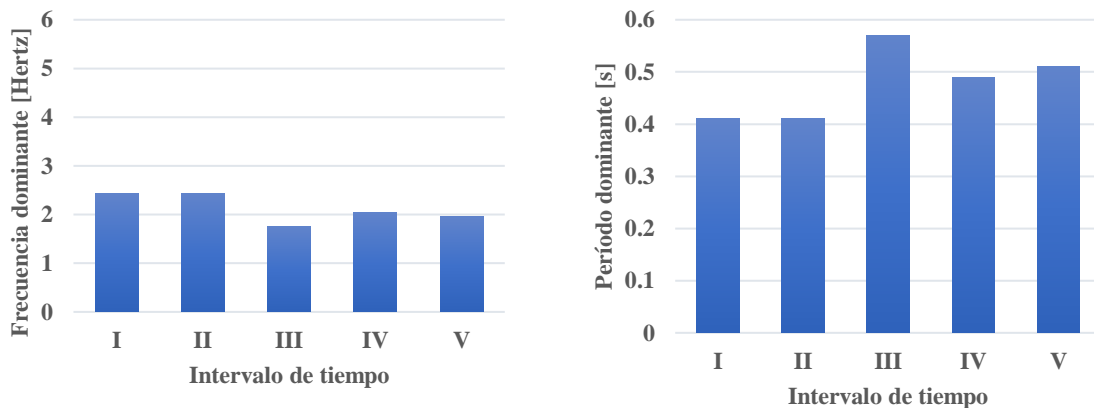


figura 4.56. (a) Frecuencias y (b) períodos dominantes en función de intervalos de tiempo

Desde el análisis realizado con el registro sísmico de Maipú se obtuvo que la gran mayoría de los muros fluyó en el intervalo I y II a excepción de los muros con períodos cortos como los muros A y B donde la fluencia se alcanzó en el tramo V. Para este caso la frecuencia de la excitación que produce la fluencia es de 2.44 [Hertz] y no la considerada a lo largo del registro de 1.93 [Hertz]. Para apreciar la influencia de esta frecuencia en los

gráficos en las Figuras 4.57 y 4.58 se presentan los resultados obtenidos de desplazamiento y la constante de fluencia.

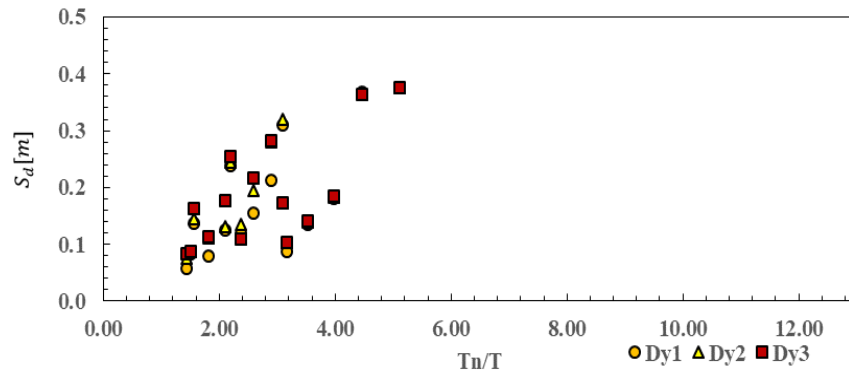


Figura4.57. Desplazamiento de fluencia en fluencia vs relación entre períodos, registro sísmico de Maipú

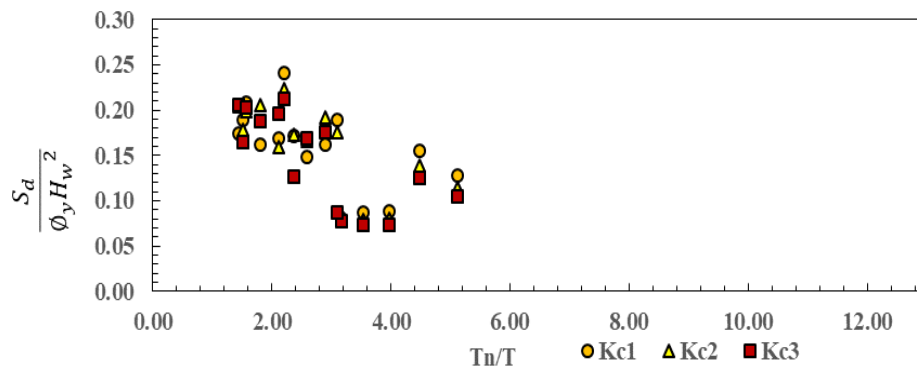


Figura4.58. Constante de fluencia vs relación entre períodos, registro sísmico de Maipú

Se aprecia que no existe un cambio significativo en los resultados al considerar la frecuencia durante todo el registro y la por tramos, esto se debe a que ambas frecuencias eran muy cercanas.

Por último, en la Tabla 4.17 se presentan los datos obtenidos del registro sísmico de Angol.

Tabla 4.17. Variación de la frecuencia durante la duración del registro sísmico natural de Angol

Intervalo	Tiempo inicial[s]	Tiempo final[s]	Amplitud	Frecuencia W[Hertz]	Período T [s]
I	28.81	47.18	4.70	3.76	0.27
II	47.18	65.55	6.40	5.32	0.19
III	65.55	83.91	3.40	4.20	0.24
IV	83.91	102.21	2.43	5.71	0.18
V	102.21	120.65	1.07	3.86	0.26

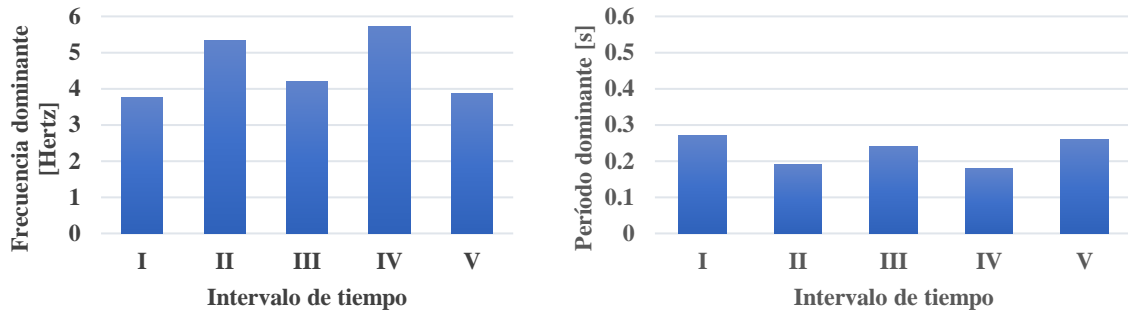


Figura 4.59. (a) Frecuencias y (b) períodos dominantes en función de intervalos de tiempo

Para el caso del registro sísmico de Angol desde el análisis se obtuvo que la fluencia de los muros con períodos cortos ocurrió en el intervalo de tiempo III, mientras que para los períodos largos esta fluencia se dio en el intervalo de tiempo I para casi todos los casos de estudio a excepción de los muros I, K y N.

A continuación, en las Figuras 4.60 y 4.61 se presentan los resultados obtenidos de desplazamientos de fluencia y constante de fluencia en función de la relación entre períodos considerando la frecuencia dominante que generó la mayor fluencia de los muros que es igual a 3.76 [Hertz].

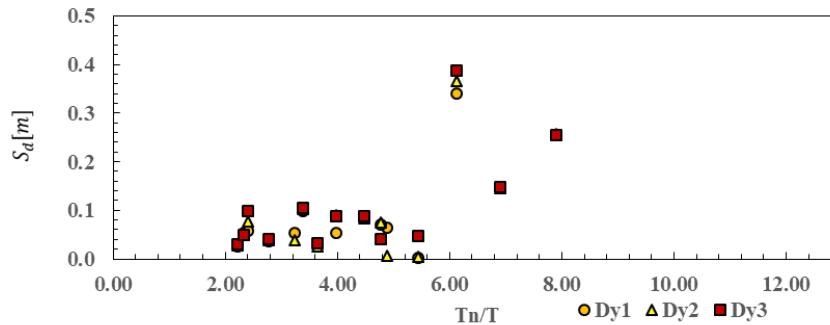


Figura 4.60. Desplazamiento de fluencia vs relación entre períodos, asociados al registro sísmico de Angol

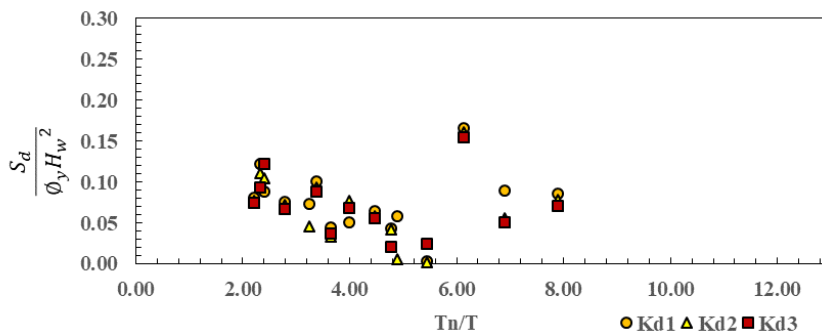


Figura 4.61. Constante de fluencia vs relación entre períodos, asociados al registro sísmico de Angol.

De las Figuras 4.60 y 4.61 se observa que la dispersión en los datos disminuyó al considerar la frecuencia dominante que produjo la fluencia de los muros.

De todos los gráficos mostrados anteriormente se aprecia que existe variación en las frecuencias dominante del registro cuando se separa en tramos de menor duración, por lo que se espera que el comportamiento de los muros se vea influenciado por la variación de las frecuencias, debido a que la respuesta dinámica de las estructuras está directamente relacionada con las frecuencias dominantes de la excitación. Esto se ve reflejado por ejemplo cuando en estructuras flexibles se producen mayores deformaciones debido a que el contenido de frecuencias de la excitación es bajo, como cuando los muros fueron sometidos a los registros sísmicos de Talca y Maipú. Asimismo, cuando el contenido de frecuencias aumenta las estructuras altas tendrán menores deformaciones; esto se vio reflejado en los desplazamientos ocurridos con el sismo de Angol, donde las deformaciones fueron menores en comparación con las obtenidas con los registros de Maipú y Talca, debido a que las frecuencias del sismo estaban muy alejadas de las de frecuencias de vibración de los muros. Por otro lado, ocurrió lo contrario con el registro de Maipú, debido a que las mayores deformaciones para estructuras con períodos altos fueron considerando esta excitación sísmica, esto ocurre debido a que el espectro de Fourier asociado a este registro es el que contiene las frecuencias más pequeñas en comparación con los otros dos registros, lo que refleja que la frecuencia natural de vibración de los muros con períodos altos estaba cerca de la frecuencia dominante de la excitación.

