

ESCUELA DE
POSGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL



“Consideraciones relevantes en la construcción de estructuras sismorresistentes sometidas a sismos de subducción”

Dr. Carlos Estuardo Ventura

Departamento de Ingeniería Civil

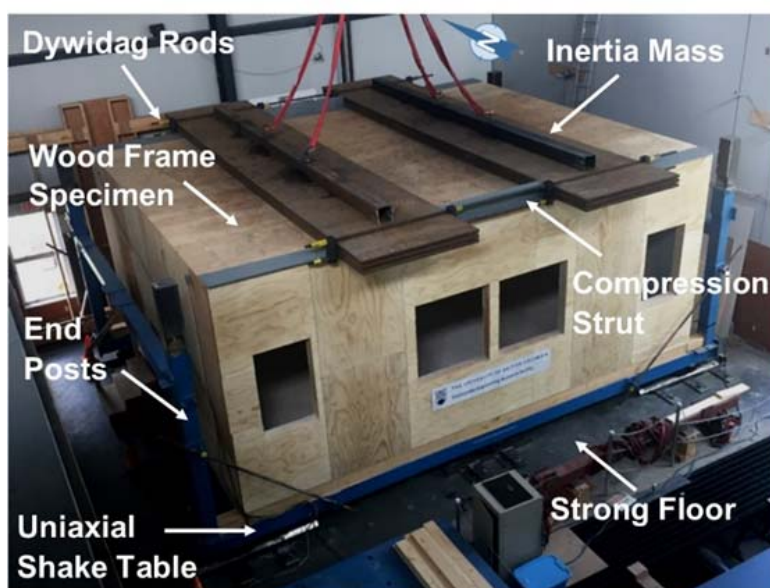
The University of British Columbia, Vancouver, Canadá

ventura@civil.ubc.ca



Lima, Perú, Junio 27, 2019

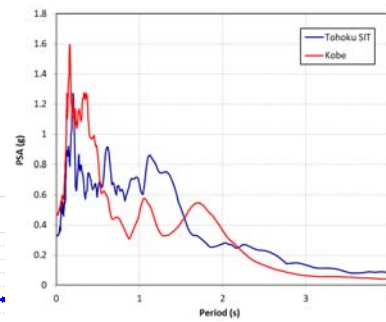
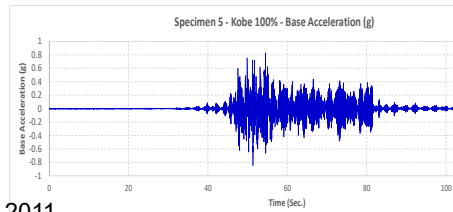
Test Setup



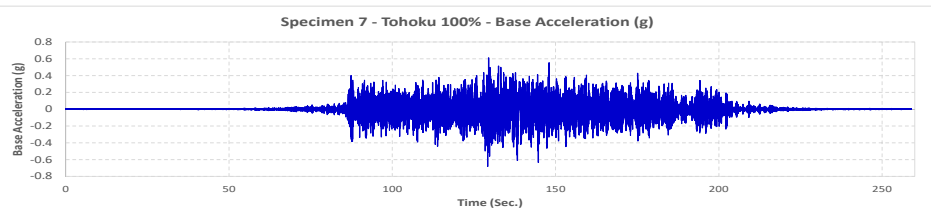
2

Test Setup

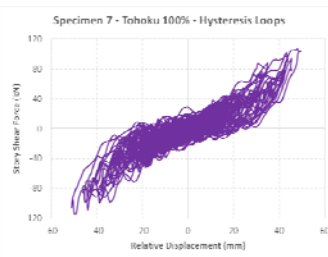
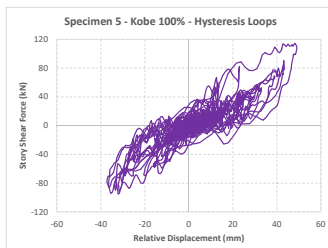
Kobe 1995



Tohoku 2011

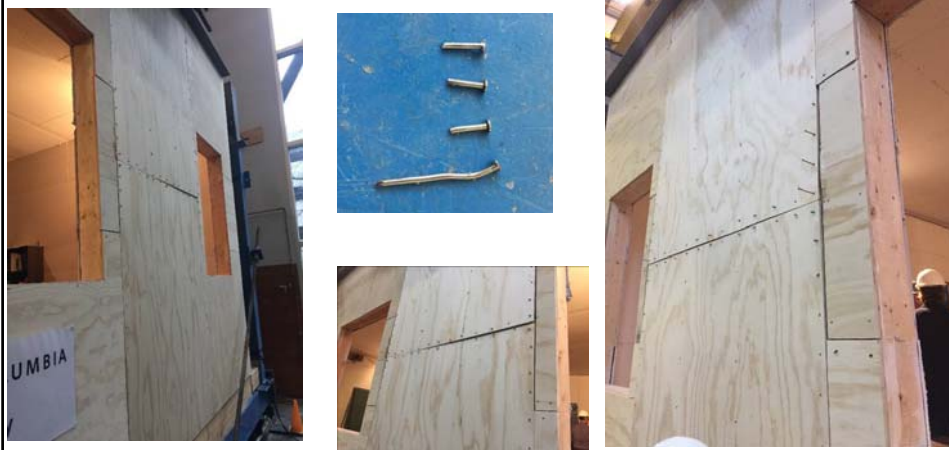


3



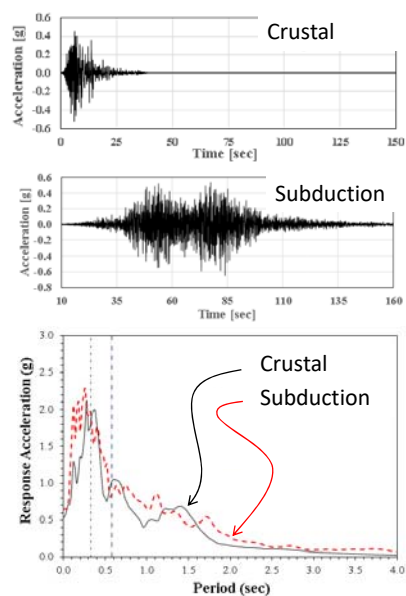
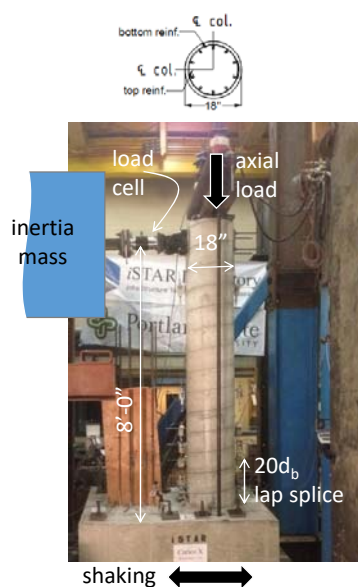
4

Observaciones – Daños típicos



Experimentos con columnas

Courtesy of P. Dusicka

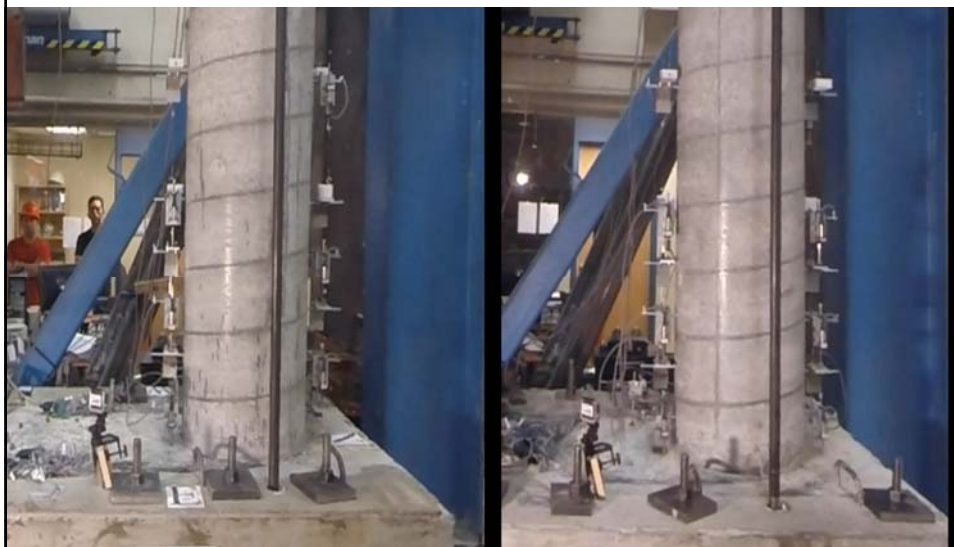


Courtesy of P. Dusicka

Cortical vs. Subducción

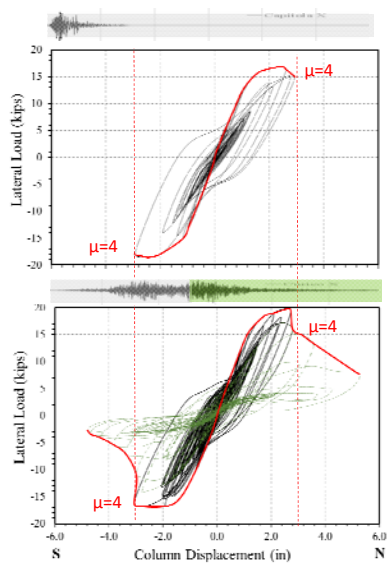
Cortical

Subducción



Courtesy of P. Dusicka

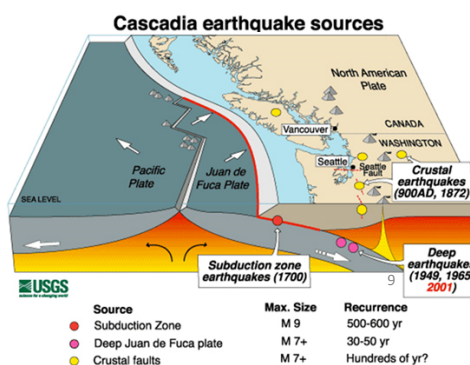
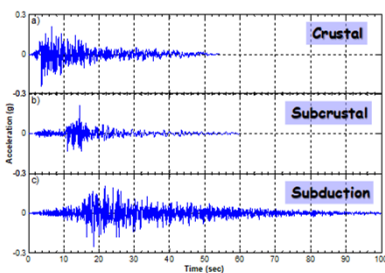
Comparación del comportamiento de la columna



9

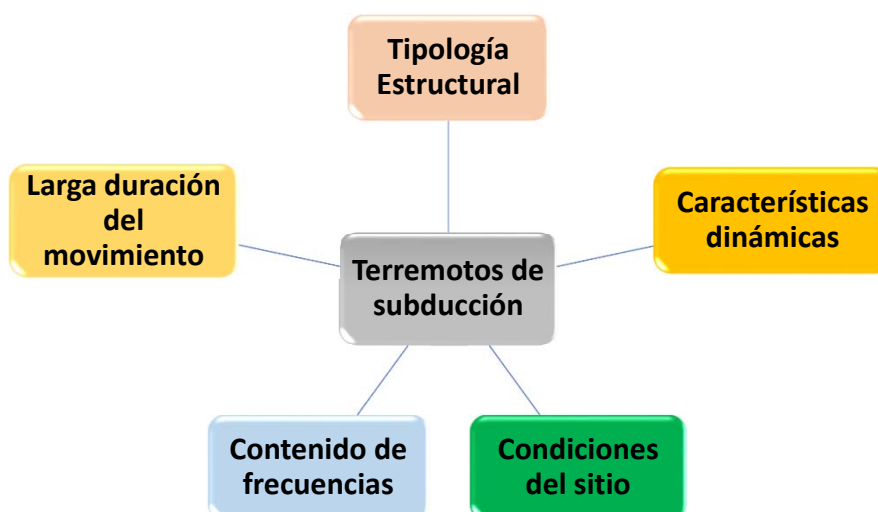
Peligro Sísmico en el Oeste del Canadá

- Corticales
- Intraplaca
- Subducción



10

Alcance del Estudio



Grupo de Investigación de la UBC:

