

LAS VENTAJAS DEL ACERO EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL ES UN AMBITO SÍSMICO

**CONSTRUIR EN ACERO
UNA NECESIDAD DEL FUTURO**

SIMPOSIO 2018

**G.R. SARAGONI
UNIVERSIDAD DE CHILE
SOCIO SYS INGENIEROS CONSULTORES LTDA.
PRESIDENTE ACHISINA**



BUEN COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS INDUSTRIALES DE ACERO

PLANTA TERMoeLECTRICA NORGENER, TOCOPILLA 2007 COMPLETAMENTE OPERACIONAL DESPUES DEL TERREMOTO



CONEXIONES DE ACERO – ZONA EPICENTRAL ESTRUCTURAS 100 [m] ALTURA





Chile Earthquake of 2010

Assessment of Industrial
Facilities around Concepción



J.G. (Greg) Soules, P.E., S.E.
Robert E. Bachman, P.E., S.E.
John F. Silva, P.E., S.E.



**RAZONES BUEN COMPORTAMIENTO
NORMA CHILENA NCH2369.of 2003
“DISEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS E
INSTALACIONES INDUSTRIALES”
CRITERIO DE CONTINUIDAD DE OPERACIÓN**

**DIFERENTE DE SEISMIC PROVISION AISC
2016**

NO HABLA DE CONTINUIDAD DE OPERACIÓN

NORMAS CHILENAS

NORMA	OBJETIVO	CUMPLIMIENTO TERREMOTO 27/02/2010	CALIBRADA
NCh 433.Of96 Diseño Sísmico de Edificios	Protección de Vidas	OK (con corrección)	Terremoto Zona Central 1985
NCh 2369.Of2003 Edificios e Instalaciones Industrial	Continuidad de Operación	OK	Terremoto Centro-Sur 1960
NCh 2745. Of 2003 Edificios con Aislación sísmica	Protección de Vida	OK (con corrección)	sin calibrar
Manual de Carreteras	Continuidad de Operación	OK (con corrección)	CALIBRADA