4.3.3.4. Modos de vibrar de los muros

Como se mencionó en las secciones anteriores, la respuesta dinámica está directamente relacionada con la demanda de los eventos sísmicos, como también de las propiedades físicas de los muros y de la contribución modal. Este último punto es de gran relevancia, puesto que es uno de los factores más influyentes a la hora de estimar los desplazamientos de fluencias, debido a que la deformación de los muros depende en gran parte de los modos de vibrar y sus frecuencias de vibración.

A partir del análisis de los porcentajes de masas efectivas de los muros se evalúa el comportamiento de los modos de vibración en la respuesta dinámica, debido a que estos factores indican la influencia que cada modo tiene en la respuesta del muro. En las Figuras 4.62 y 4.63, se presenta el porcentaje de las masas modales efectivas del primer y segundo modo de vibrar de cada muro, puesto que son los modos más importantes ya que representan más del 75 % de las masas efectivas.

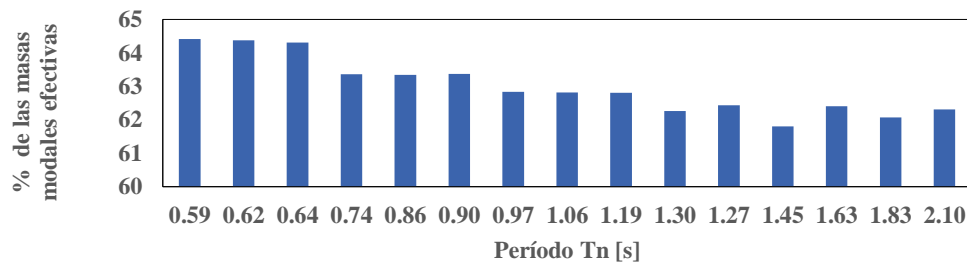


Figura4.62. Porcentajes de masas efectivas versus el período del primer modo de vibrar.

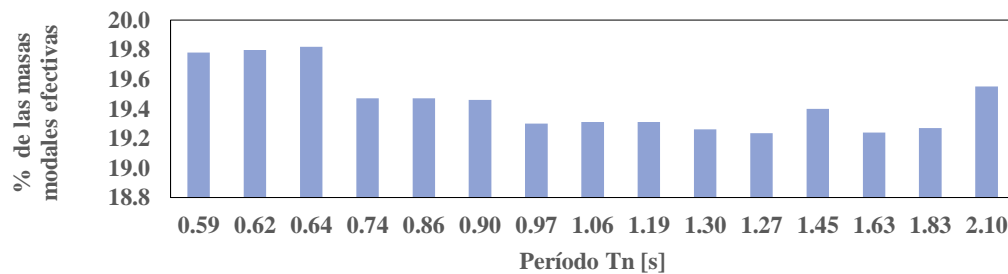


Figura4.63. Porcentajes de las masas efectivas versus el período del segundo modo de vibrar.

Como se observa de las Figuras 4.62 y 4.63, a medida que el período natural aumenta, el porcentaje de las masas modales efectivas del primer modo de vibración disminuye. Además, el primer modo de vibración para todos los muros es mayor al 60%, por lo tanto, este modo caracteriza la respuesta dinámica de los muros, porque es el modo que posee mayor porcentaje de participación modal. Asimismo, desde la Figura 4.63 se obtiene que la participación modal del segundo modo es mayor al 19% para todos los muros en estudio, por lo tanto, la respuesta estará dominada por el primer y segundo modo, debido a que son los que más contribuyen en la respuesta.

Por otro lado, se aprecia de las Figuras 4.62 y 4.63 que existe una tendencia a la disminución de este porcentaje de masas modales, esto quiere decir que para las estructuras más pequeñas la respuesta estará influenciada por el primer y segundo modo de vibrar, mientras que, para estructuras con períodos más largos se tendrá un porcentaje de participación modal más alto de los modos superiores. Esto concuerda con la deformada de muros en el instante en que este fluye mostrada en la Figura 4.64, donde se observa que a menor período, la estructura responderá con la forma de los primeros modos de vibración y de lo contrario a mayor período natural, la deformada se vuelve representativa de los modos superiores.

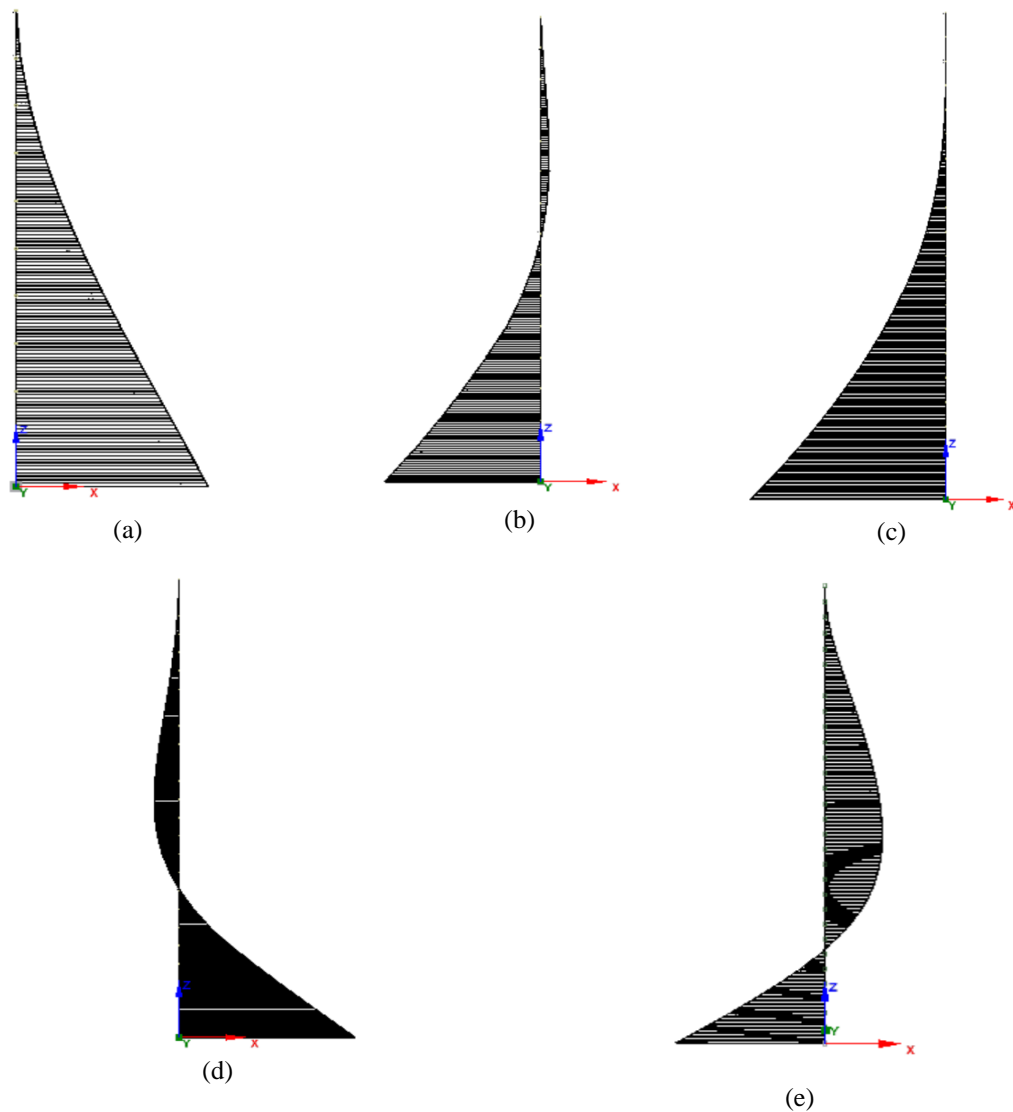


Figura 4.64. Diagramas de momento de muros para el instante donde ocurre la fluencia: (a) muro A (10 pisos); (b) muro E (15 pisos); (c) muro H (20 pisos); (d) muro L (25 pisos) (e) muro Ñ (30 pisos).

Para complementar los análisis en la Tabla 4.18 se muestran las frecuencias y períodos asociados al primer y segundo modo de vibrar de los cinco muros, esto con el fin de explicar el comportamiento dinámico y relacionar el contenido de frecuencias con la excitación. A modo ejemplo, para ilustrar como la frecuencia dominante de la excitación influye en la respuesta dinámica, se grafican la frecuencia del primer y segundo modo en el espectro de Fourier del registro sísmico de Talca, para los muros especificados en la tabla 4.17.