11

Dr. Armin BEBAMZADEH
Research Associate

Michael FAIRHURST
PHD Graduate Student and Research Assistant

Dra. Ilaria Capraro
Former Graduate Student and Research Assistant

Dr. Yuxin Pan
Post-doctoral researcher

David H.L. CHIN
Former MASC Graduate Student and Research Assistant

Marisa Mulder
Former MASC Graduate Student and Research Assistant

Dr. Mehrtash Motamedi
Research Engineer

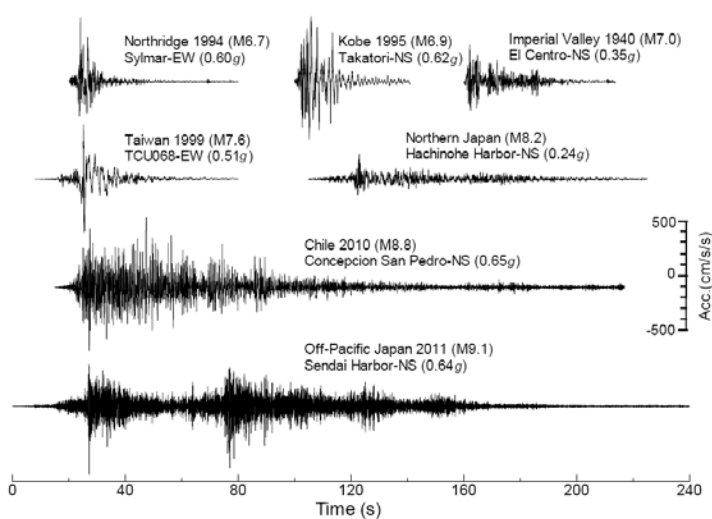
Colaboradores internacionales:

- **Prof. Rubén Boroscheck**, Universidad de Chile
- **Prof. Peter Dusicka**, Portland State University

Introducción

12

- Comparación de registros de diferentes tipos de terremotos:

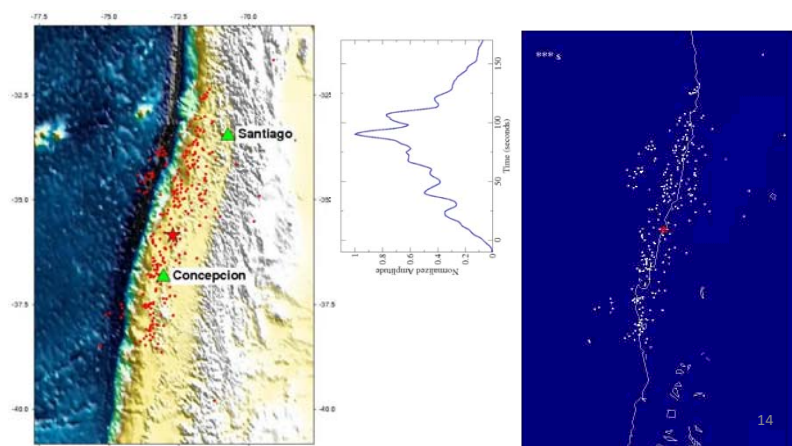


13

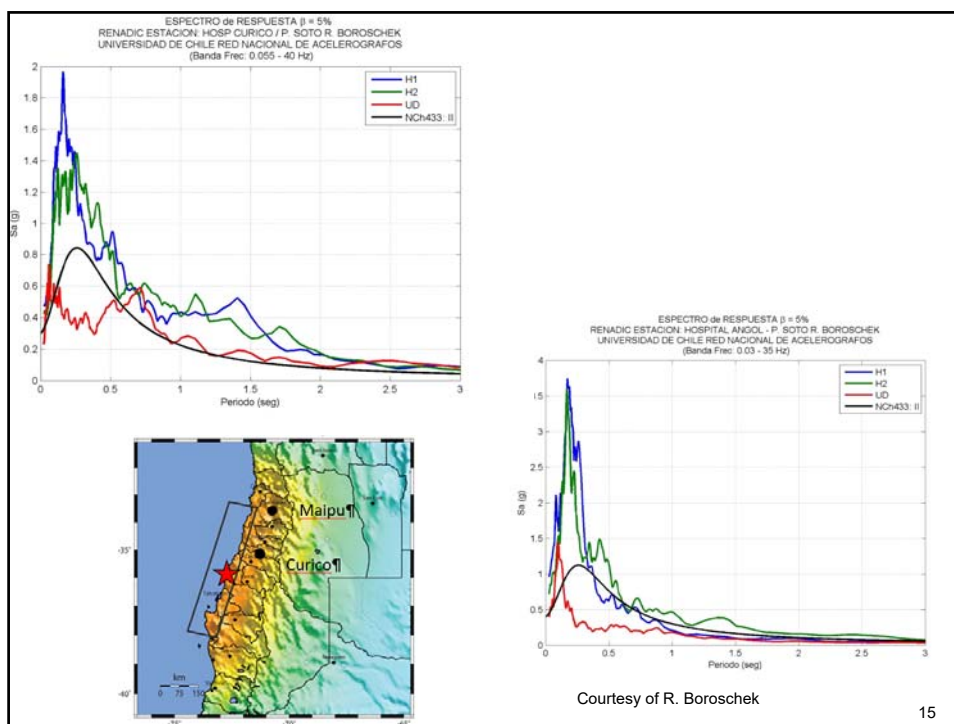
Daños observados durante sismos de subducción y su relación con el movimiento del suelo

14

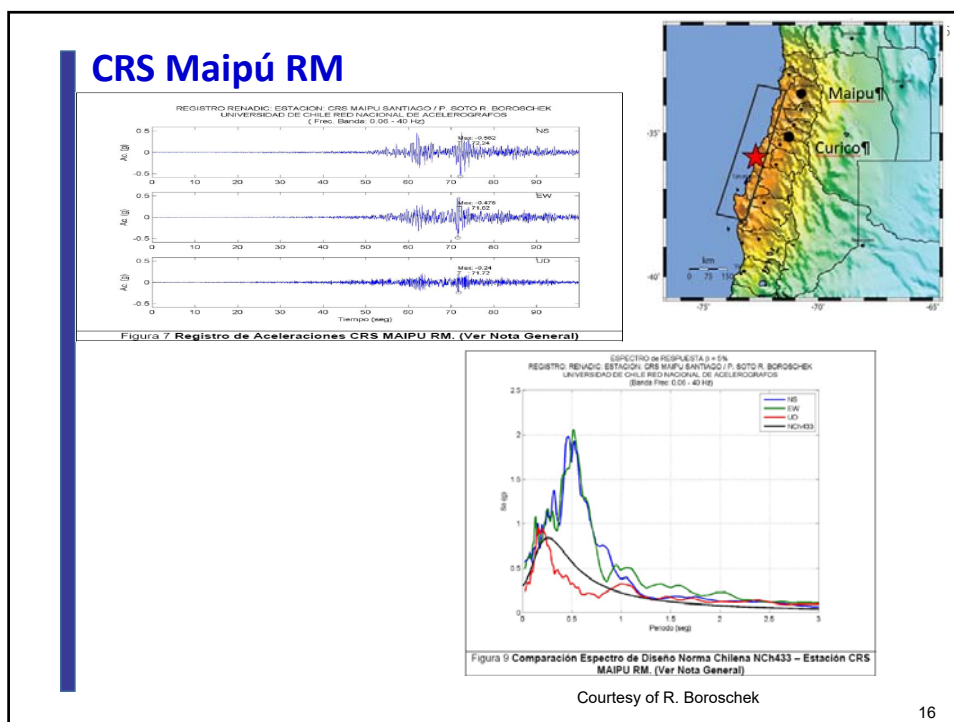
Chile, El Maule - Modelo de Ruptura



Propagation of the rupture front as imaged by the Hi-Net and USArray Transportable arrays Source: Harvard Seismology



15



16

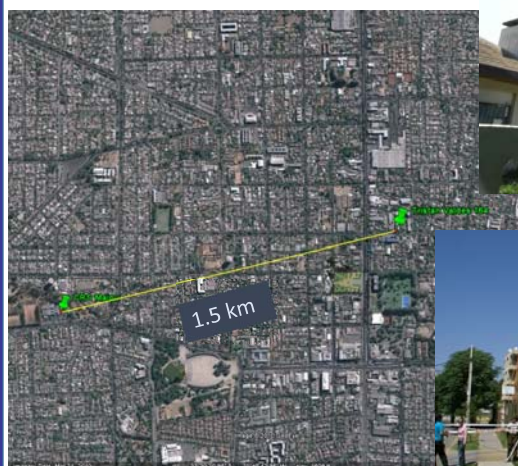
17

CRS Maipú RM



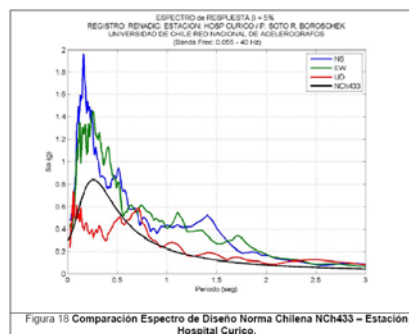
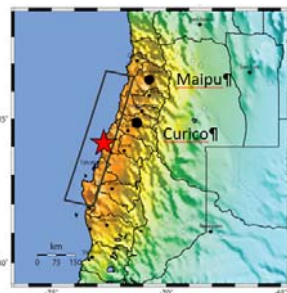
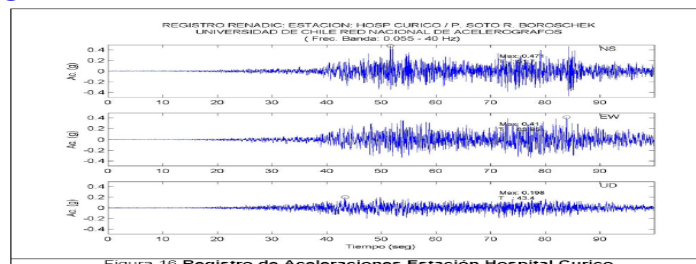
18

Edificio Tristán Valdés



Curicó

19



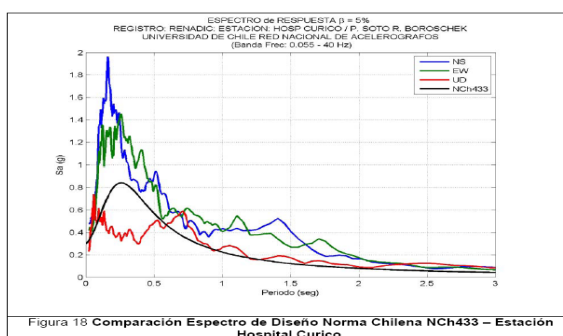
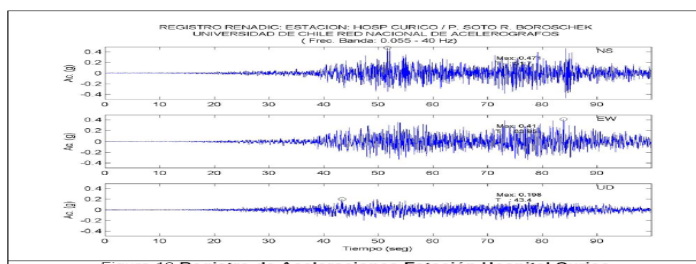
Courtesy of R. Boroschek