CALIBRACIÓN DE ESPECTRO POR BLUME (1963)
TERREMOTOS DE CONCEPCIÓN Y VALDIVIA 1960
 $M_w = 9.5$

CHIMENEAS Y TORRES CAP HUACHIPATO

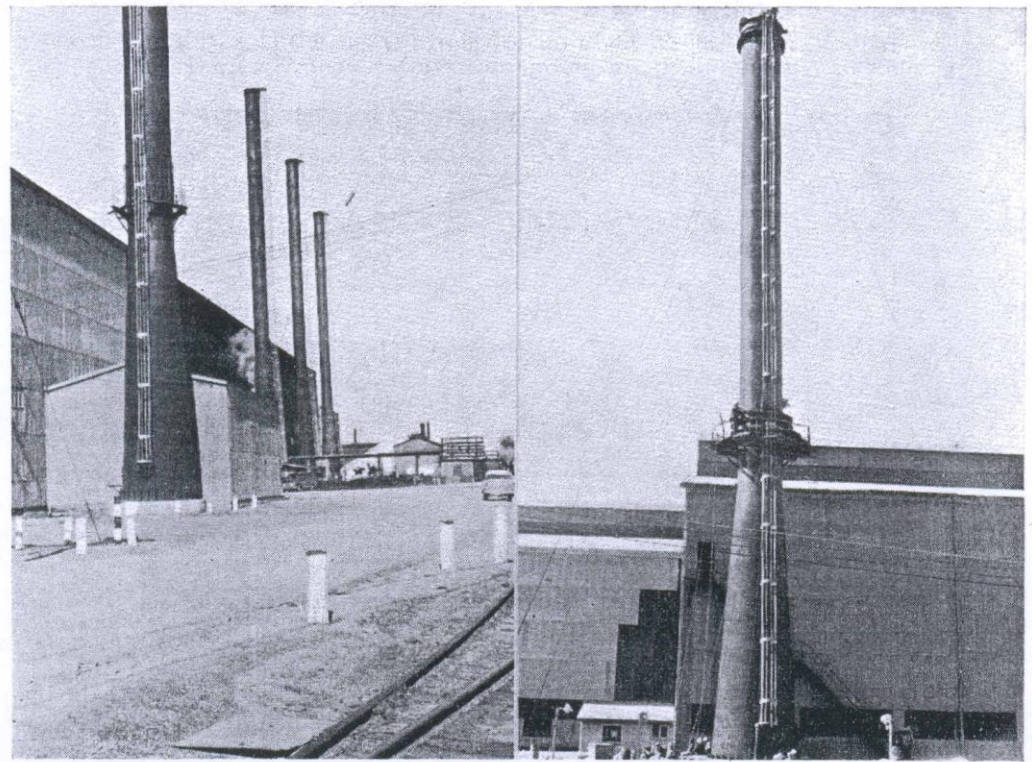


FIG. 5. Stacks D, C-3, C-2 and C-1 from Left to Right. (Photo by K. V. Steinbrugge).
FIG. 6. Stack F with Temporary Guys During Repairs. (Photo by K. V. Steinbrugge).

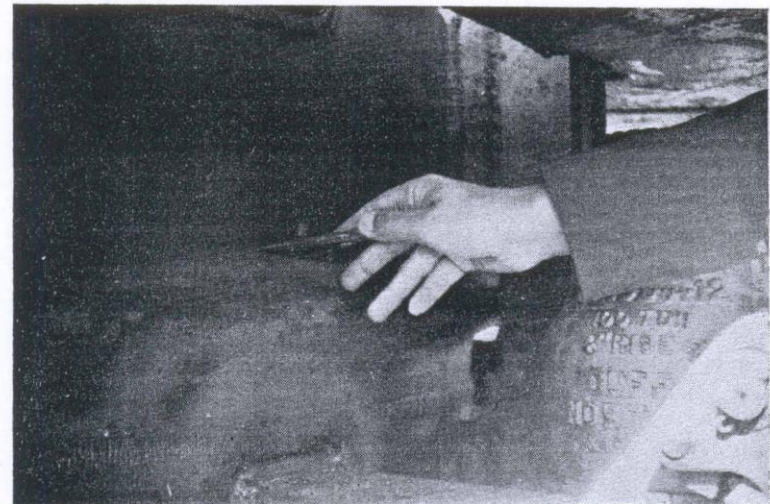


FIG. 7. Buckle and Temporary Splints, Stack F. (Photo by K. V. Steinbrugge).