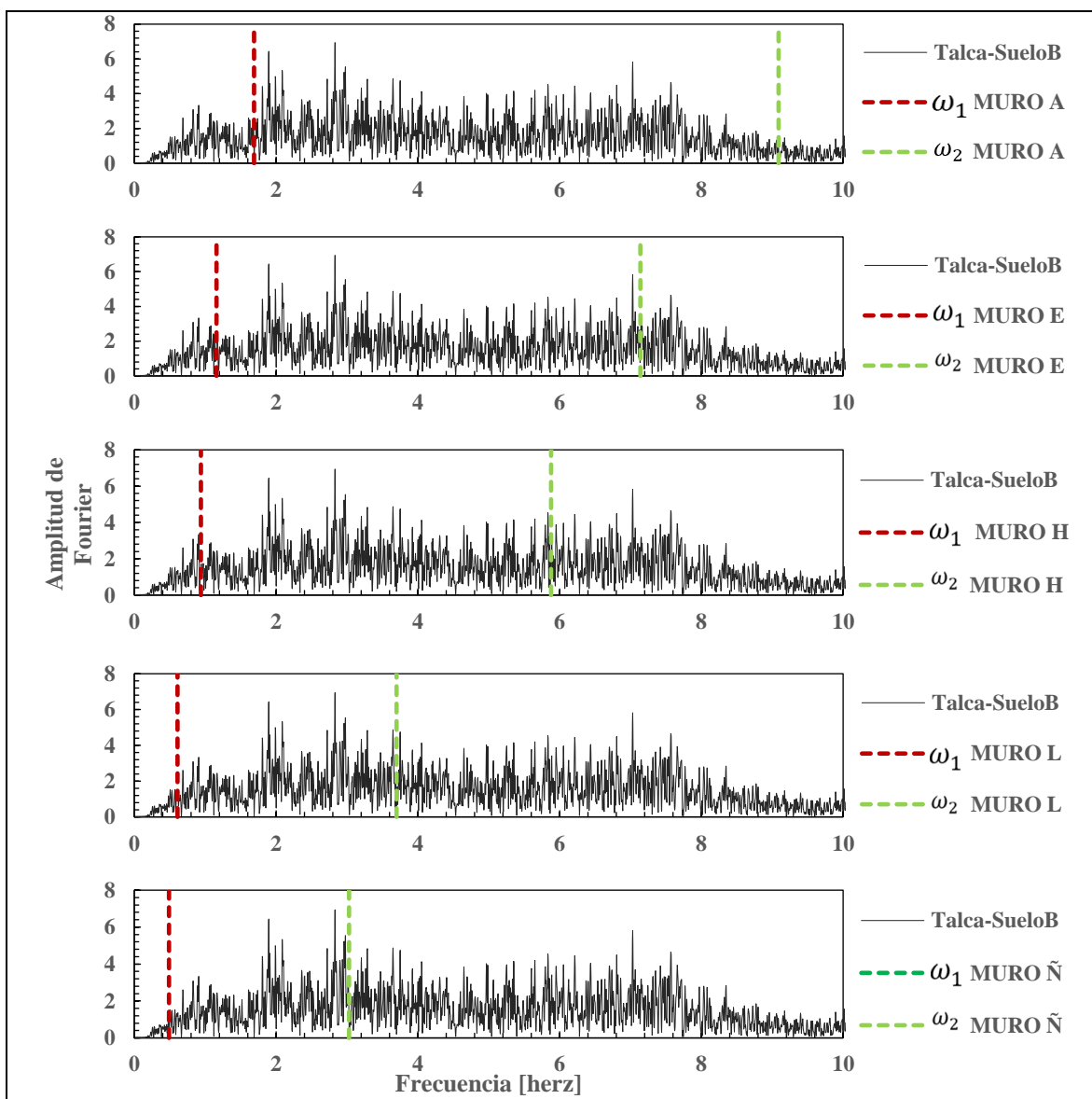


Figura 4.65. Frecuencias de vibración del primer y segundo modo de vibrar en el espectro de Fourier del registro sísmico de Talca.

Tabla 4.18- Períodos y frecuencia del primer y segundo modo de vibración

Nombre del muro	Período modo I [s]	Frecuencia I [Hertz]	Período modo II [s]	Frecuencia II [Hertz]
A	0.59	1.69	0.11	9.09
E	0.86	1.16	0.14	7.14
H	1.06	0.94	5.88	5.88
L	1.63	0.61	0.27	3.70
Ñ	2.05	0.33	0.33	3.03

Desde la Figura 4.65 se observa de las gráficas de amplitud de Fourier, a medida que el período natural de vibración aumenta, la frecuencia asociada al segundo modo de vibración se acerca más a la frecuencia dominante de la excitación (1.9 Hertz) que produce la fluencia en los muros. Asimismo, para períodos cortos ocurre lo contrario, debido a que la frecuencia fundamental del primer modo es la que se acerca a la frecuencia dominante de la excitación, tal como se observa los siguientes gráficos. Por lo tanto, en base a estas observaciones se espera que en muros con períodos cortos la respuesta este dominada por el primer modo de vibración y para períodos altos por el segundo modo.

Para finalizar esta sección, en la Figura 4.66 en el eje de las abscisas se presenta el cociente entre la altura de la resultante de la fuerza de corte (corte basal) de los muros y la altura total del mismo, con el fin de visualizar como varía la posición de la altura resultante con respecto a la constante de fluencia K .

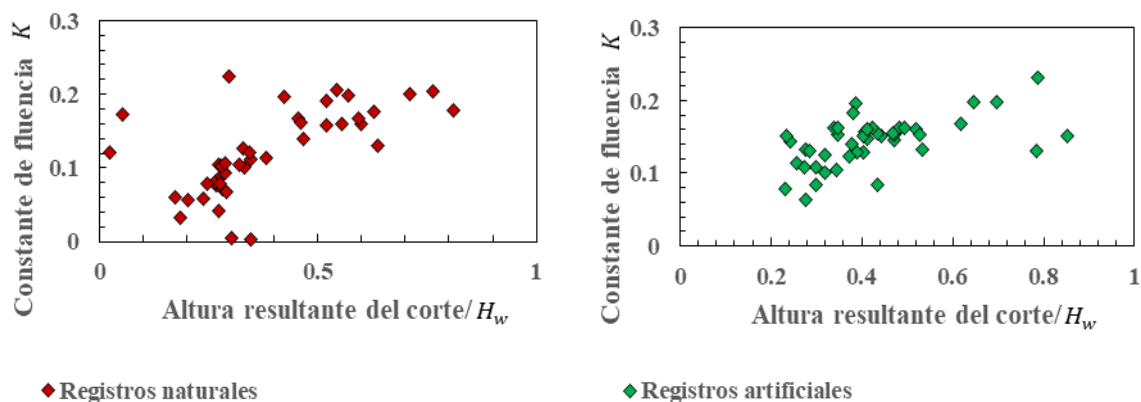


Figura 4.66. Constante de fluencia versus cuociente entre la altura de la fuerza de corte resultante y la altura total del muro, en el instante de fluencia a flexión en la sección crítica del muro.

Desde la Figura 4.66 se aprecia que cuando el cociente entre alturas es mayor, los valores de la constante K aumentan, lo contrario ocurre cuando se observa el comportamiento de los muros con relaciones de alturas menores, ya que para estos valores la constante de fluencia K presenta valores cercanos a 0.1. Esto está directamente relacionado con la influencia de los modos superiores, debido a que si los muros tienen mayor porcentaje de participacion modal del modo fundamental, el valor de la constante de fluencia K tiende a ser mayor; de lo contrario, a mayor porcentaje de participacion de los modos superiores, la altura es menor. Esta observacion se complementa con las Figuras 2.6 y 4.64, en ellas se muestra como la altura de la resultante de la fuerza de corte, en el momento en que ocurre la fluencia en la zona critica de los muros, disminuye debido a que existe mayor participación de los modos superiores.

4.3.4. Recomendaciones para el valor de la constante del desplazamiento de fluencia

Luego del análisis no lineal realizado a todos los muros en estudio, se propone la expresión simplificada (4-7) para estimar el valor de la constante de fluencia K en función del período. Esta ecuación fue definida en función de los valores límites obtenidos del parámetro K , tanto considerando sismos sintéticos como naturales; con el fin de trabajar con un valor conservador a la hora de estimar el desplazamiento de fluencia, ya que, si se considera un valor más pequeño, se deberá confinar o aumentar la extensión de los elementos de borde.

$$K = \begin{cases} -0.125T + 0.15 & ; & 0.4[s] \leq T \leq 1.2[s] \\ 0 & ; & T > 1.2[s] \end{cases} \quad (4-7)$$

En la Figura 4.66 se presentan los gráficos de la constante K en función del período, para los registros sísmicos naturales y sintéticos, con los valores límites de la constante de fluencia considerados.

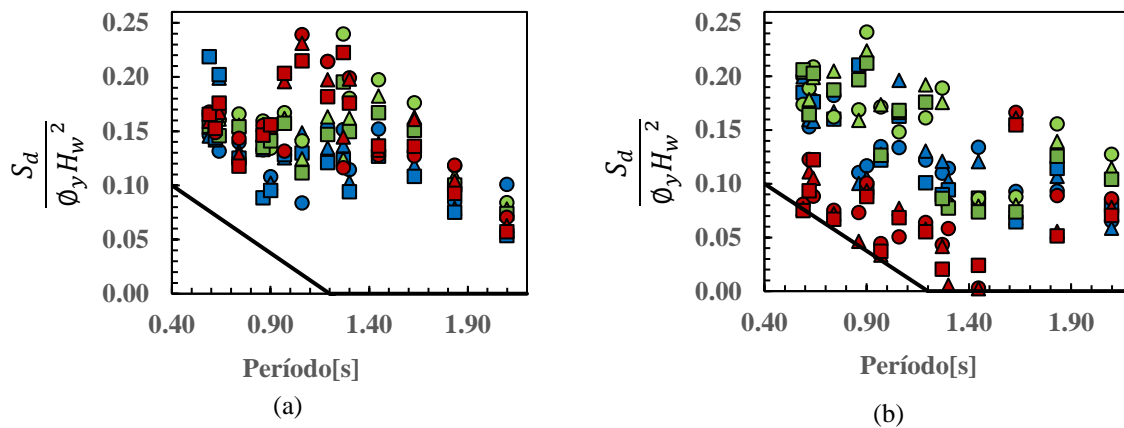


Figura 4.67- Valores límites recomendados para estimar la constante de fluencia (a) Valores obtenidos con registros sintéticos; (b) Valores obtenidos con registros naturales.

Desde la ecuación (4-7), para muros con períodos mayores a 1.2[s] se sugiere utilizar la ecuación (1-1) propuesta por el Decreto Supremo N°60, ya que esta despreja la deformación elástica. Para períodos menores a 1.2[s] se propone utilizar la ecuación (1-2), considerando en la estimación de la constante K los valores límites mostrados en la ecuación (4-7).