Curicó

20

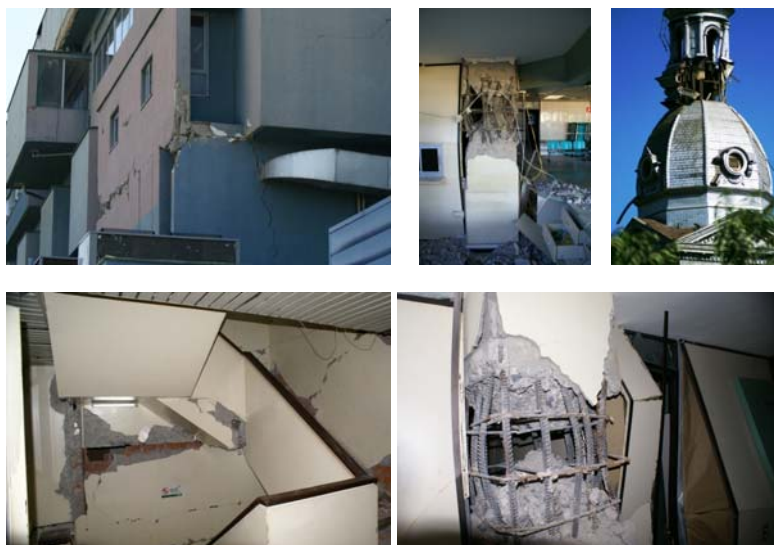


21



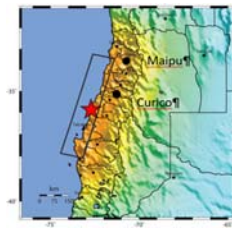
22

Curicó



23

Curicó – Maipú: Efectos del terremoto



Damage in Curico



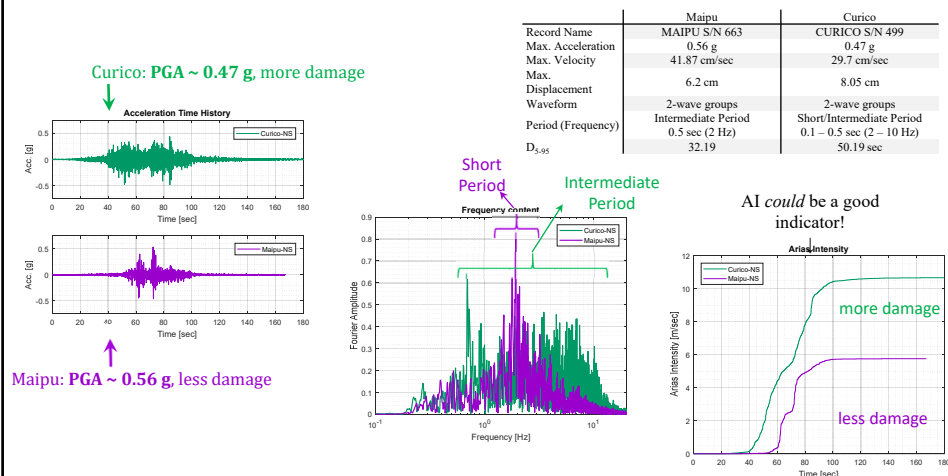
Damage in Maipu



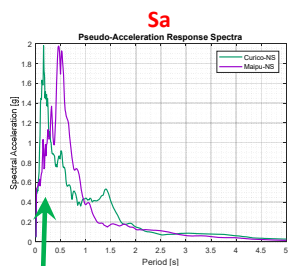
- 90% de las edificaciones de mampostería en Curicó fueron destruidas (casas, hospitales e iglesias);
- El mismo tipo de daños ocurrió en la región afectada por El Maulé;
- En Maipú solo unos pocos edificios colapsaron debido a errores en la construcción (poca ductilidad e irregularidades).

24

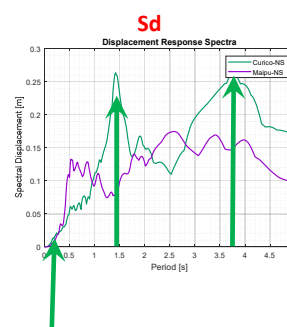
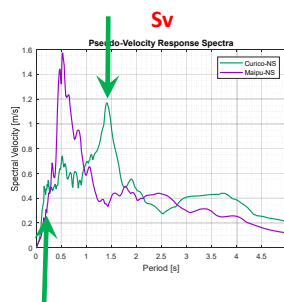
Curicó – Maipú (cont.)



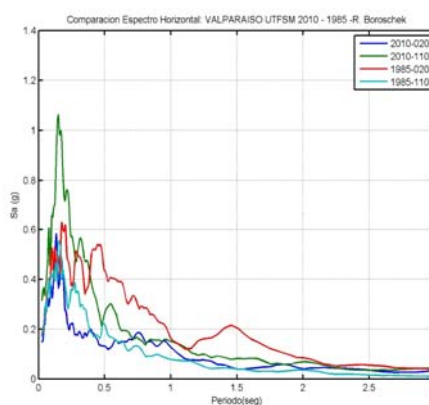
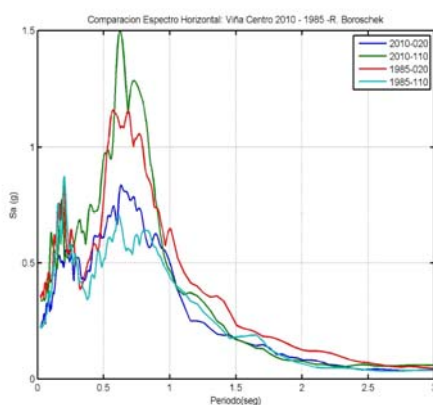
Curicó – Maipú (cont.)



Curicó: Valor pico a $T=0.16$ seg.
Este es el rango de periodos de edificios bajos sin ductilidad que sufrieron daños severos.



Comparación de Espectros de Respuesta: 2010 vs 1985



Courtesy of R. Boroschek

Edificio CCHC, Santiago.



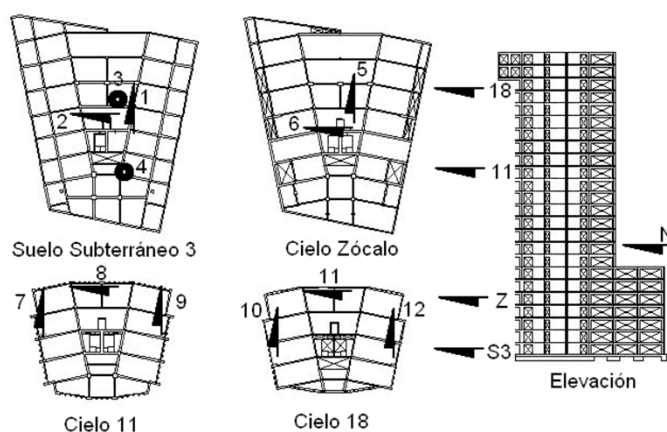
- 20 pisos, 3 sótanos
- Marcos y muros de Concreto Reforzado
- Altura: 66 m

Courtesy of R. Boroschek

27

Edificio CCHC, Santiago.

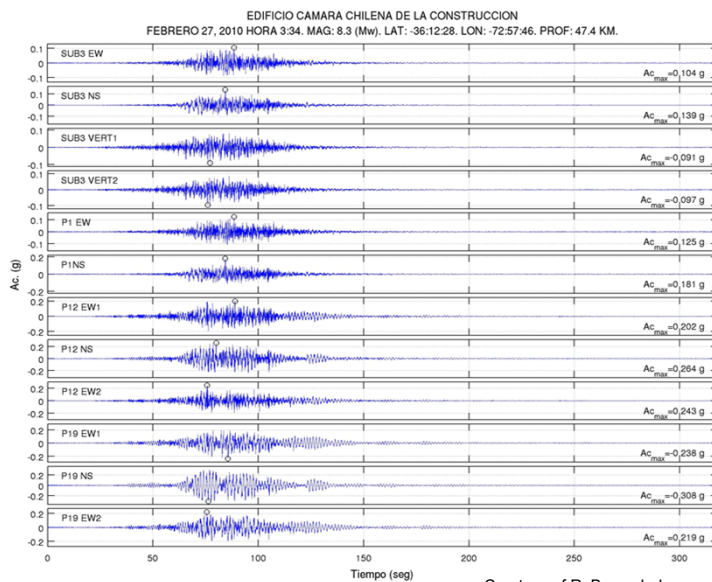
Localización de Sensores



Courtesy of R. Boroschek

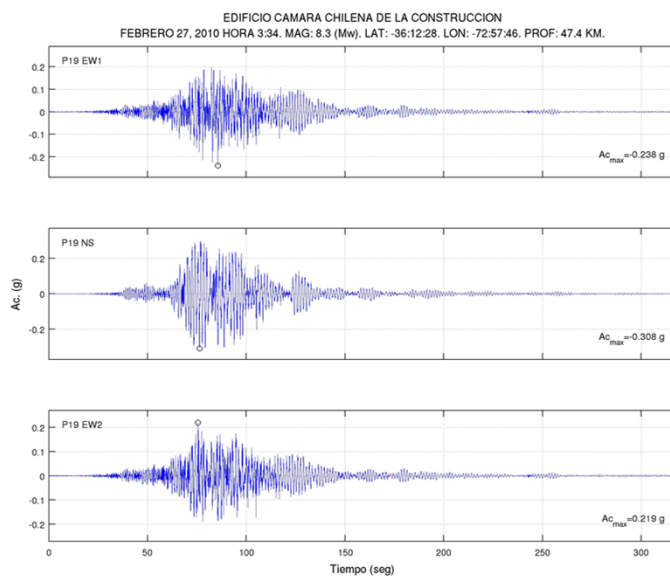
28

Edificio CCHC, Santiago.



29

Edificio CCHC, Santiago.



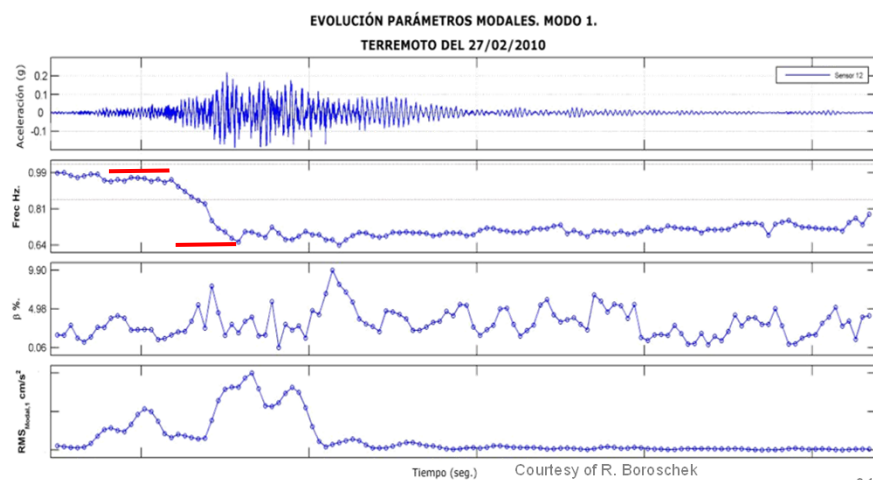
30

Edificio CCHC, Santiago.

Variación de las propiedades dinámicas

Aceleración máxima basal (PGA): 0.14 g

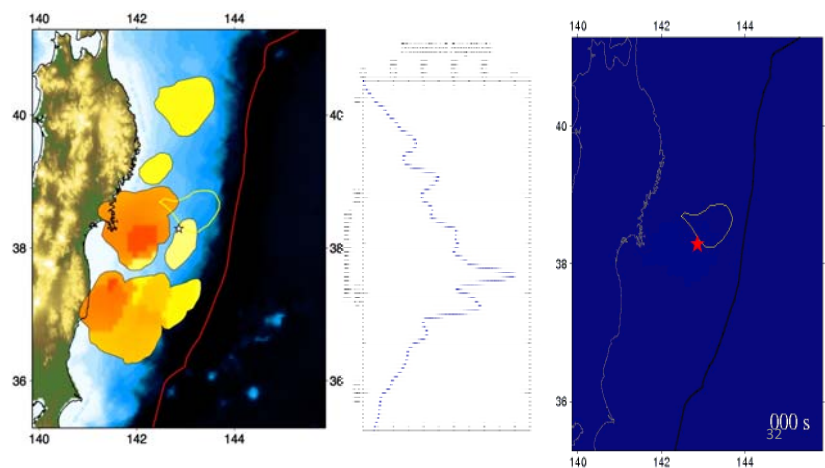
Aceleración máxima pisos superiores: 0.31 g