CHIMENEAS Y TORRES CAP HUACHIPATO

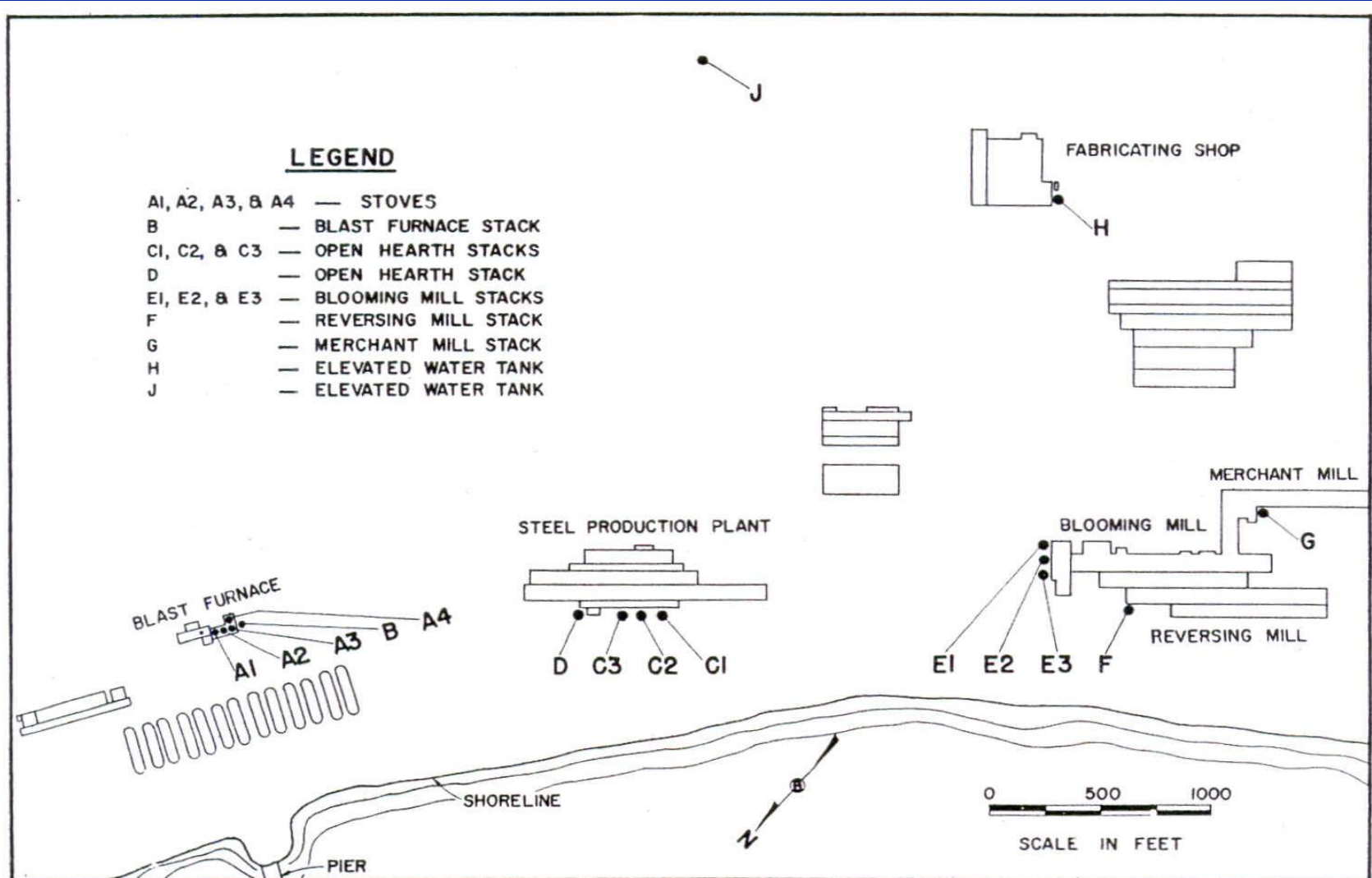


FIG. 2. Plan of Huachipato Steel Plant.