Cabe mencionar que, si bien en los objetivos principales se propone determinar un rango de valores para estimar el desplazamiento elástico, los resultados no presentaron una buena correlación, tal como se presenta en la Figura 4.67, por lo tanto, si bien en el objetivo general se comenzó con la idea de proponer un rango de valores, desde los análisis se concluye que no era una herramienta útil para fines prácticos, ya que el promedio de los datos presentaba valores muy alejados de muchos de los resultados obtenidos, por lo tanto el promedio generaba valores no conservadores, es por esto último que se optó por utilizar valores límites, con el fin de obtener valores conservadores a la hora de estimar el desplazamiento elástico. Por último, un punto importante a considerar desde el análisis es que existe una gran variación en los resultados al utilizar diferentes excitaciones sísmicas, por ende, la ecuación (4-7) no sugiere que será válida para todos los registros sísmicos que puedan producirse, debido a que eventualmente podría existir un evento sísmico que genere incluso valores más pequeños en comparación con los valores límites mencionados anteriormente; con ello la demanda sobre el muro podría exceder su capacidad de deformación y no poseer el confinamiento requerido. Asimismo, las recomendaciones están limitadas a muros individuales o aislados, y no a muros que son parte de un sistema. Por lo tanto, sirven para elementos donde no existe interacción entre el muro y el resto de la estructura.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES, LIMITACIONES Y FUTUROS TRABAJOS

5.1. Conclusiones

Se realizó un set de noventa análisis tiempo-historia no-lineal con el fin de estimar el desplazamiento de fluencia de 15 muros de hormigón armado, representativos de estructuras reales, con diferentes cualidades físicas tales como: espesor, cuantía de acero, largo, ancho, entre otros parámetros relevantes en el análisis. Cada muro se sometió a tres registros naturales y tres registros sintéticos, donde cada registro fue asociado a un tipo de suelo B, C y D, definidos en el DS61.

Para el modelo de los muros se utilizó el programa SeismoStruct, donde cada muro fue simulado como un elemento tipo viga en voladizo por medio de fibras unidireccionales, ya que mediante estos elementos fue posible plasmar el cambio de rigidez en la altura del muro sin necesidad de pre asumir valores.

Se observó en gran parte de los gráficos de desplazamiento de fluencia, que a medida que el período de los muros aumenta, el desplazamiento de fluencia es mayor. Esto concuerda con que en estructuras flexibles los desplazamientos, en general, serán mayores. Cabe mencionar que esto no fue observado en todos los gráficos, debido a que existieron muros con períodos más bajos que presentaron mayores deformaciones en comparación con períodos más largos, esto se produjo porque las frecuencias dominantes de la excitación se acercan a las frecuencias fundamentales del primer y segundo modo de vibración de los muros y por ende se generan amplificaciones dinámicas para ciertos modos de vibrar, lo que conlleva a que estos mismos presentaran mayores deformaciones.

Una de las principales conclusiones realizadas en el estudio es que el contenido de frecuencias de la excitación es la variable más importante por considerar a la hora de estimar el desplazamiento de fluencia, ya que, al someter muros con cualidades físicas similares a distintos registros sísmicos, se producen cambios en la respuesta. Esto se contempló en las gráficas de desplazamiento de fluencia cuando los sismos tenían frecuencias dominantes bajas, como en el caso del registro sísmico de Maipú, donde se producían mayores deformaciones en comparación con las que generaban los sismos con frecuencias altas.

Por otro lado, desde los análisis se obtuvo que la aceleración máxima del sismo no interfiere en gran medida en la estimación del desplazamiento de fluencia en comparación con el contenido de frecuencias de la excitación, debido a que el sismo que presentó la mayor aceleración fue el sismo de Angol, y a pesar de tener el mayor peak de aceleración en comparación con los otros registros, se obtuvieron los menores desplazamientos.

Además, se visualizó que al no considerar el cambio de rigidez en la altura y utilizar cargas estáticas o monotónicas en el análisis, se generan errores en la estimación del desplazamiento de fluencia, debido a que en todos los casos de análisis, las respuestas de los muros eran menores en comparación con las ecuaciones propuestas por los autores mencionados en el Capítulo II, sobre todo en estructuras flexibles, donde la constante de fluencia tomaba valores cercanos a cero y con las ecuaciones propuestas por los autores la constante era considerada como 0.27, 0.33, 0.15, entre otros valores. Este último punto es relevante para el diseño sísmico de muros en voladizo, puesto que considerar las ecuaciones mencionadas anteriormente produce errores en la estimación del desplazamiento de fluencia, lo que eventualmente producirá que se tendrá una sobreestimación de este, en consecuencia se estimara una mayor capacidad de curvatura, por lo tanto, se diseñara una menor extensión de los elementos de borde y en el peor de los casos no se considerara el confinamiento del muro, lo que conlleva a que en un futuro terremoto el muro pueda exceder su capacidad de deformación, generando

fallas por aplastamiento del concreto y pandeo del refuerzo, puesto que el muro no poseerá el confinamiento necesario.

Finalmente, en este trabajo se proponen valores límites inferiores para el desplazamiento de fluencia, a partir de la ecuación (4-7), la cual determina la constante de fluencia K en función del período natural de la estructura. En cuanto a esta variable se sugiere que sea despreciada para estructuras con períodos mayores a 1.2[s]. Todo esto, teniendo en mente un diseño conservador, con estructuras que posean una adecuada capacidad de deformación para un nivel de demanda dado.

5.2. Limitaciones de los análisis y futuros trabajos

Cabe mencionar que en este trabajo se identificaron las siguientes limitaciones:

1. No se consideró el acoplamiento de muros debido a elementos como losas, vigas u otros elementos que pudieran generar aumento en la carga axial o influir en la deformación del muro.
2. No se consideró la relación entre muros de distintas rigideces y dimensiones presentes en una estructura real.
3. Sólo se consideraron muros rectangulares, los muros asimétricos podrían modificar los resultados obtenidos.
4. Se consideraron solo las deformaciones debidas a la flexión y se despreciaron las originadas por el corte y la torsión.
5. Se asumió empotramiento perfecto en la base del muro.
6. Se consideró una aproximación para la curvatura de fluencia.

Subsanar cada una de las limitaciones expuestas previamente abre la opción a futuros trabajos y análisis.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Paulay, T. and Priestley, M.J.N (1992). *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*. John Wiley & Sons, New York.
- [2] Decreto Supremo N°60, DS60. *Reglamento que fija los requisitos de Diseño y Cálculo para el hormigón armado*, Ministerio de vivienda y urbanismo, Santiago, Chile.
- [3] Decreto Supremo N°61, DS61. *Reglamento que fija el diseño sísmico de edificios y deroga decreto n°117*, Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Diario oficial de la Republica de Chile, N°40.133, 8-12.
- [4] R. Alvarez Jimenez (2019), *Determinación del desplazamiento de fluencia en sistemas de muros de hormigón armado*. Memoria de Título para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, departamento de obras civiles, Valparaíso.
- [5] Paulay, T.(2001).*Seismic Response of Structural Walls: recent developments*. *Canadian Journal of Civil Engineering* 28(6):pp922-937.
- [6] Quintana Gallo, P.(2018).*Simple estimation of the maximum elastic roof displacement of a slender cantilever RC Wall accounting for dynamic effects*. *Obras y proyectos*, Vol23, pp:55-62.
- [7] Alfaro, J.(2013). *Estimación del desplazamiento lateral elástico e inelástico de muros esbeltos mediante un modelo de rótula plástica basado en un modelo de fibras*. Memoria para optar al título de ingeniero civil estructural, Universidad de Chile, Santiago.
- [8] Jiménez, F., Massone, L., Macaya, F., Bass, E. (2019). *Amplificación dinámica del corte en muros de hormigón armado con estructuración chilena*. XII Congreso Chileno de Sismología e ingeniería sísmica, ACHISINA 2019, Valdivia. Paper #1539.
- [9] Morales, A., Hube, M., Ceresa, P.(2019). *Seismic Shear and Moment demands in reinforced concrete wall buildings*. 7° ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methodd in Structural and Earthquake Engineering. COMPDYN 2019, 4115-4127.
- [10] Perry Adebar., Ahmed, M., Ibrahim, M., Michael Bryson.(2007). *Test of High-Rise Core Wall: Effective Stiffness for Seismic Analysis*. *ACI Structural Journal*, Vol. 104, N°5, pp. 549-559.
- [11] Priestley, M., Amaris, A. (2002). *Dynamic amplification of seismic moments and shear forces in cantilever walls*, " Research Report ROSE – 2002/01, IUSS press, Pavia, Italy.
- [12] Pennucci, D., Sullivan, T.J., Calvi, G.M., (2013). *Inelastic higher-mode response in reinforced concrete wall structures*, " *Earthquake Spectra*, Vol. 31, No 3, pp. 1493–1514.
- [13] Seisimosoft(2013). *SeismoStruct v6.5-A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures*, available from <http://www.seisimosoft.com>.
- [14] INN(2009). *Diseño sísmico de edificios*. Norma Chilena Oficial NCh433 Of.96 modificada 2009, Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.
- [15] Spacone, E., Filip, C., Fabio, F. (1996). *Fibre beam-column model for non-linear analysis of R/C frames: part1. formulation*. *Earthquake engineering and structural dynamics*, Vol. 25, 711-725.
- [16] Thomsen IV, J. Wallace, J (2004). *Displacement-Based Desin of Slender Reinforced Concrete Walls- Experimental Verification*. *Journal of Structural Engineering*. Vol. 130. No.4. pp 618-630.