31

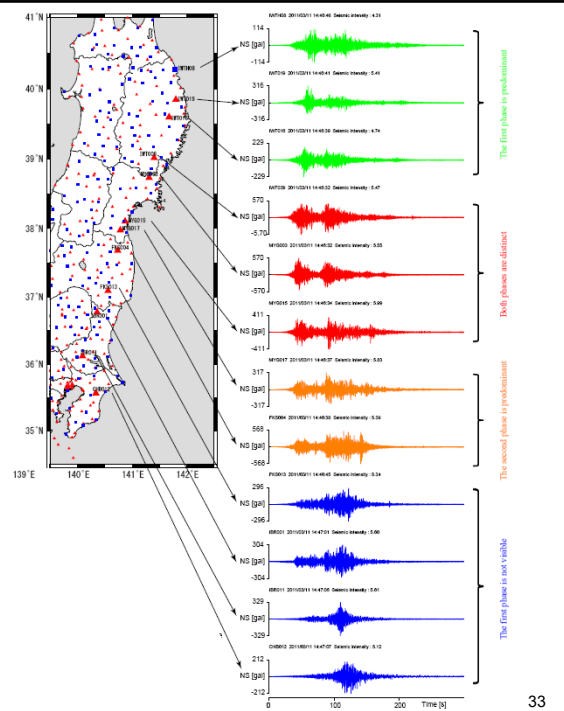
Japón, Tohoku – Modelo de Ruptura

32



Propagation of the rupture front as imaged by the Hi-Net and USArray Transportable arrays Source: Harvard Seismology

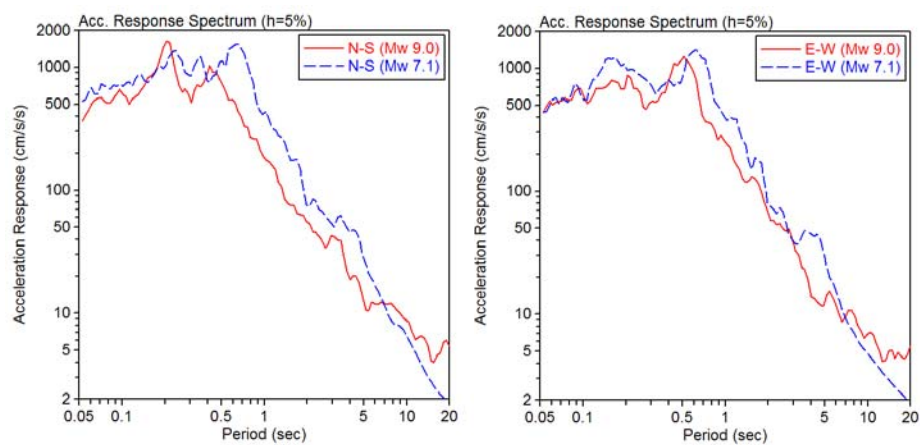
Aceleración del suelo



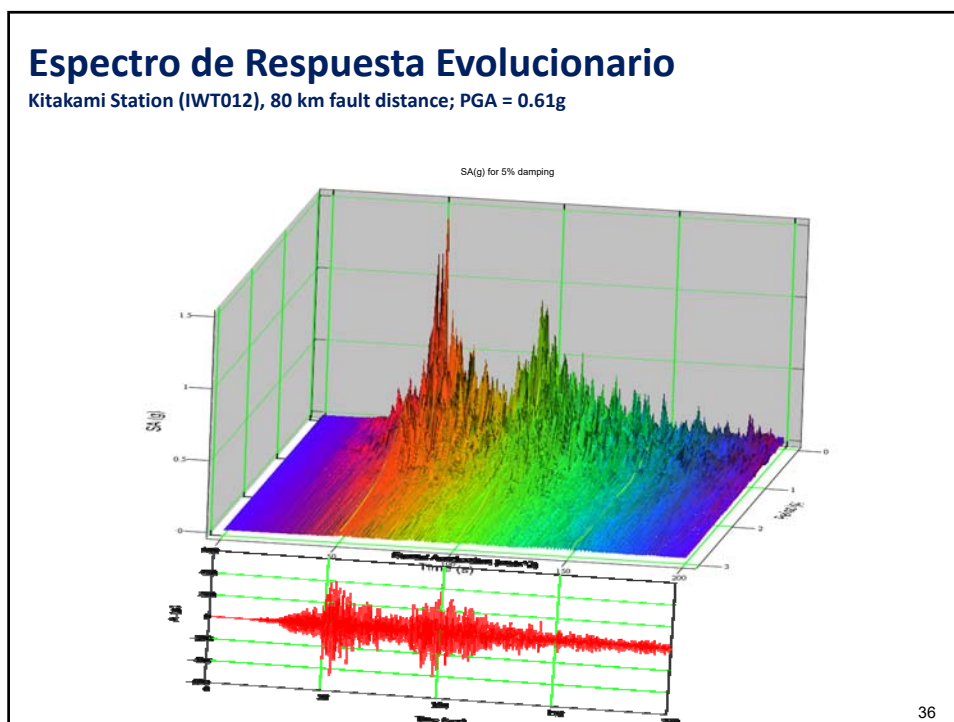
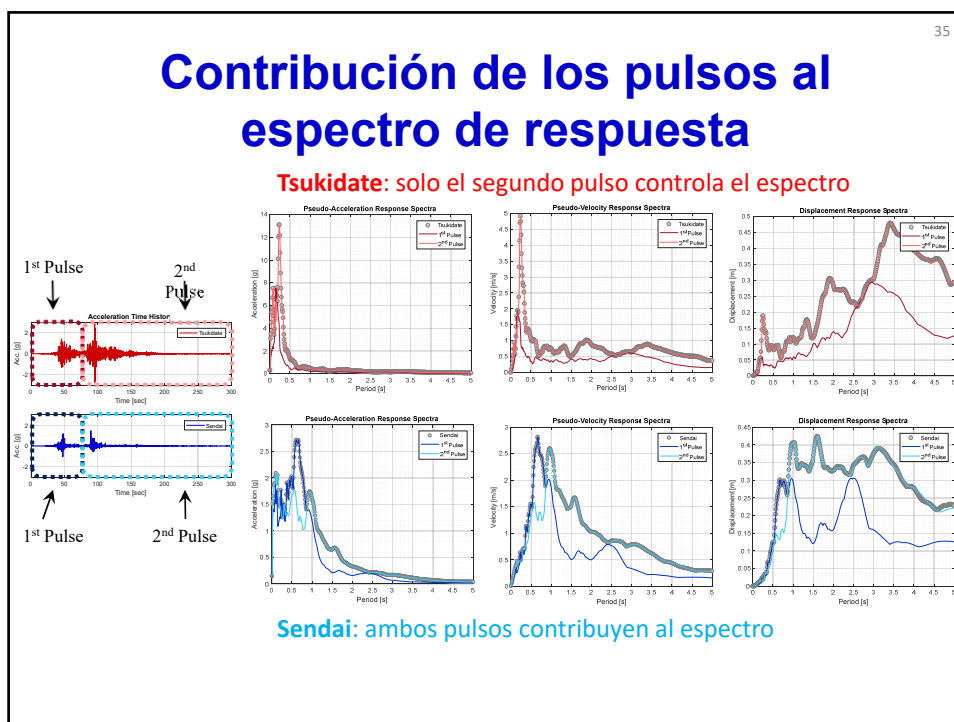
33

Comparación de Espectros de Respuesta: Marzo 11 vs Abril 11

Estación FURUDONO



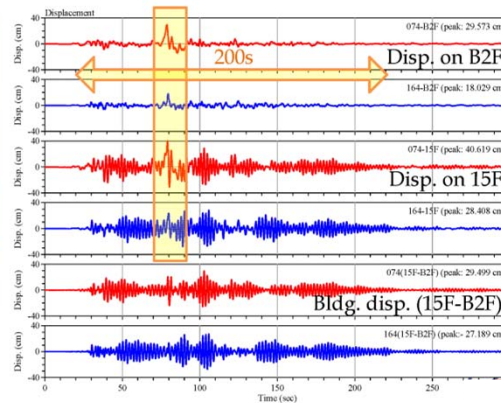
34



SND: Office bldg. in Sendai City downtown



15-story Steel bldg.



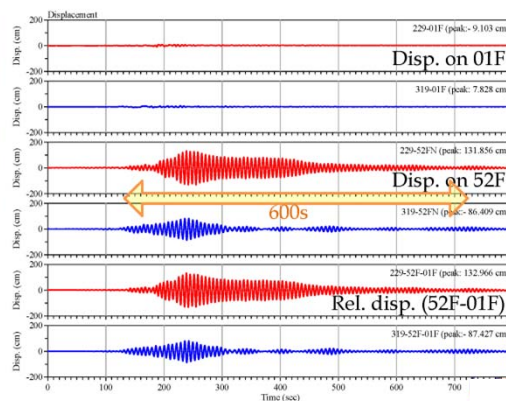
11

37

SKS: Office bldg. in Osaka bay area



52-story Steel bldg.



13

Tohoku 2011

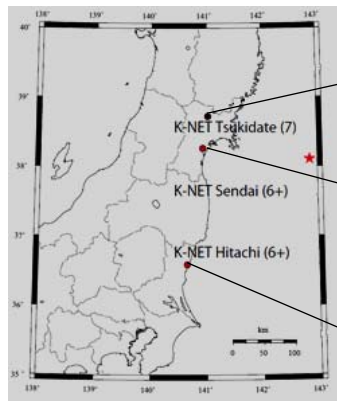
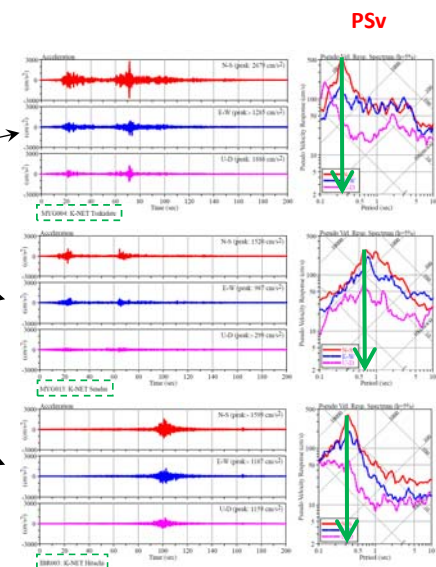


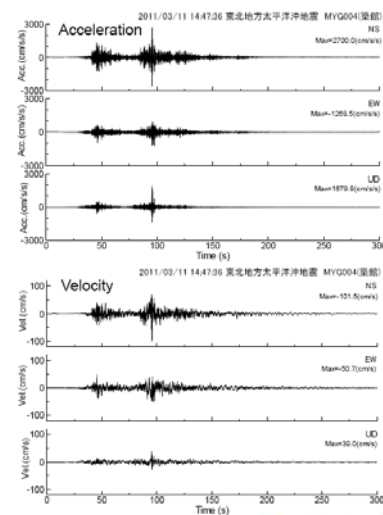
Figure 11: Station locations.



I. Nishiyama, O. Izuru, F. Hiroshi and Y. Okuda, "Building damage by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake and coping activities by NILIM and BRI collaborated with the administration", 43rd Joint Meeting of U.S.-Japan Panel on Wind and Seismic Effects. - Tsukuba, Japan, 2011.

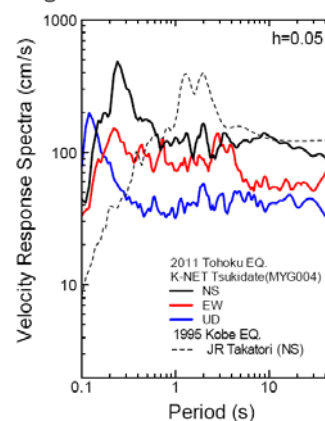
Tsukidate – Registros y Espectros

Máxima PGA = 2.8g



MYG004 (Fault Distance = 75.1 km): PGV = 94 cm/s and Peak SA = 12.9 g at 0.24 s

K-NET Tsukidate (MYG004) Highest Acceleration Observed



Midorikawa Lab.

Aceleración pico, PGA = 2.8g – Pero no daño!!

41

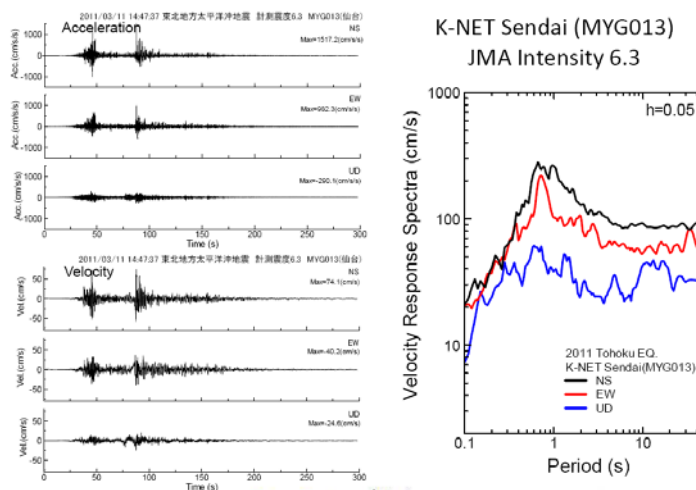
A House Next to K-NET Site



Midorikawa Lab.