ESPECTRO ESTIMADO POR BLUME

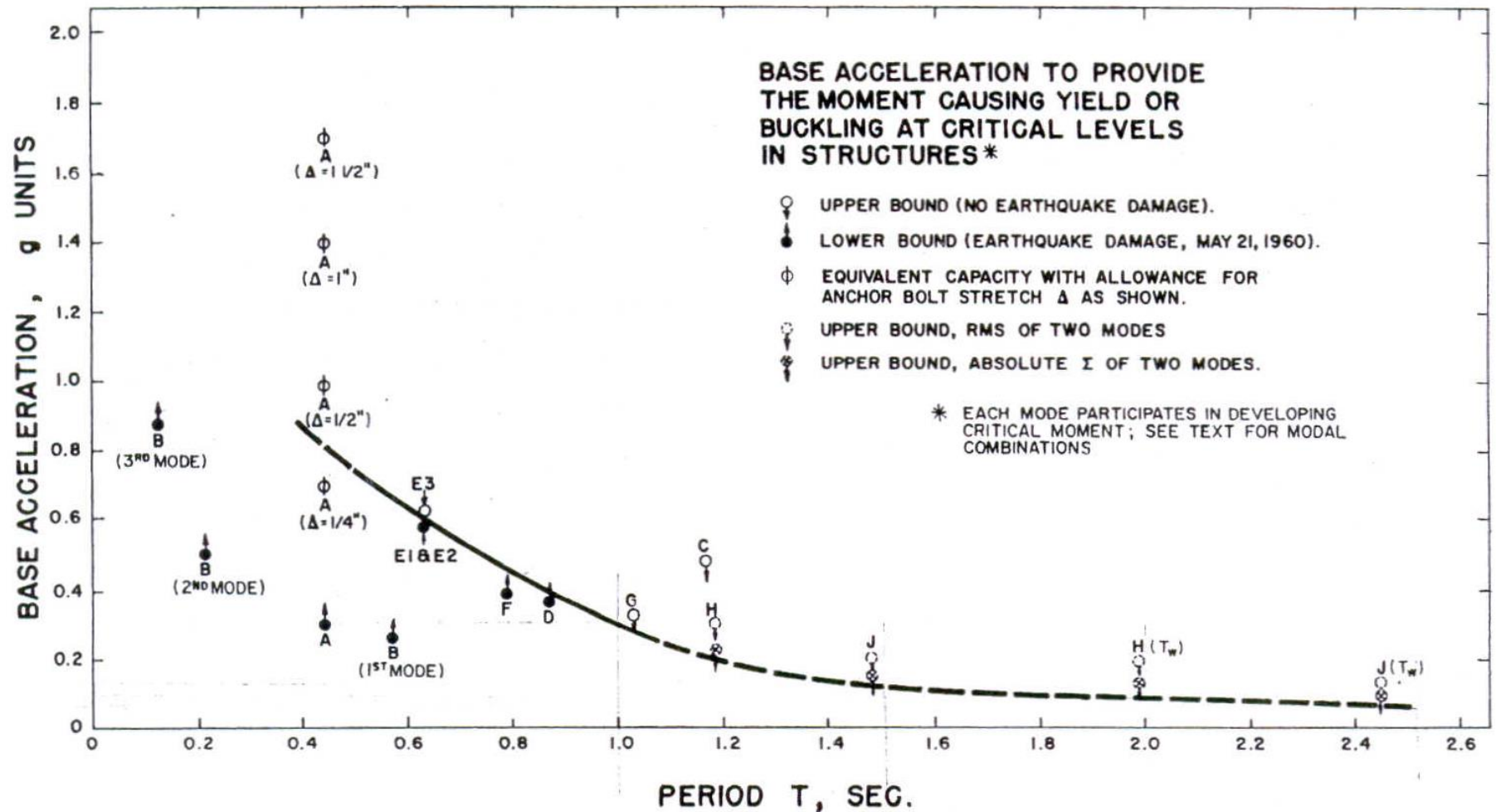


FIG. 25. Spectrum of Base Acceleration Causing Modal Moments in Huachipato Structures.