- [17] M.J.N. Priestley (1998). *Brief comments on elastic flexibility of reinforced concrete frames and significance to seismic design*. University of California, San Diego, California.
- [18] R.C. Hibbeler (2012). *Analisis Estructural octava edicion, Mexico* <http://Opensees.berkeley.edu/>.
- [19] Park, R., and Paulay, T (1975). *Reinforced concrete structures*. John Wiley & Sons, Nueva York.
- [20] Wallace, J.W. and Moehle, J.P.(1992). *Ductility and detailing requirements of bearing wall buildings*. *Journal of structural Engineering* 118(6), 1625-1644.
- [21] Massone. L, Alfaro. J (2016), *Displacement and curvature estimation for the design of reinforced concrete slender walls*, departamento de Ingenieria Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- [22] SNZ 3101 (2006), Concrete Structures Standard. Standards New Zealand, Wellington, New Zealand.
- [23] Priestley. MJN, Galvi. GM, Kowalsky. MJ (2007). *Displacement- Based Seismic Design of Structures*. Italia.
- [24] <http://Openseesberkeley.edu/>.
- [25] ACI COMMITTEE 318 (2008). *Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI 318-08) and Commentary*. Farmington Hills, MI, USA, American Concrete Institute. 465p.
- [26] Massone LM, Wallace JW (2004). *Load- deformation rponses of slender reinforced concrete walls*. *ACI Struct J* 2004: 101(1):103-13.
- [27] Menegotto M., Pinto P.E. (1973). *Method of analysis for cyclically loaded R.C. plane frames including changes in geometry and non-elastic behaviour of elements under combined normal force and vending*. *Symposium on the Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Zurich, Switzerland, pp. 15-22.
- [28] Mander J.B., Priestley M.J.N., Park R. (1988). *Theoretical stress-strain model for confined concrete*, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826.
- [29] Chang G.A., Mander J.B. (1994). *Seismic Energy Based Fatigue Damage Analysis of Bridge Columns: Part 1- Evaluation of Seismic Capacity*," NCEER Technical Report No. NCEER-94-0006, State University of New York, Buffalo, N.Y.
- [30] Kappos A., Konstantinidis D. (1999). *Statistical analysis of confined high strength concrete*, *Materials and Structures*, Vol. 32, pp. 734-748.
- [31] A. Morales Gómez (2017), *Seismic Shear and Moment Demands in RC Wall Buildings*, A thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Docor of Philosophy in EARTHQUAKE ENGINEERING AND ENGINEERING SEISMOLOGY, Instituto Universitario di Studi Superiori di Pavia IUSS, Italy.
- [32] Orakcal, Kutay & Wallace, JohnW (2006). *Flexural Modeling of Reinforced Concrete Walls- Experimental Verification*. *ACI Structural Journal*. Vol.103. No2.pp196-206.
- [33] ASCE 7-10(2010). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- [34] Massone, L.M.et al (2012). *Seismic Design and Construction Practices for RC Structural Wall Buildings*, *Earthquake Spectra*, Vol. 28, No S1, pp. S245–S256.
- [35] Matias Henriquez U (2013). *Influencia del contenido de frecuencias de los registros en la respuesta de estructuras de hormigon armado*. *Memoria para optar al titulo de ingeniero civil*, Universidad de Valparaíso, Valparaíso.

[36] Roger D. Borcherdt (1994). *Estimates of Site- Dependent Response Spectra for Design (methodology and justification)*, *Earthquake Spectra*, Vol 10, No 4.

[37] Juan Urrutia (2017). *Efectos en la Respuesta Sismica de la Duracion de los Registros Sismicos. Memoria para optar al titulo de ingeniero civil*, Universidad de Valparaíso, Valparaíso.

[38] Bommer y Martinez Pereira (1995). The effective Duration Of Earthquake Strong Motion, *Journal of Earthquake e Engineering*, Vol 3, No 2, pp. 127-172.

[39] Arias. A (1970). *A measure of earthquake intensity*, *Seismic Design for Nuclear Power Plants*, edited by R. J. Hansen, MIT Press, Cambridge, MA, pp. 438-483.

[40] M.J.N Priestley & M.J. Kowalsky (1998). *Aspects of drift and ductility Capacity of Rectangular Cantilever Structural Walls*, *Bulletin, NZNSEE*, June, pp73-85.

7. ANEXOS

ANEXO A

A continuación, se presentan los resultados del desplazamiento en el tiempo y las curvas de histéresis, en estos gráficos se indica con color rojo el punto donde ocurrió la fluencia. Los gráficos expuestos corresponden a cinco muros de hormigón armado (A, E, H, L y Ñ) con cinco alturas distintas (5, 10, 15, 20, 25 y 30 pisos), considerando dos registros sísmicos naturales y uno sintético, con el fin de representar de manera general los resultados obtenidos. Cabe destacar que no se presentan todos los gráficos obtenidos en este estudio, debido a que son ciento ochenta gráficos y colocarlos en esta sección no es redundante.

A.1 DESPLAZAMIENTO DE FLUENCIA

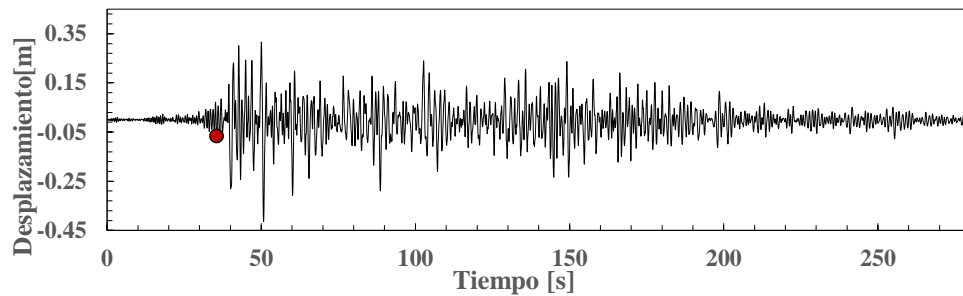


Figura 7.1. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro A registro natural suelo B.

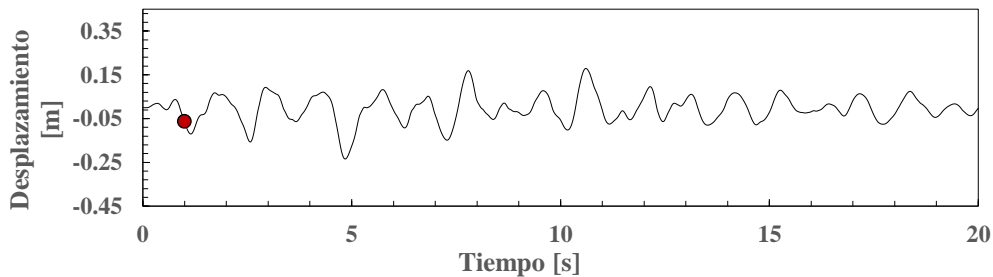


Figura 7.2. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro A registro sintético suelo C.

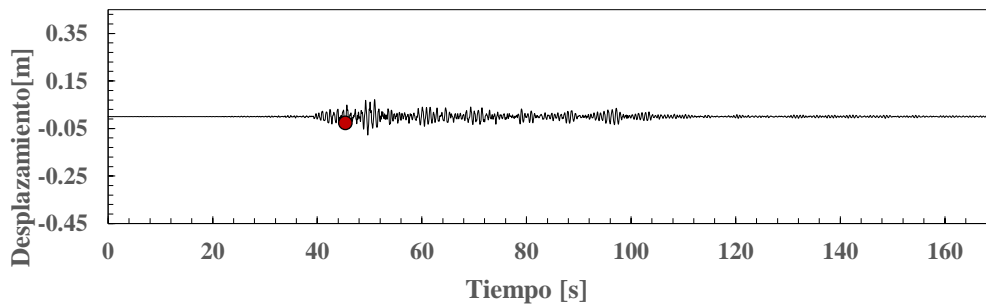


Figura 7.3. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro A registro natural suelo D.

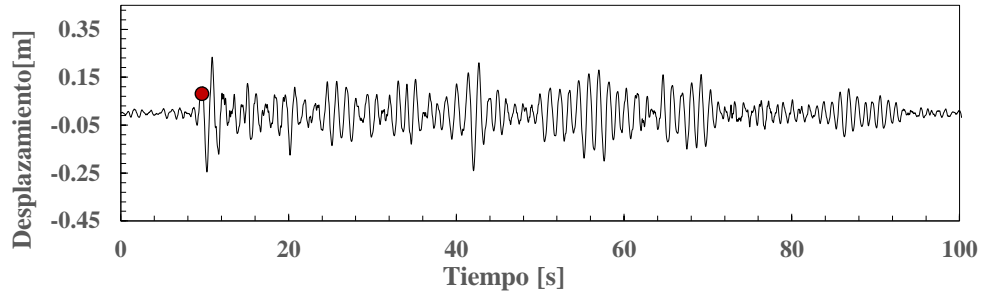


Figura 7.4. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro E registro natural suelo B.

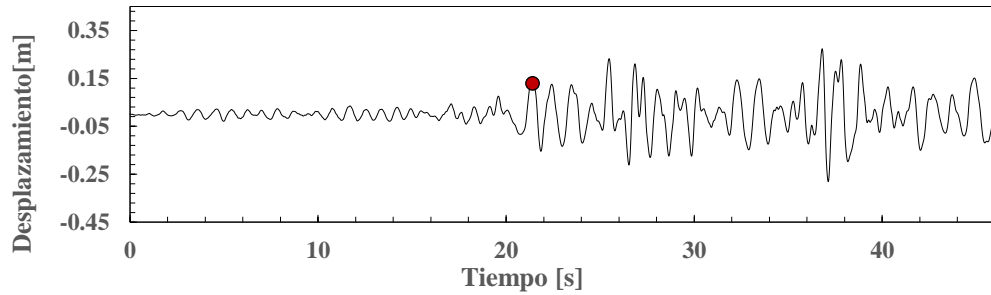


figura 7.5. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro E registro natural suelo C.

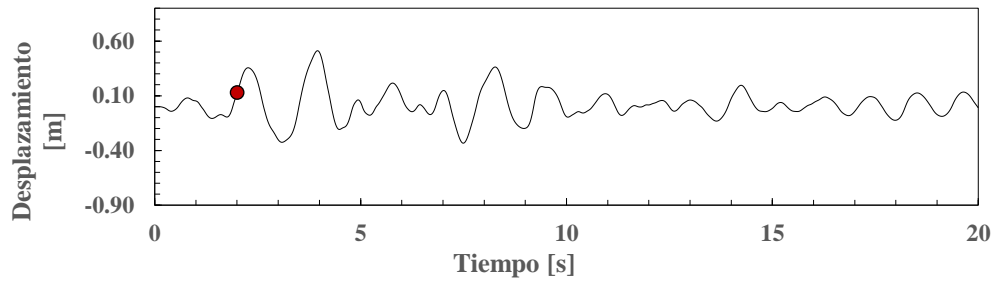


Figura 7.6. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro E registro sintético suelo D.