Sendai – Registros y Espectros

42



72 km fault distance

Midorikawa Lab.

Daños en Sendai

43



Daño estructural en muros



Daño extenso en pavimentos

Colapso del 1^{er} piso



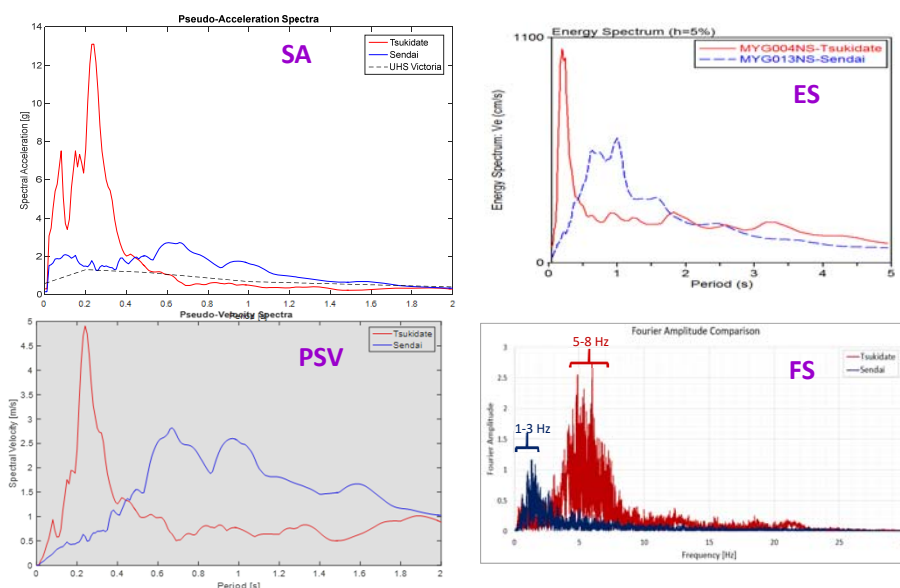
43

44

**Estudio de daño
potencial basado en
registros del
movimiento del suelo**

Tohoku – Espectros de Respuesta

45



Tsukidate - Desplazamientos del suelo

46

Onda sinusoidal con frecuencia de 2.5 Hz a los 100 segundos

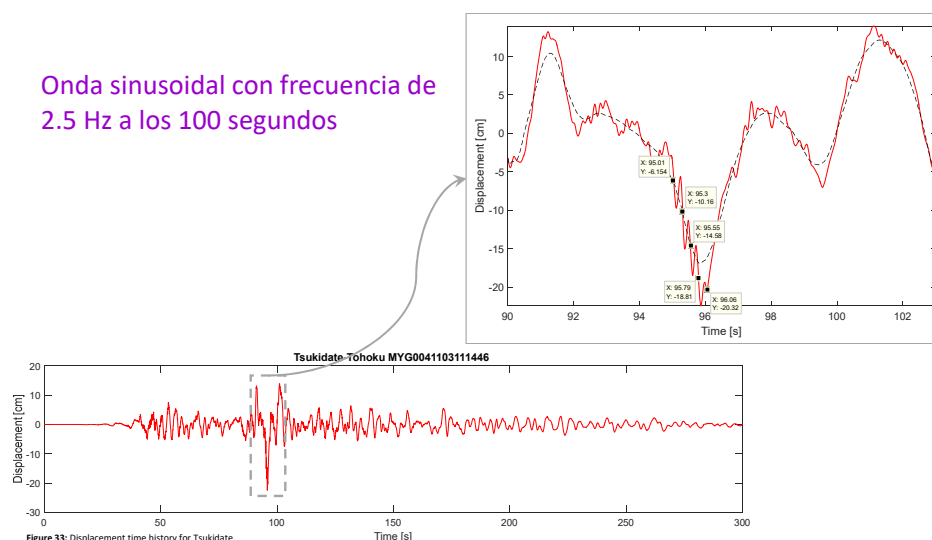


Figure 33: Displacement time history for Tsukidate.

Onda sinusoidal simple – efecto del numero de ciclos en el espectro de respuesta

47

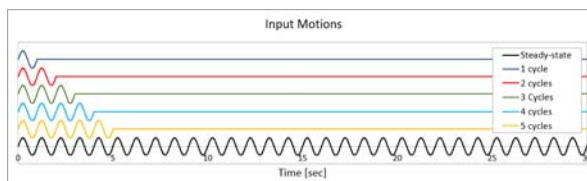


Figure 34: Input motions for cyclic waves.

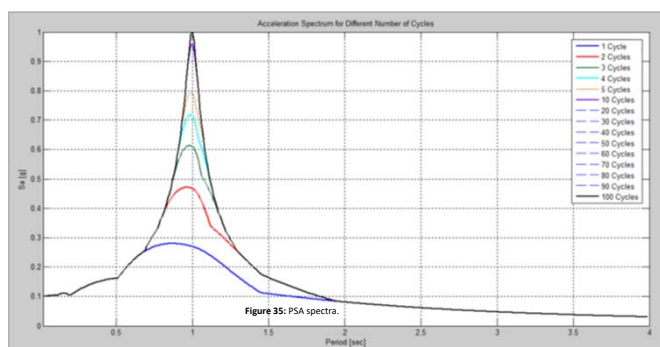
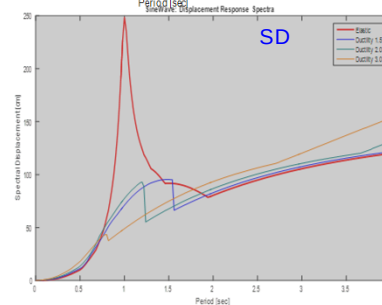
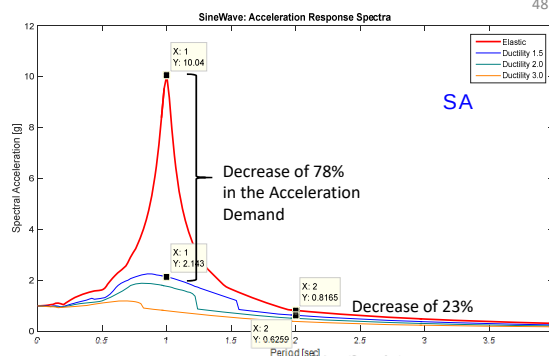
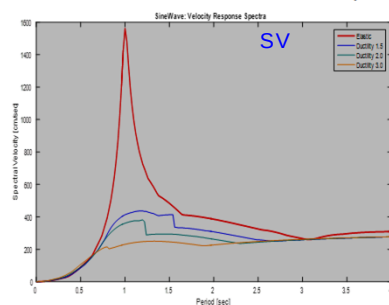
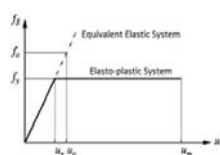


Figure 35: PSA spectra.

47

Onda sinusoidal

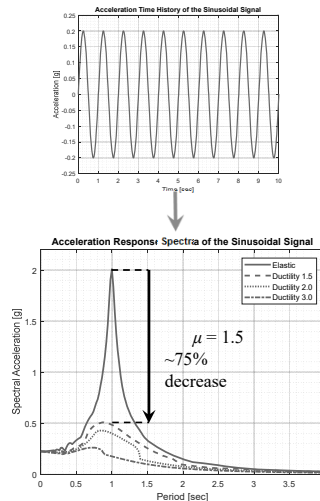
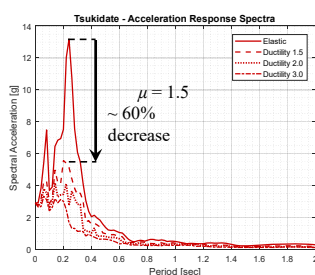
Espectros de
respuesta no-lineal
(Sistemas Elasto-plásticos)



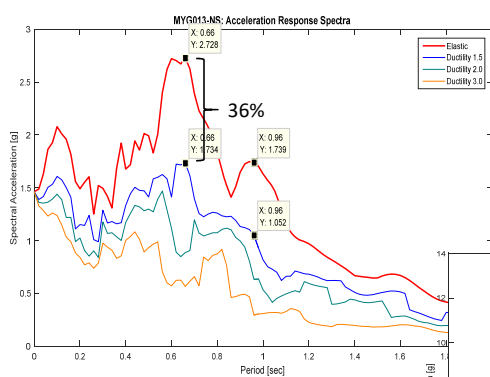
Espectros de respuesta para ductilidad constante

Espectro inelástico para onda sinusoidal de $T = 1.0$ seg, ampl. 0.2 g.

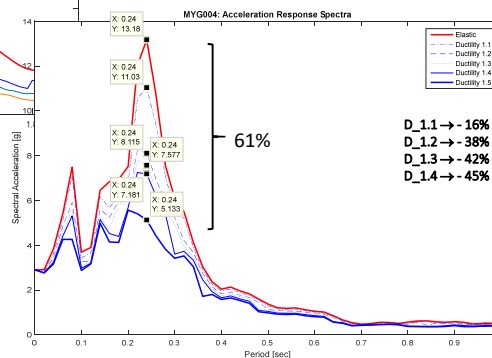
- Tal como se ve en el espectro para Tsukidate, para $\mu = 1.5$ el espectro inelástico de la onda sinusoidal indica una reducción en amplitud del 75%.



Espectros de respuesta para ductilidad constante⁵⁰

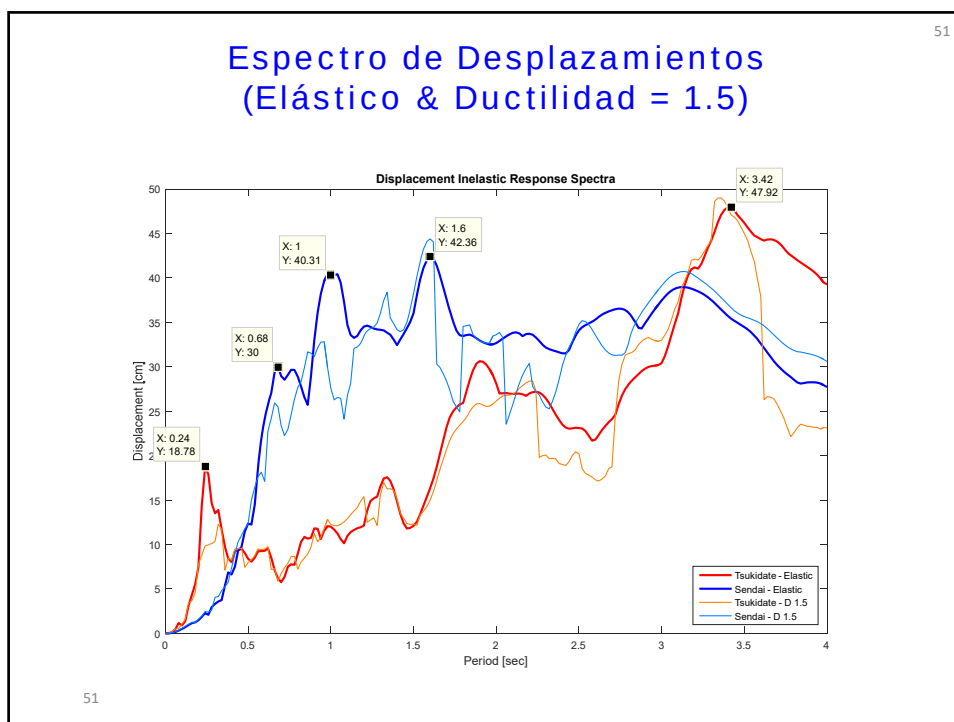


Sendai



Tsukidate

50



52

Efectos de la larga duración del movimiento del suelo

- Fairhurst, M., Bebamzadeh, A., and Ventura, C.E., (2017). "Investigation of Collapse Risk Under Long Duration Ground Motion," *16th World Conference on Earthquake Engineering*, January 9-13, Santiago, Chile.