COMPARACIÓN DEL ESPECTRO DE BLUME CON LA NORMA

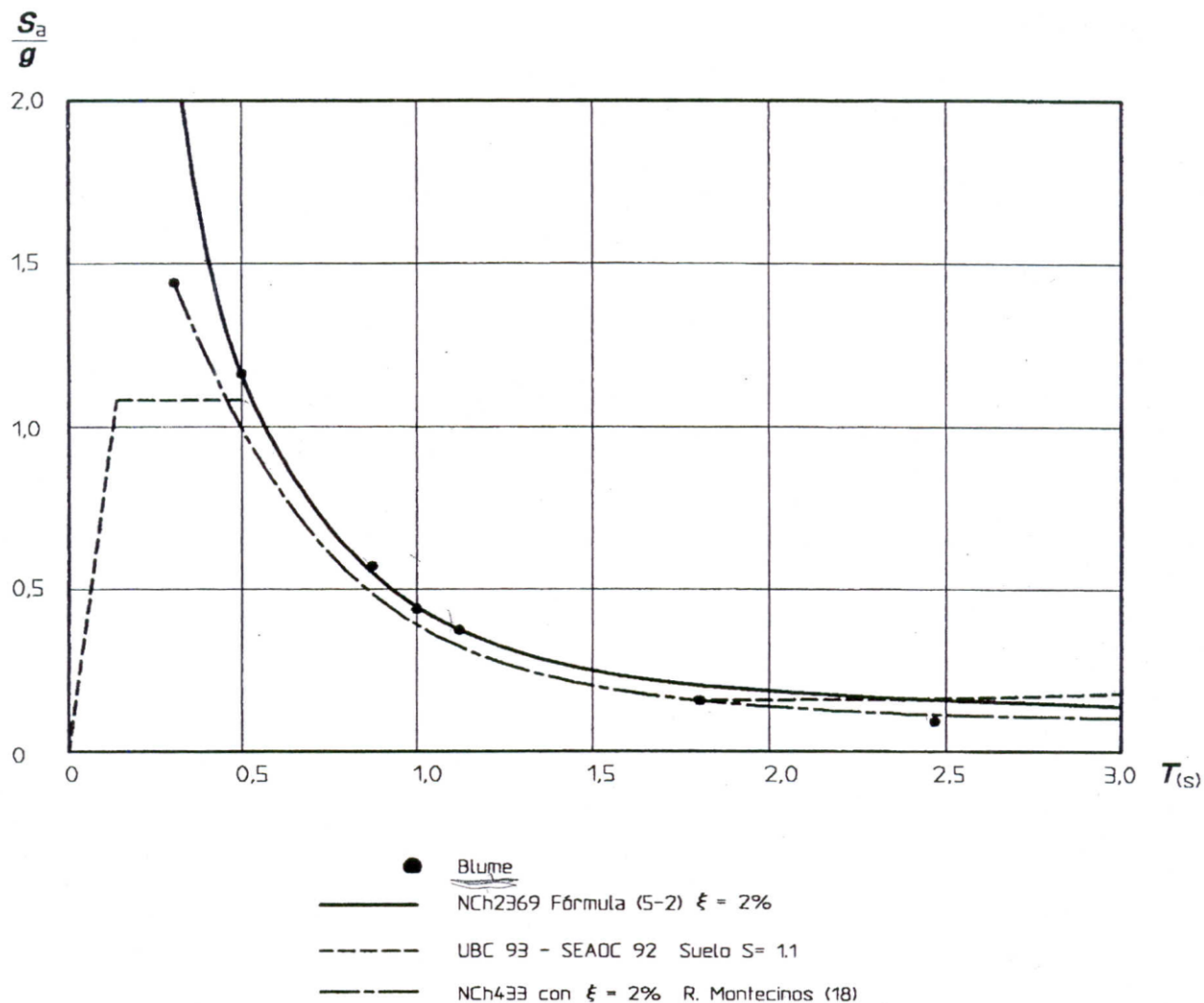


Figura C.1 - Espectros de respuesta para Huachipato
(Zona 3 $A_0=0,4$ g Suelo II $I=1,0$)

CONCLUSIONES

- **EL ACERO EN ESTRUCTURAS INDUSTRIALES HA TENIDO UN EXCELENTE COMPORTAMIENTO EN LOS ÚLTIMOS TERREMOTOS**
- **LA NUEVA VERSION DE LA NORMA NO CONSIDERA CAMBIOS IMPORTANTES DESPUES DEL TERREMOTO DEL 27F 2010**
- **SE CONSIDERA UNA NORMA CALIBRADA**

- **EL ÉXITO SE BASA EN EL USO DE BAJOS VALORES DE R = 4,3,2,1**

- **SIN EMBARGO NO HUBO BUEN COMPORTAMIENTO DE ESTRUCTURA DE ACERO DE EDIFICIOS HABITACIONALES EN CONTINUIDAD DE OPERACIÓN PARA EL TERREMOTO DEL MAULE DEL 2010**