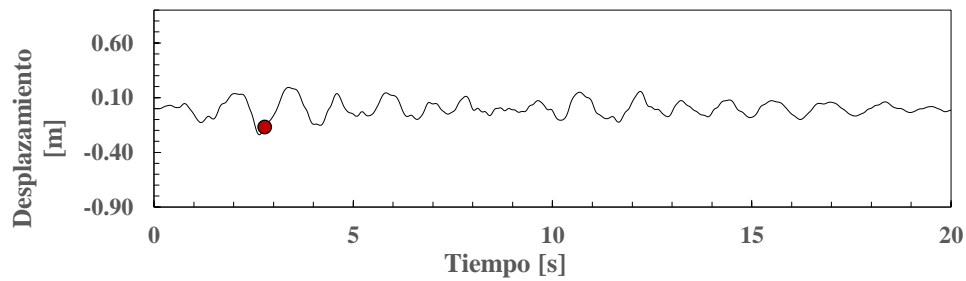


Figura 7.7. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro H registro sintético suelo B.

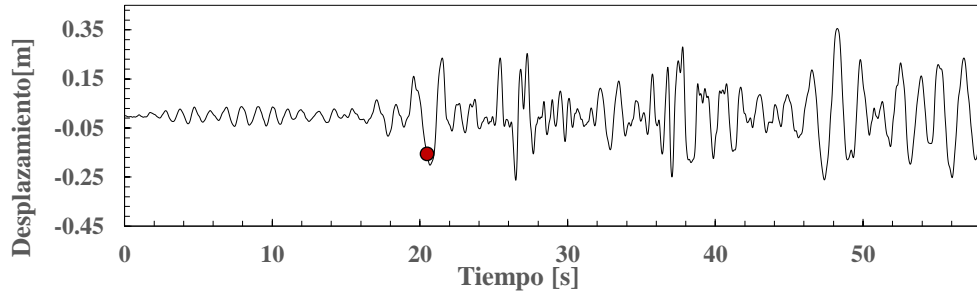


Figura 7.8. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro H registro natural suelo C

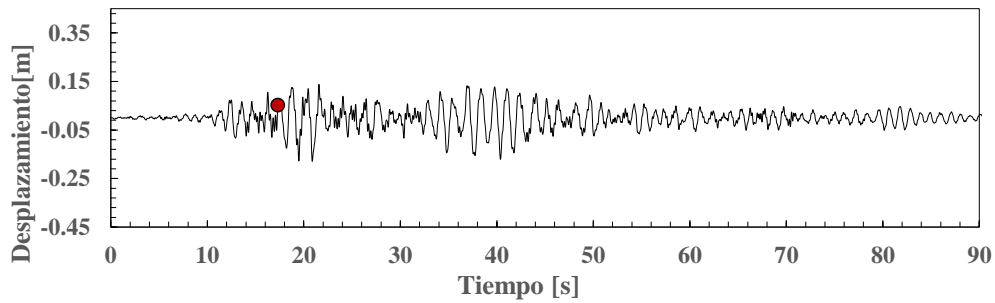


Figura 7.9. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro H registro natural suelo D.

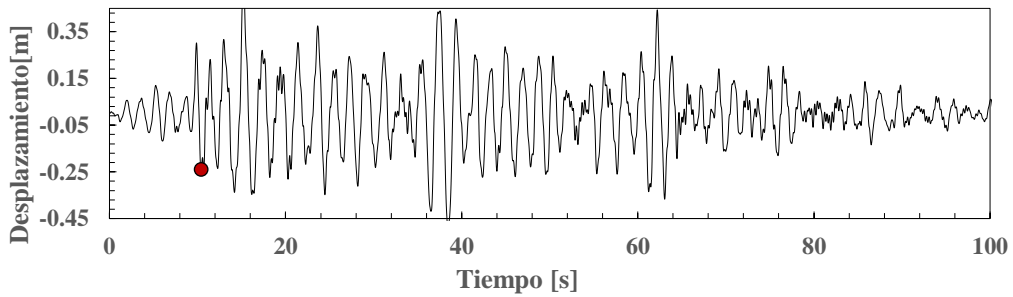


Figura 7.10. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro L registro natural suelo B.

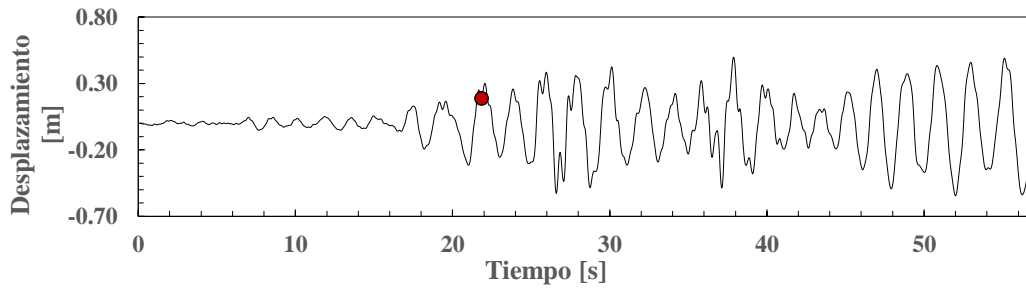


figura 7.11. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro L registro natural suelo C.

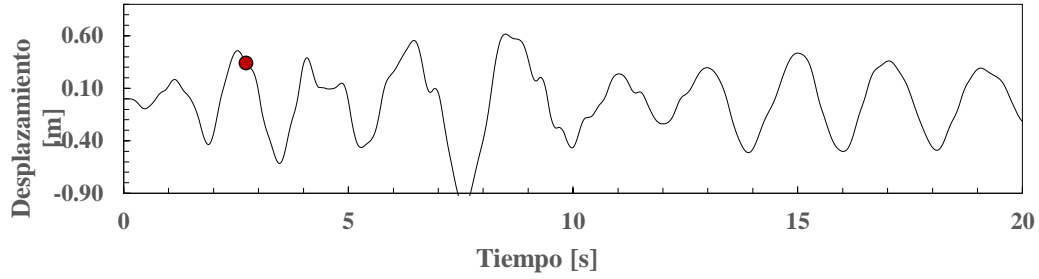


Figura 7.12. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro L registro artificial suelo D.

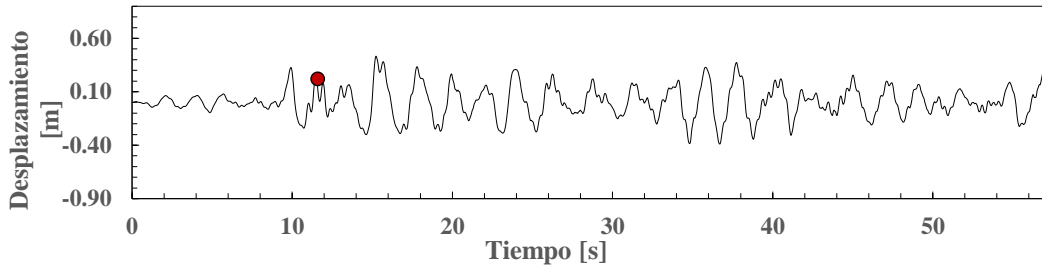


Figura 7.13. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro Ñ registro natural suelo B.

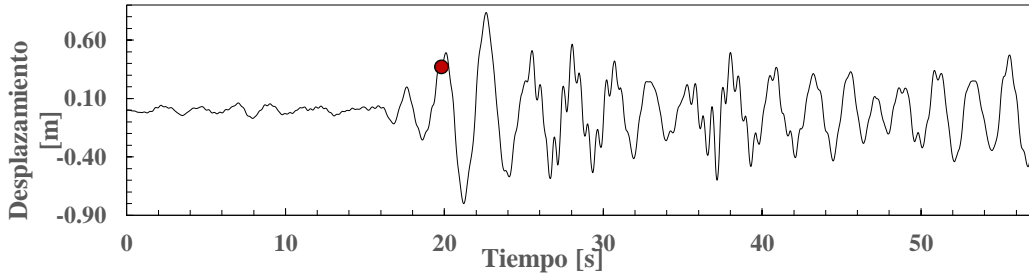


Figura 7.14. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro Ñ registro natural suelo C.

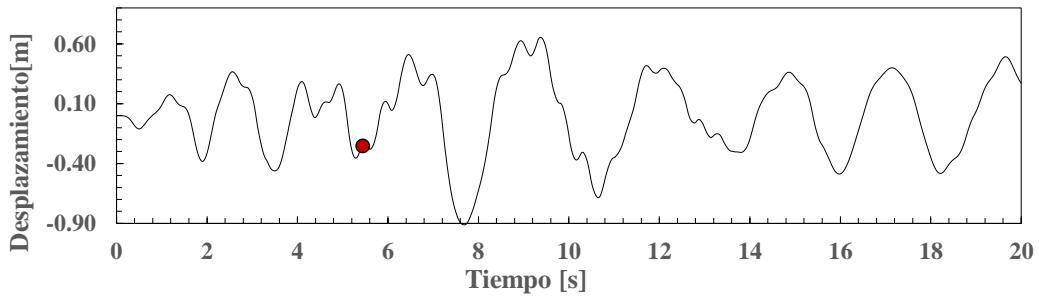


Figura 7.15. Punto donde ocurre el desplazamiento de fluencia, muro Ñ registro sintético suelo D.