No. 52

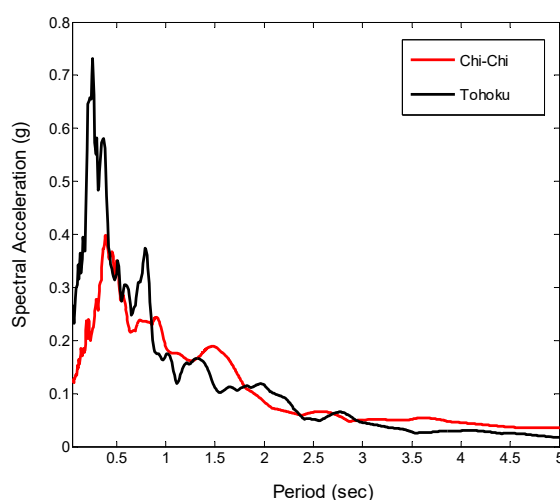
53

Efectos de la larga duración del movimiento del suelo

- Grupos de reconocimiento de daños han reportado en varias ocasiones daños severos debido a la larga duración del evento, debido en parte al alto número de ciclos de las fuerzas.
- Muchas pruebas experimentales indican que la duración de la carga y el número de ciclos son muy importantes en la generación de daños.
- Estudios basados en modelos numéricos han obtenido resultados mixtos:
 - muchos tienden a indicar que la duración es importante al considerar daños acumulados.
 - los resultados son mixtos cuando se trata de determinar la relación entre duración y las respuestas máximas (i.e., máxima deriva)
- Todavía no está bien establecido el cual es el efecto de la duración en la probabilidad de daño o colapso de estructuras

54

Importancia de la duración del movimiento del suelo



Chi Chi fue escalado para tener un espectro similar a Tohoku para $T > 0.5$ segundos

Efectos de la Larga Duración

55

- Estudios de los efectos de larga duración y **medidas de desplazamientos máximos***:

Author(s)	Year	Structural Model	Measure	Duration Importance
Chandramohan et al.	2016	Steel moment frame inc. deg.	Significant dur. (5-75%)	High
Chandramohan et al.	2016	Concrete moment frame inc. deg.	Significant dur. (5-75%)	High
Chin et al.	2016	Concrete moment frame inc. deg.	Significant dur. (5-95%)	High
Raghunandan and Leil	2013	Concrete moment frame inc. deg.	Significant dur. (5-95%)	High
Aschheim and Black	1999	Bi-linSFT	Inc foreshocks	High
Eibl et al.	1996	Degrading masonry	Bracketed duration	High
Mahin	1980	Bi-linSFT	Inc aftershocks	High
Jennings and Husid	1968	Bi-linearZRO inc. G.	Dur. of sim strong motions	High
Trembley	2003	Braced Steel Frames	Different ground motions	Moderate
Gupta et al.	2001	Strength and Stiff. Deg. SDOF	Inc aftershocks	Moderate
Bonelli	1998a	10-storey RC wall frame	-	Low
Bonelli	1998b	10-storey RC wall frame	-	Low
Hancock and Bommer	2006	8-storey RC wall frame	Several dur. definitions	None
Iervolino et al.	2006	12 Nonlinear SDOFs	Significant dur. (5-95%)	None
Cosenza et al.	2004	24 Nonlinear SDOFs	Significant dur. (5-95%)	None
Aschheim and Black	1999	Bi-linHRD	Inc foreshocks	None
Shome et al.	1998	SDOF Steel moment frame	Magnitude	None
Cornell	1997	Bi-linearZRO & stiff. Deg.	Magnitude	None
Rahnama and Manuel	1996	Bi-linearZRO	Significant dur. (5-95%)	None
Bazzurro and Cornell	1992	5m Braced steel frame	Magnitude	None
Saragoni	1985	Bi-linearZRO	Dur. of sim strong motions	None
Araya and Saragoni	1980	Bi-linearZRO	Dur. of sim strong motions	None
Bereto et al.	1978	Bi-linearZRO	-	None

*Modified from: Hancock, J., & Bommer, J. J. (2006). A state-of-knowledge review of the influence of strong-motion duration on structural damage. *Earthquake spectra*, 22(3), 827-845.

Efectos de la duración en la Respuesta de Edificios

56

1. Cuando se consideran dos registros con la misma intensidad, el récord de duración más larga resulta más perjudicial para la estructura que el record de duración corta porque el movimiento de más larga duración impone mayores demandas de energía en la estructura.
2. La duración no tiene mucha influencia en la deriva máxima de las estructuras diseñadas de acuerdo con el código de diseño.
3. El efecto de la duración en la resistencia al colapso depende de:
 1. las capacidad de resistir fuerzas, la ductilidad y la forma de disipar energía de la estructura
 2. la intensidad de movimientos de suelo y el contenido de frecuencias que se espera en el sitio del edificio.
4. Los resultados indican que los terremotos de duración más larga hacen que una estructura sea más frágil.

After A. Liel, & M. Raghunandan

57

Métricas de la Duración vs Daño

Las siguientes métricas de duración y su correlación con el daño han sido estudiadas:

1. Intensidad de Arias

2. Duración Significativa $I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^T a^2(t) dt$

3. Aceleración Absoluta Acumulada $CAA = \int_0^T |a(t)| dt$

4. Densidad Especifica de Energía $SED = \int_0^T v(t)^2 dt$

5. Aceleración RMS $a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a(t)^2 dt}$

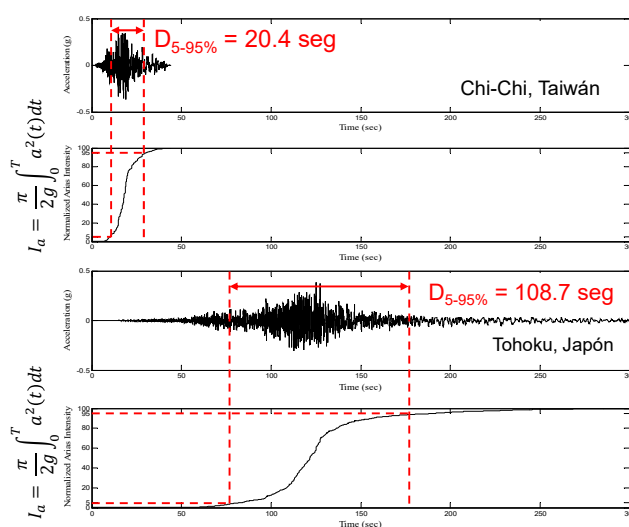
6. Intensidad de Housner $SI(\zeta) = \int_0^{10} S_v(T, \zeta) dT$

7. Numero de Ciclos

58

Métricas de la Duración

- La mejor correlación entre la duración y el potencial de colapso esta dada por la **Duración Significativa** evaluada en el intervalo 5%-95% (**D_{5-95%}**)

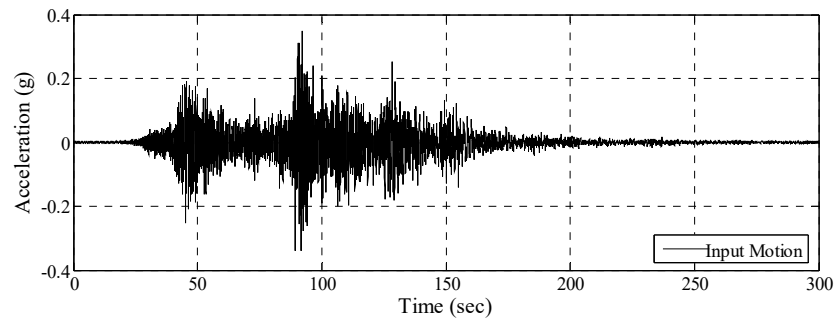


59

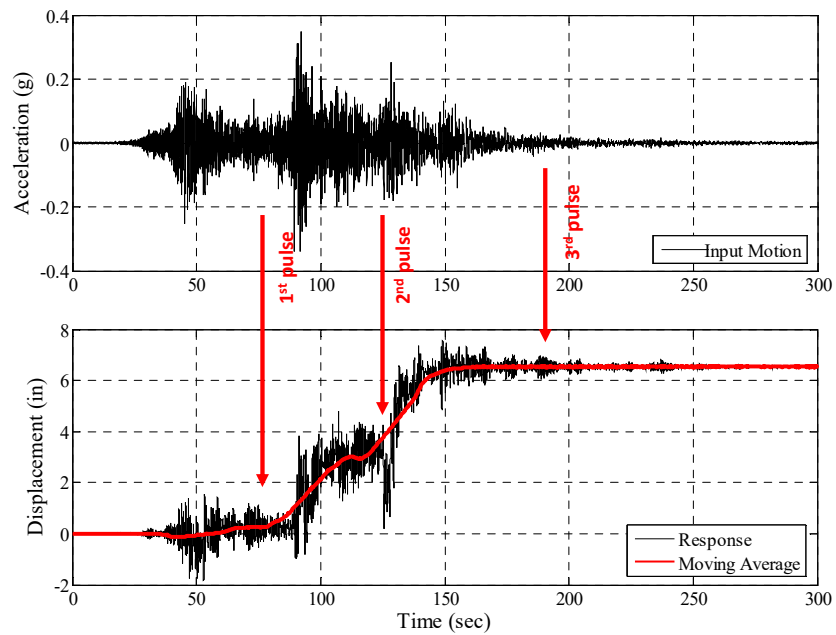
Efectos de la Duración

- Mecanismos físicos:
 - Degradación Cíclica
 - Escalonamiento:

Movimiento del suelo



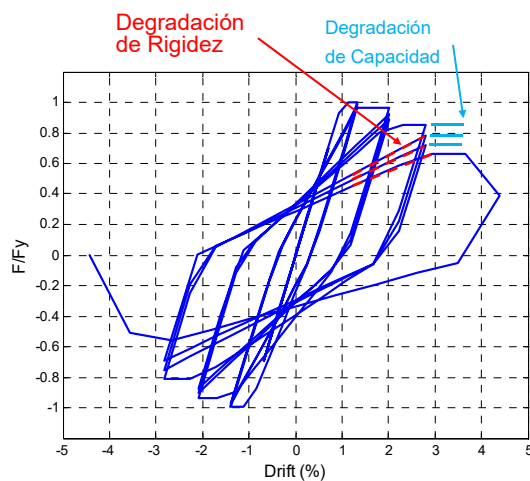
60



Efectos de la Duración

61

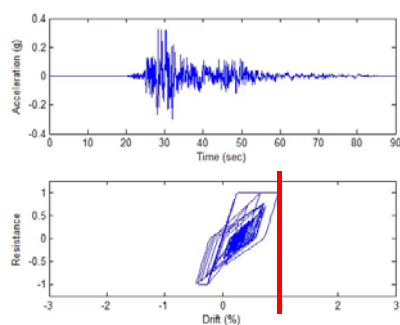
- Mecanismos físicos:
- Degradación cíclica:
 - Capacidad
 - Rigidez
 - Rigidez durante la descarga
 - Capacidad después de la fluencia
 - Aceleración en la rama de la recarga
 - Etc.