A2 CURVAS DE HISTÉRESIS

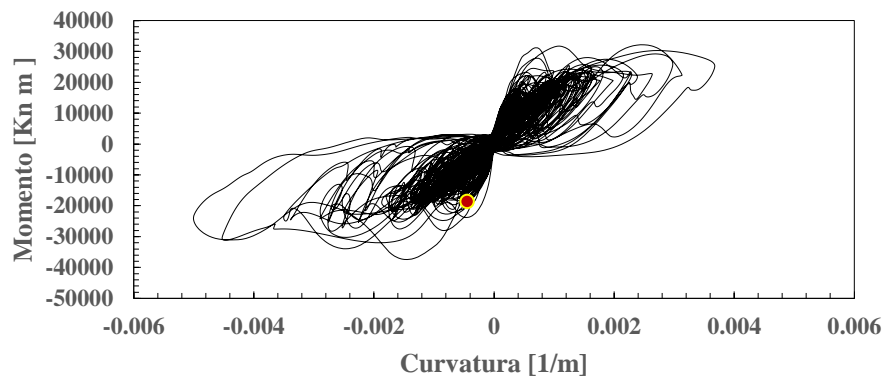


Figura 7.16. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro A registro sísmico natural suelo B

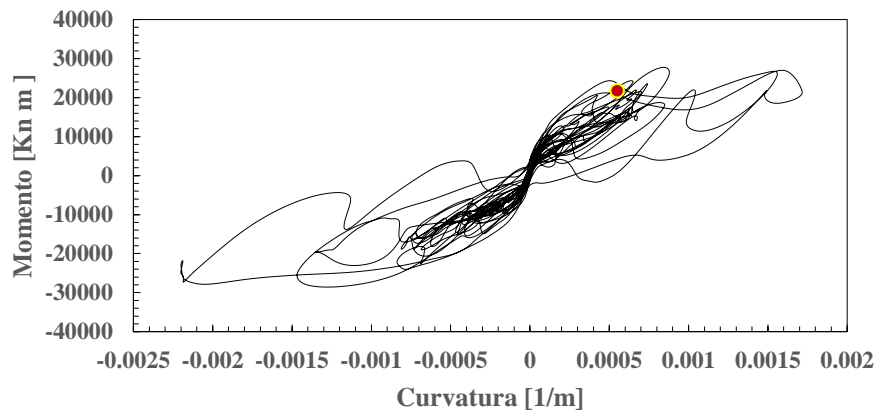


Figura 7.17. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro A registro sísmico sintético suelo C

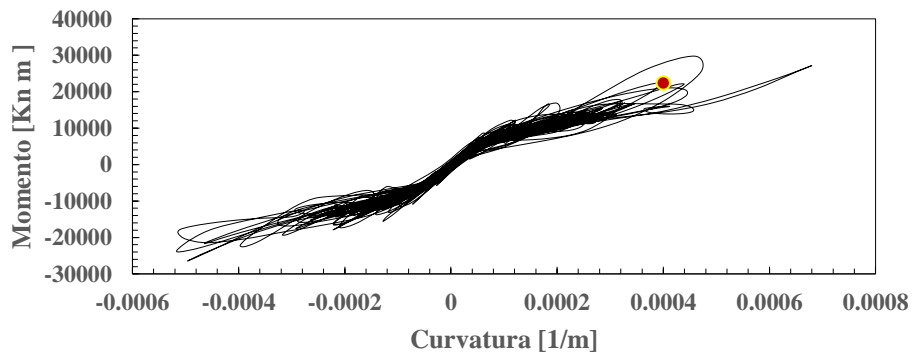


Figura 7.18. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro A registro sísmico natural suelo D

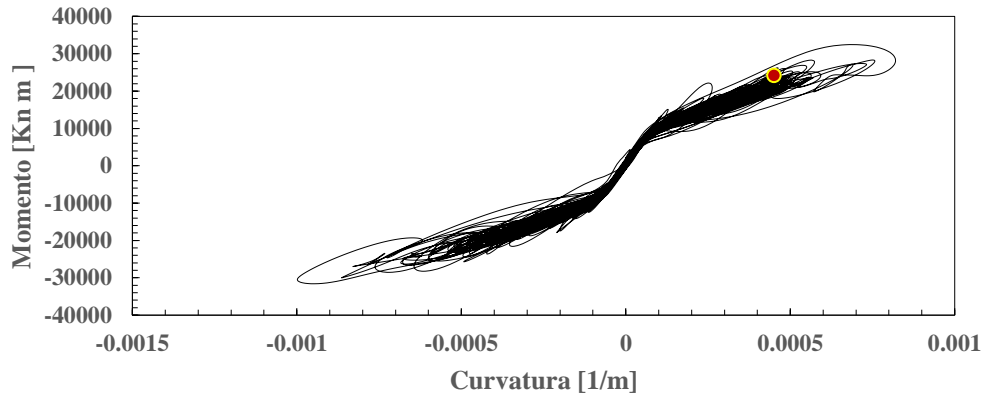


Figura 7.19. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro E registro sísmico natural suelo B

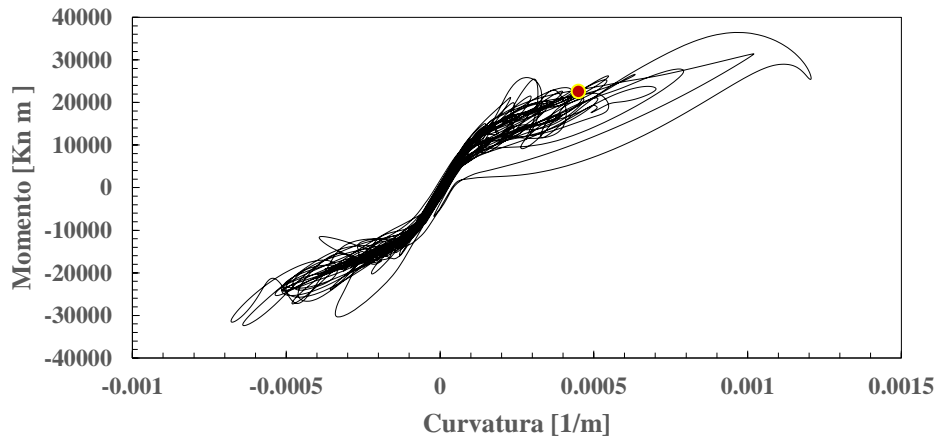


figura 7.20. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro E registro sísmico natural suelo C

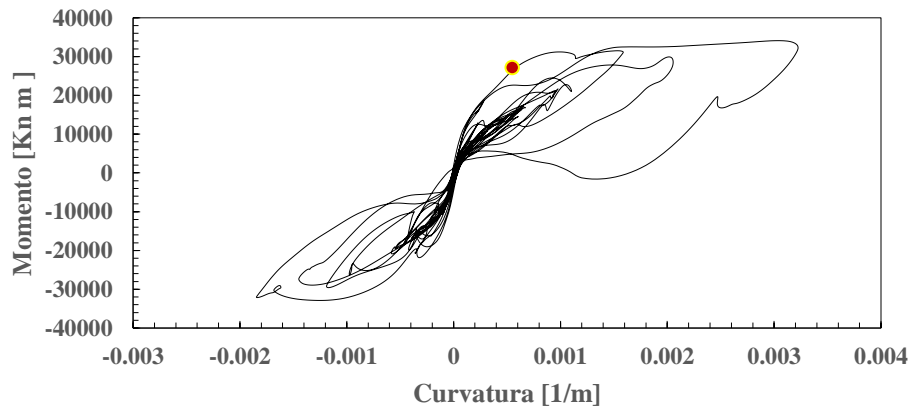


Figura 7.21. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro E registro sísmico sintético suelo D

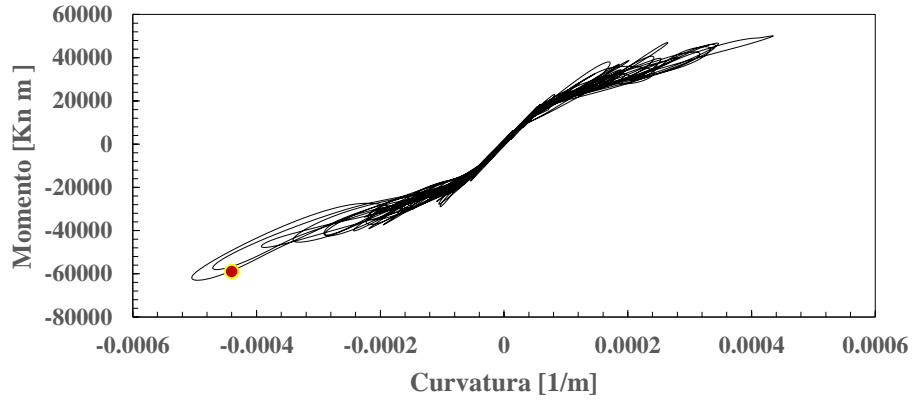


Figura 7.22. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro H registro sísmico sintético suelo B

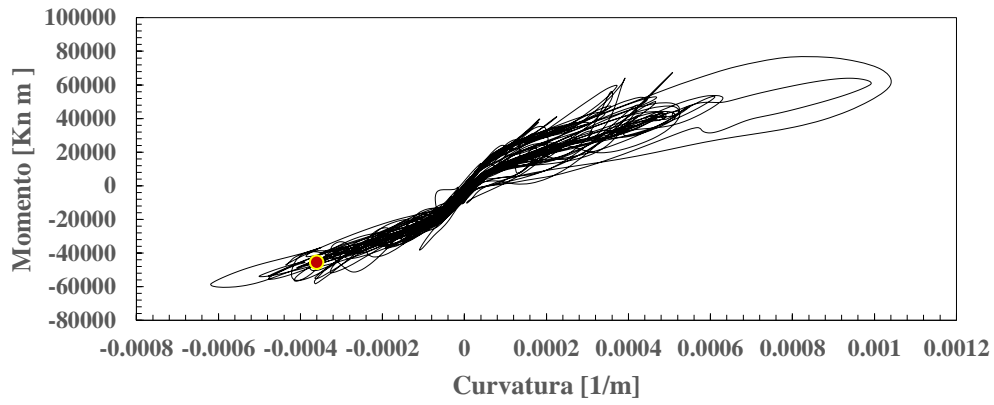


Figura 7.23. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro H registro sísmico natural suelo C

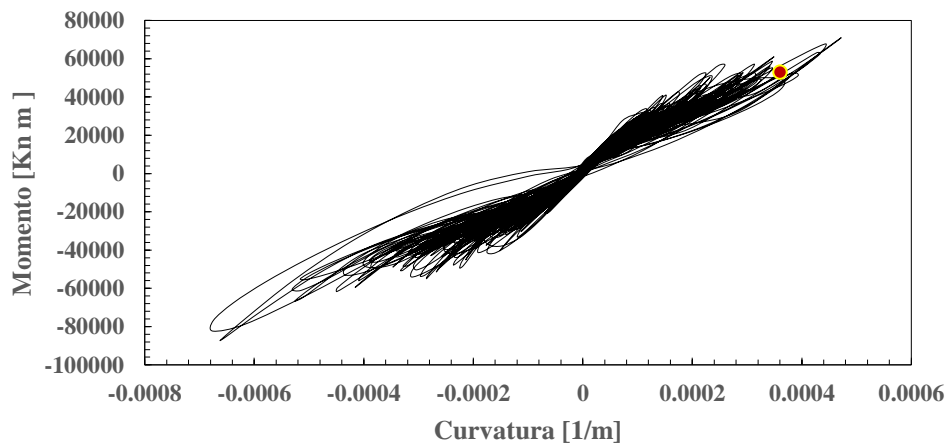


Figura 7.24. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro H registro sísmico natural suelo D

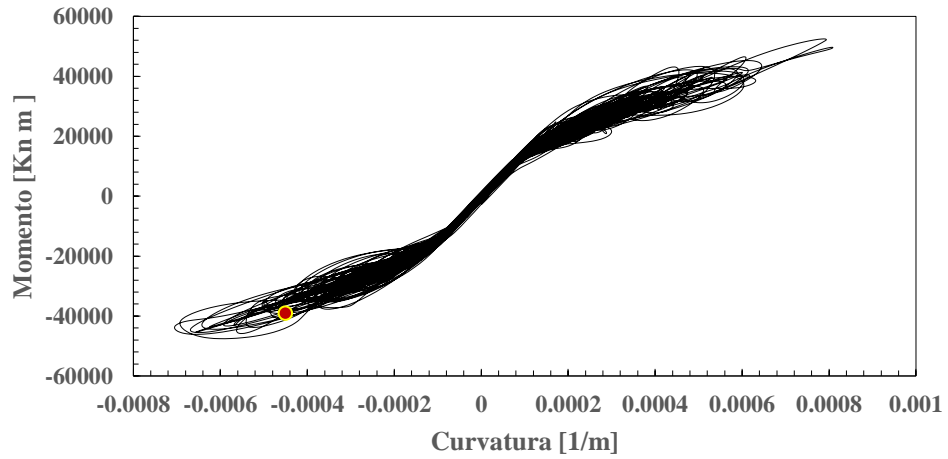


Figura 7.25. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro L registro sísmico natural suelo B

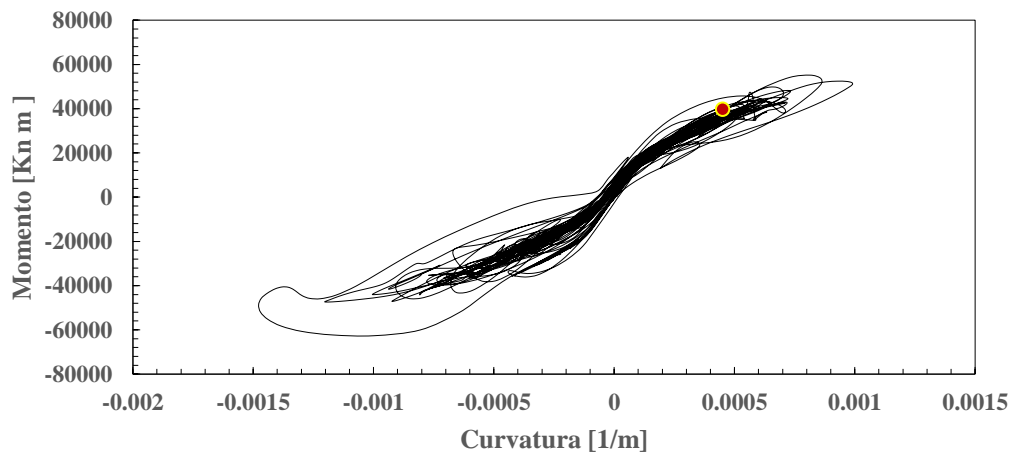


Figura 7.26. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro L registro sísmico natural suelo C

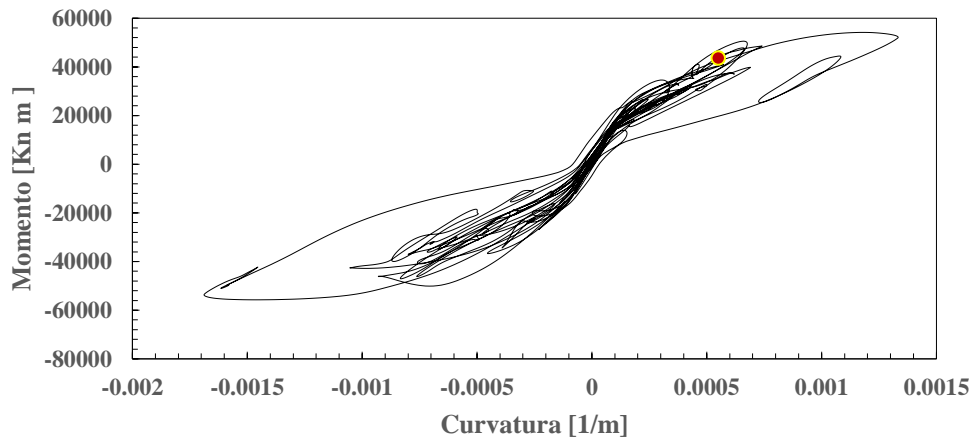


figura 7.27. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro L registro sísmico sintético suelo D

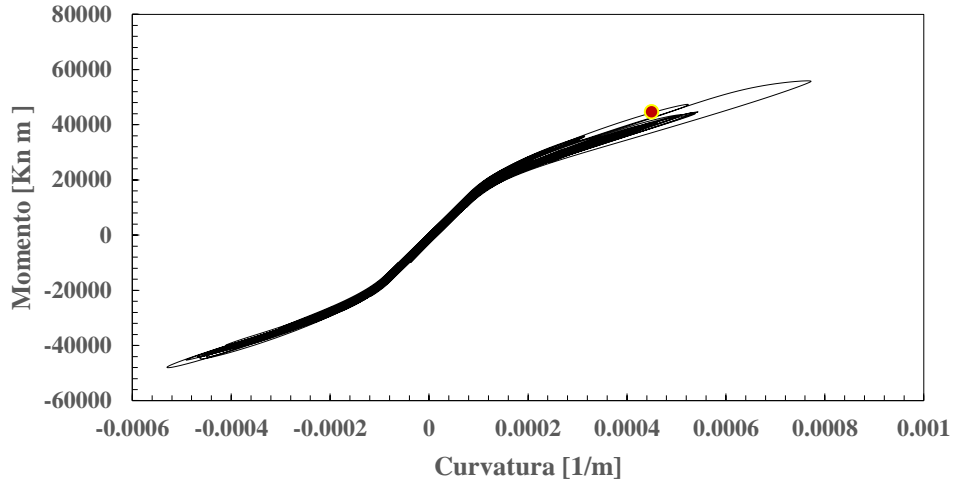


figura 7.28. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro Ñ registro sísmico natural suelo B

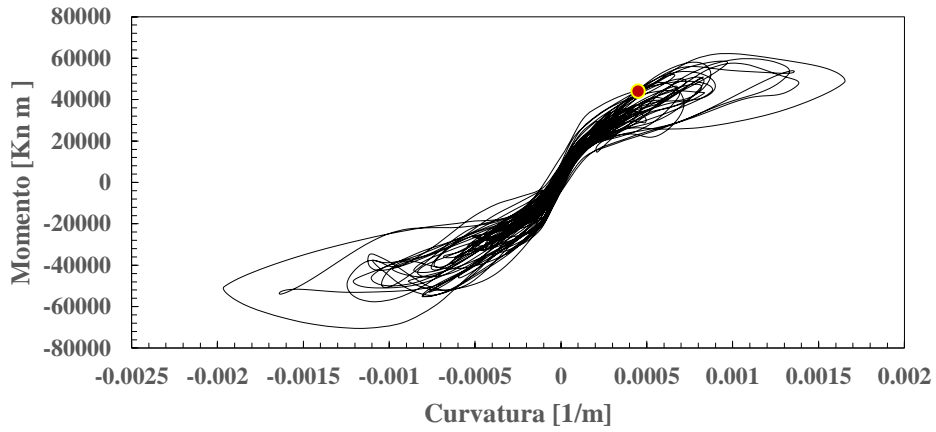


Figura 7.29. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro Ñ registro sísmico natural suelo C

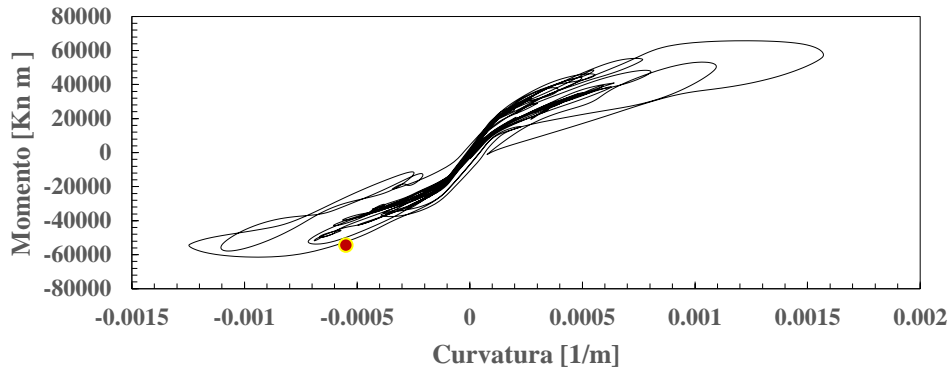


Figura 7.30. Curva de histéresis y punto donde ocurre la fluencia, muro Ñ registro sísmico sintético suelo D