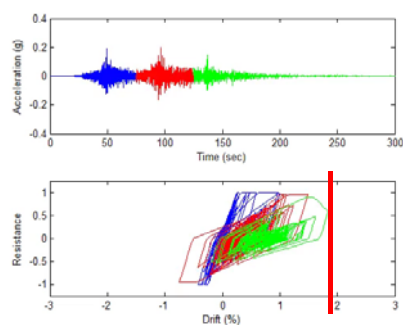
Efectos de la Duración

62

Cortical
Chi-Chi
Taiwán, 1999

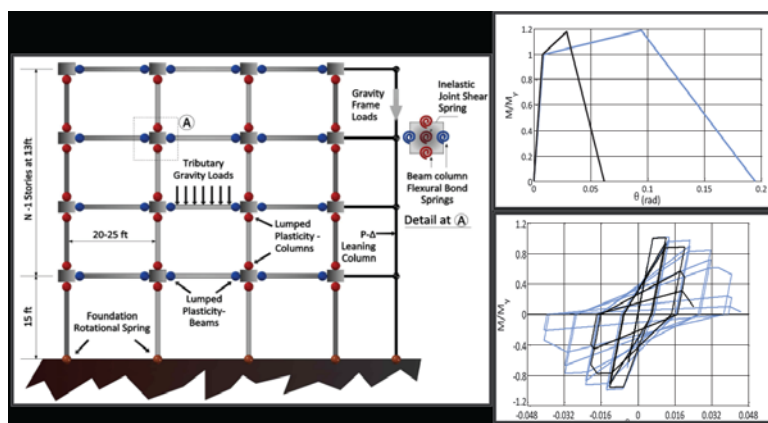


Subducción
Tohoku
Japón, 2011



No. 62

Efectos de la Duración en Edificios

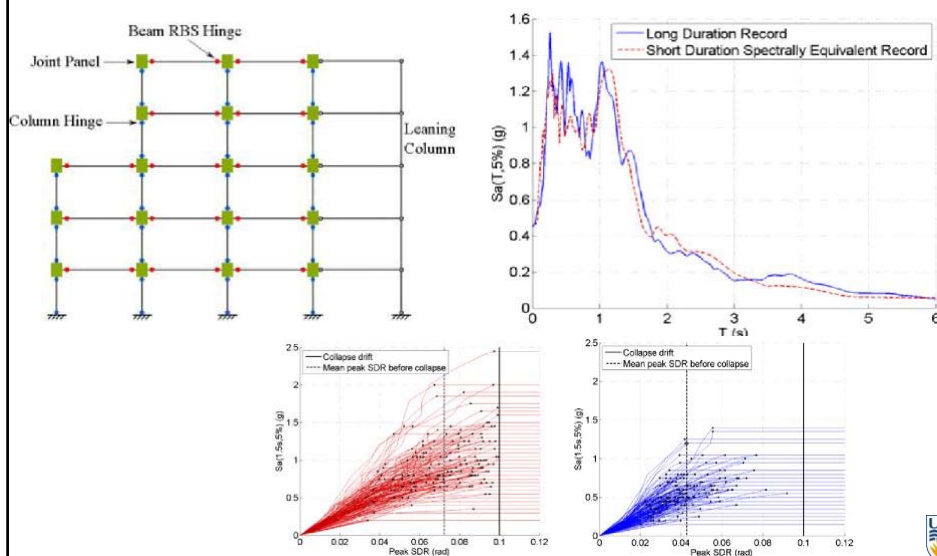


After A. Liel, & M. Raghunandan

63

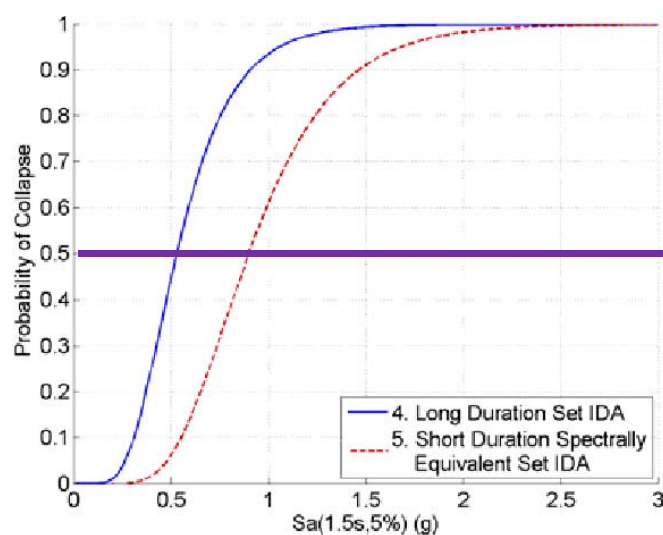
Efectos de la Duración en Edificios

(Chandramohan, Lin, Baker, and Deierlein, 2013)



64

Efectos de la Duración en Curvas de Fragilidad



(Chandramohan, Lin, Baker, and Deierlein, 2013)



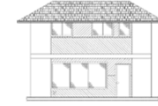
65

Efectos de la Duración

Riesgo a los edificios de Madera

66

Proyecto: Earthquake-99



House 1: Test 10
Engineered OSB
+
GWB
+
Stucco



House 3: Test 16
Non-engineered
OSB
+
GWB



House 2: Test 09
Engineered OSB
+
GWB



House 4: Test 13
Horizontal Boards
+
GWB

67

Proyecto: NEESWood Project

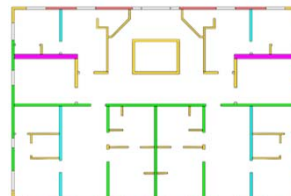
❑ Descripción:

- 1) 6 pisos, diseñado para el Sur de California
- 2) Planta: 40 pies por 60 pies; altura: 55.7 pies
- 3) Parales de 2x6, paredes de OSB/Plywood, interior de Tabla-yeso (Gypsum wall board, GWB)

❑ Mesa vibratoria en la "E-Defense" en Japon:



Photo credit: John van de Lindt



- OSB/Plywood 1/2"
- OSB/Plywood 3/4"
- OSB/Plywood 5/8"
- OSB/Plywood 3/4"
- OSB/Plywood 1/2"

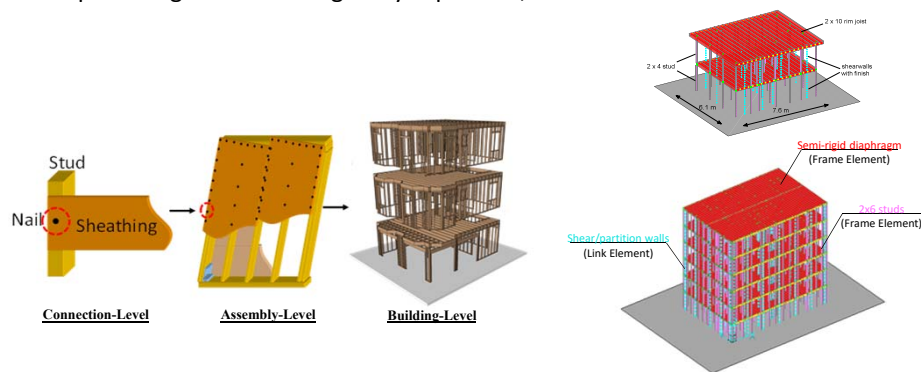
(source: Pei et al. 2010)

68

Modelos Numéricos

☐ Programa "Timber3D" (Dr. Weichiang Pang en Clemson University)

- Herramienta de Matlab para modelar estructuras de madera
- Formulación "Corotational" para deformaciones grandes;
- Captura degradación en rigidez y capacidad, otros efectos

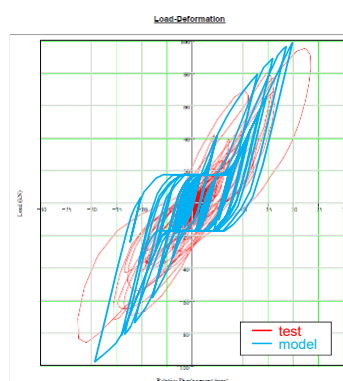
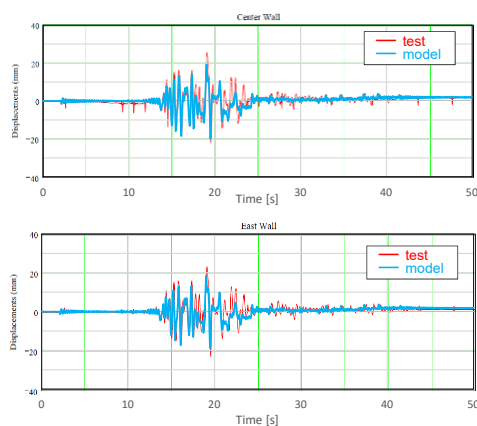


69



Calibración

- Substructure subjected to Sherman Oaks motion recorded from 1994 Northridge EQ, PGA=0.3g.

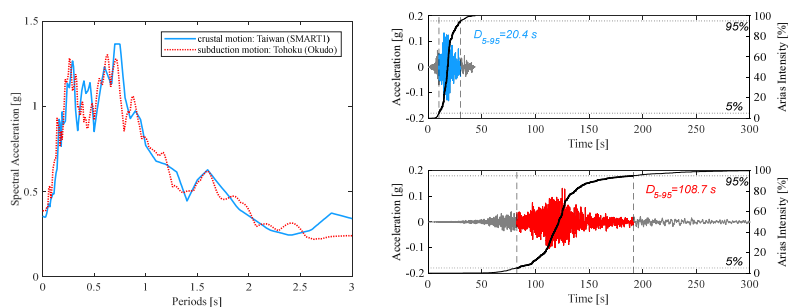


70

“Espectros Equivalentes”

□ Significant duration D_{5-95} : 5%-95% of total Arias Intensity (I_A)

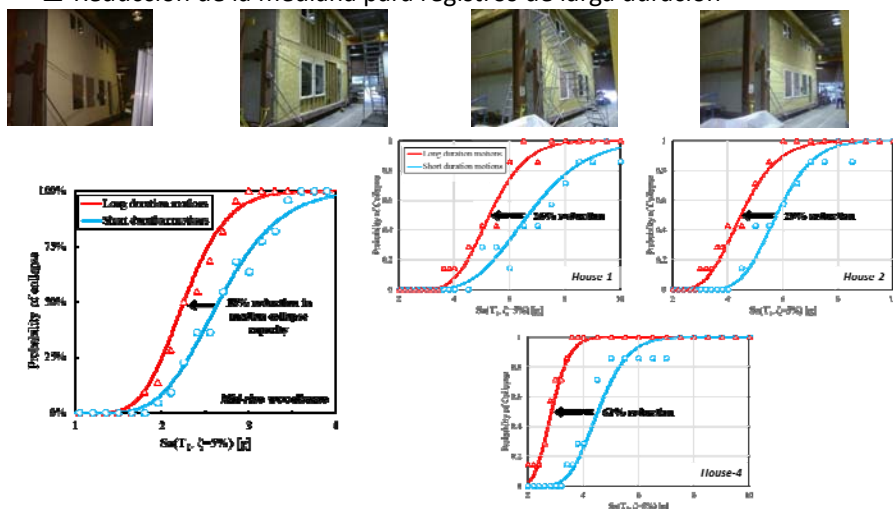
$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_{\max}} a^2(t) dt$$



71

Capacidad contra Colapso

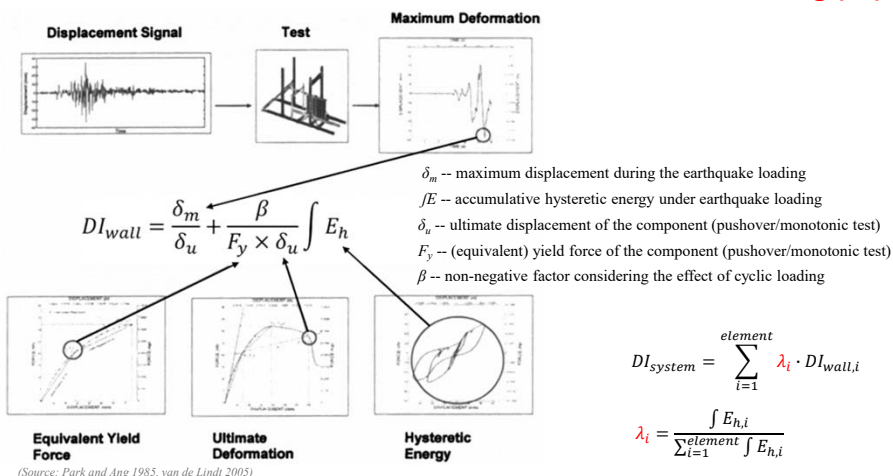
□ Reducción de la mediana para registros de larga duración



72

Evaluación del Daño

Indice de daños de Park & Ang (DI)



73

Evaluación del Daño

DI	Nivel de Daño	Descripción
>1.0	Colapso	Colapso total o parcial
0.7-1.0	Severo	Daño total o parcial de cualquier elemento estructural; severas grietas en las paredes; separación del revestimiento de los conectores; el edificio tendrá que ser demolido o requiere reparaciones extensas para ser útil otra vez
0.4-0.7	Moderado	Amplias grietas en las paredes; pruebas de deformación permanente o junto a la falla en cualquier elemento estructural, daño severo de las paredes no estructurales; el daño es reparable
0.25-0.4	Menor	Grietas finas en paredes no estructurales; requiere reparaciones pequeñas
<0.25	Nada	No hay daños visibles

74

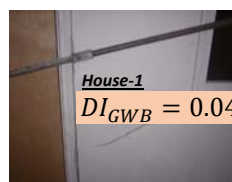
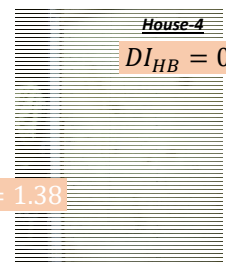
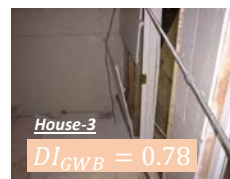
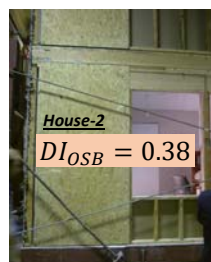
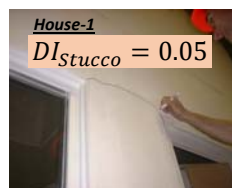
Indices de Daño para el Proyecto “Earthquake-99”



No.	Observed damage (White and Ventura 2006)	Computed DI_{system}
House-1	Structure performed very well for this earthquake motion. Stucco acted as an effective ‘zero damage’ non-structural material.	0.04
House-2	First story shear wall exterior sheathing exhibited minor nail pullout at the corners. GWB reduced maximum drift in the first story by more than 50%.	0.34
House-3	Total damage on the first story, house became unstable and hit the steel safety frame. Exterior OSB sheathing had totally failed. Gypsum wallboard sustained almost total damage. Majority of GWB sheets fell to floor.	1.19
House-4	Structural performance was poor and possibly life-threatening. Exterior board sheathing was still in place but had no lateral stiffness (nails loose). GWB was heavily totally damaged on all walls (more than 50% had fallen off walls)	1.12

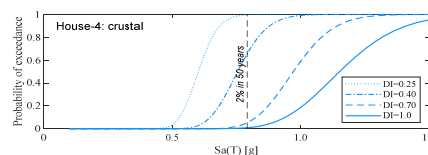
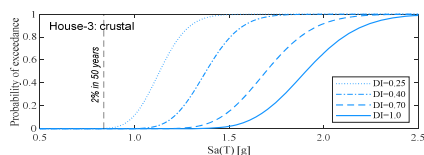
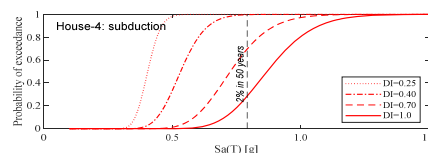
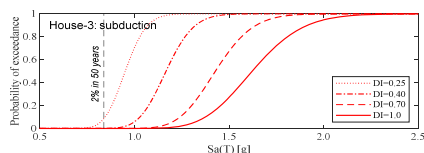
75

Indices de Daño para el Proyecto “Earthquake-99”



76

Curvas de Fragilidad para índices de Daño



House-3

House-4

77



Observaciones

1. Los **modelos numéricos** captan muy bien la respuesta medida durante las pruebas en la mesa vibratoria.
2. Los resultados indican que **movimientos de larga duración** muestran una tasa mayor de colapso de estructuras de madera que el índice de colapso debido a **movimientos de corta duración**.
3. Estructuras con **estuco** tienen significativamente mayor resistencia sísmica que edificios con tablas horizontales o sin estuco
4. En el nivel de intensidad de diseño, el uso del índice de **Park y Ang** puede caracterizar mejor los **efectos de la duración** en el desempeño sísmico;

78

79

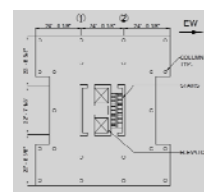
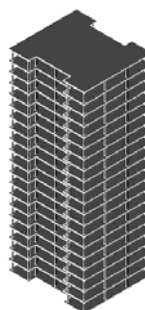
Efectos de la Duración

Riesgo a los edificios altos de Concreto Reforzado

80

Edificio de 20 pisos con muros de corte de concreto reforzado

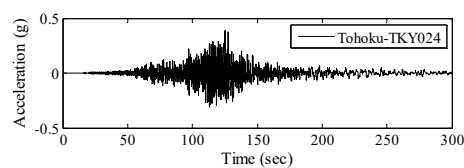
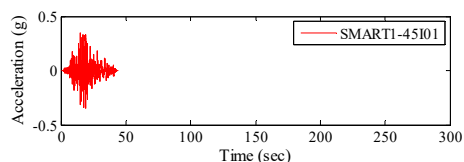
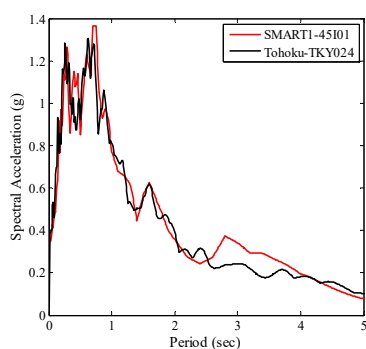
- Estudios recientes han considerado edificios bajos y medianos de marcos rígidos
- UBC ha hecho estudios similares para edificios altos con muros de corte
- Edificio prototipo:
 - "Típico" de los edificios residenciales de Vancouver
 - 20 pisos
 - Geometría regular
 - Núcleo simple
 - Columnas para cargas de Gravedad
 - Muros de corte en la dirección NS
 - Muros de corte acoplados en la dirección EW



81

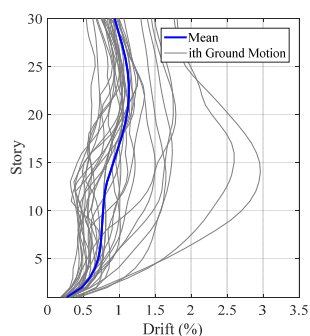
Registros para el Edificio de 20 pisos

- Registros de larga y corta duración con “Espectros Equivalentes”
- 30 registros incluidos en cada grupo
- Ajustados de acuerdo con el NBCC2010

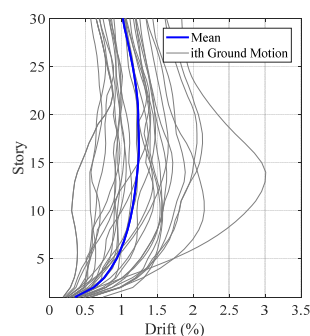


Análisis de acuerdo con el Código

30 pisos - Derivas



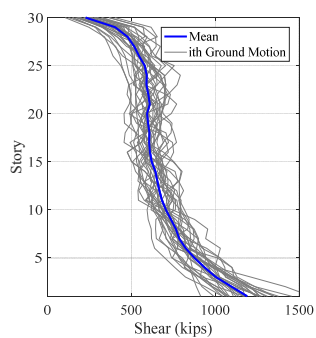
• Corto



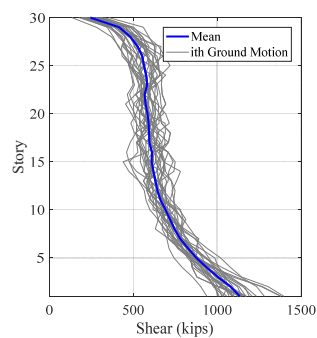
Largo

Análisis de acuerdo con el Código

30 pisos - Cortantes



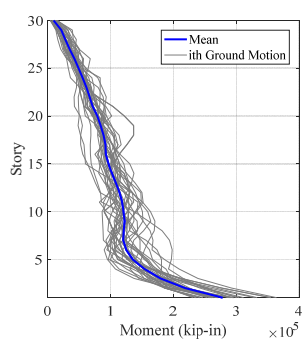
• Corto



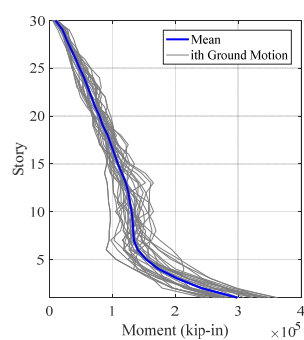
Largo

Análisis de acuerdo con el Código

30 pisos – Momentos de volteo



• Short

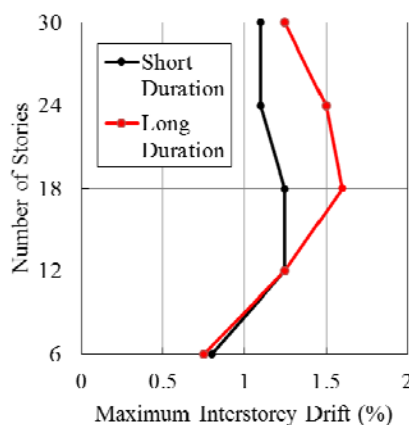


Long

Análisis de acuerdo con el Código

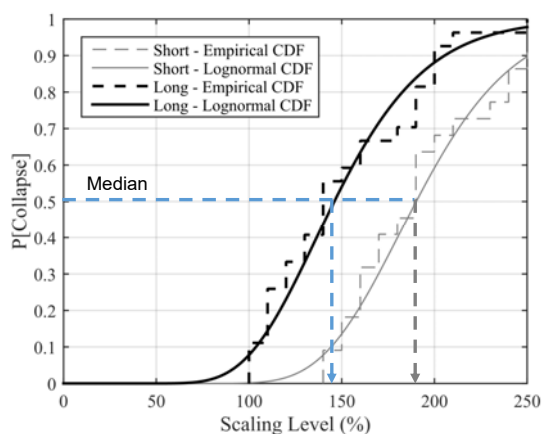
Derivas

Los niveles de fuerzas son similares, sin embargo, la suite de larga duración tiende a producir demandas de derivas un poco más grandes, aunque son similares para edificios de poca altura



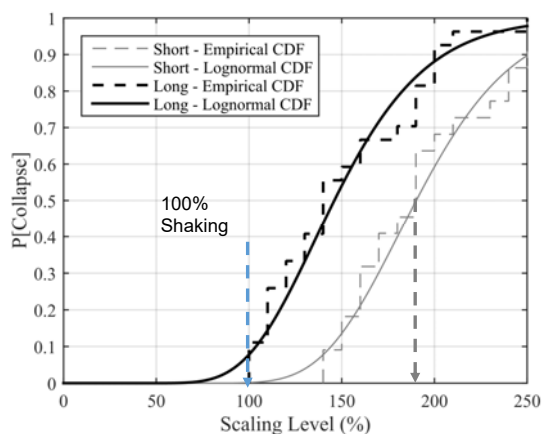
Análisis de acuerdo con el Código

30 pisos – Curvas de Fragilidad para potencial de colapso



Análisis de acuerdo con el Código

30 pisos – Curvas de Fragilidad para potencial de colapso



Análisis de acuerdo con el Código

Resultados:

Numero de Pisos	Mediana del nivel de colapso potencial (% of 2% en 50 años)		
	Larga Duración	Corta Duración	Corta/ Larga
6	146	190	1.30
12	136	166	1.22
18	146	189	1.29
24	174	201	1.16
30	198	214	1.08
Promedio	160	192	1.21

89

Observaciones

- 1) El potencial de daño de movimientos del suelo causados por terremotos de subducción **no se puede caracterizar** de la misma forma en que se hace para los movimientos de suelo debido a terremotos corticales.
- 2) El Espectro de Respuesta de sistemas lineales-elásticos no es lo más adecuado para representar las demandas estructurales esperadas causadas por terremotos de subducción. El **Espectro No lineal** proporciona una mejor estimación de las demandas esperadas (El espectro de desplazamiento, SD, es más adecuado).
- 3) Los efectos de duración **dependen** de la configuración del sistema estructural, su capacidad y su ductilidad.
- 4) Estudios de edificios altos con muros de corte diseñados de acuerdo con códigos modernos indican que la duración del sismo tiene **poca influencia** en las derivas y desplazamientos.
- 5) La métrica de efectos acumulados (i.e. energía) indica que movimientos de suelo con larga duración **incrementan las demandas** de manera consistente.

90



Gracias

90