EL AEROPUERTO INTERNACIONAL DE SANTIAGO

AEROPUERTO MERINO BENITEZ 2010 6 MESES INUTILIZADO



LA RAZÓN DE LA FALLA

**EL DISEÑO POR PROTECCIÓN DE VIDA
NO POR CONTINUIDAD DE OPERACIÓN**

CÓDIGOS DE DISEÑO SÍSMICO RESILIENTES PARA VIVIENDA: UN DESAFÍO POSIBLE EN CHILE



G.R. SARAGONI

UNIVERSIDAD DE CHILE

**PDTE. ASOCIACIÓN CHILENA DE SISMOLOGIA E INGENIERIA
SÍSMICA**

CONCEPTO DE COMPLETAMENTE OPERACIONAL DESPUES DEL TERREMOTO

EJEMPLO DE INFRAESTRUCTURA METRO DE SANTIAGO

SOMETIDO A DOS GRANDES
TERREMOTOS

1985 ZONA CENTRAL $M_w = 7.8$

2010 EL MAULE $M_w = 8.8$

CON CONTINUIDAD DE OPERACIÓN
DESPUES DE ESTOS TERREMOTOS

METRO DE SANTIAGO



VIA ELEVADA DEL METRO



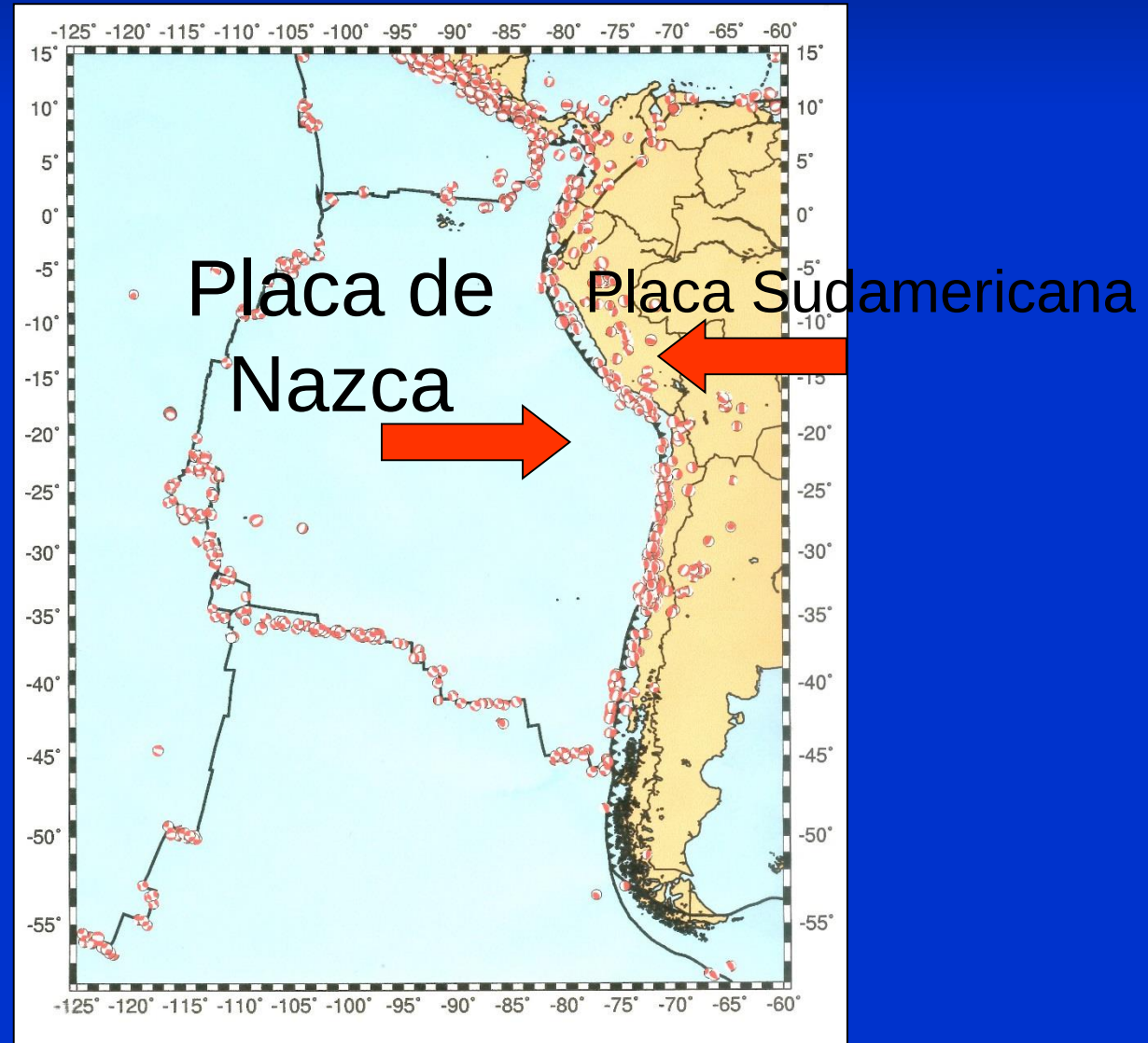
NUNCA SE HA DICHO A LOS
SANTIAGUINOS QUE NO HAY SERVICIO DE
METRO DEBIDO A TERREMOTOS

UN EJEMPLO DE LOGRO DE RESILIENCIA
DE INFRAESTRUCTURA EN GRANDES
TERREMOTOS

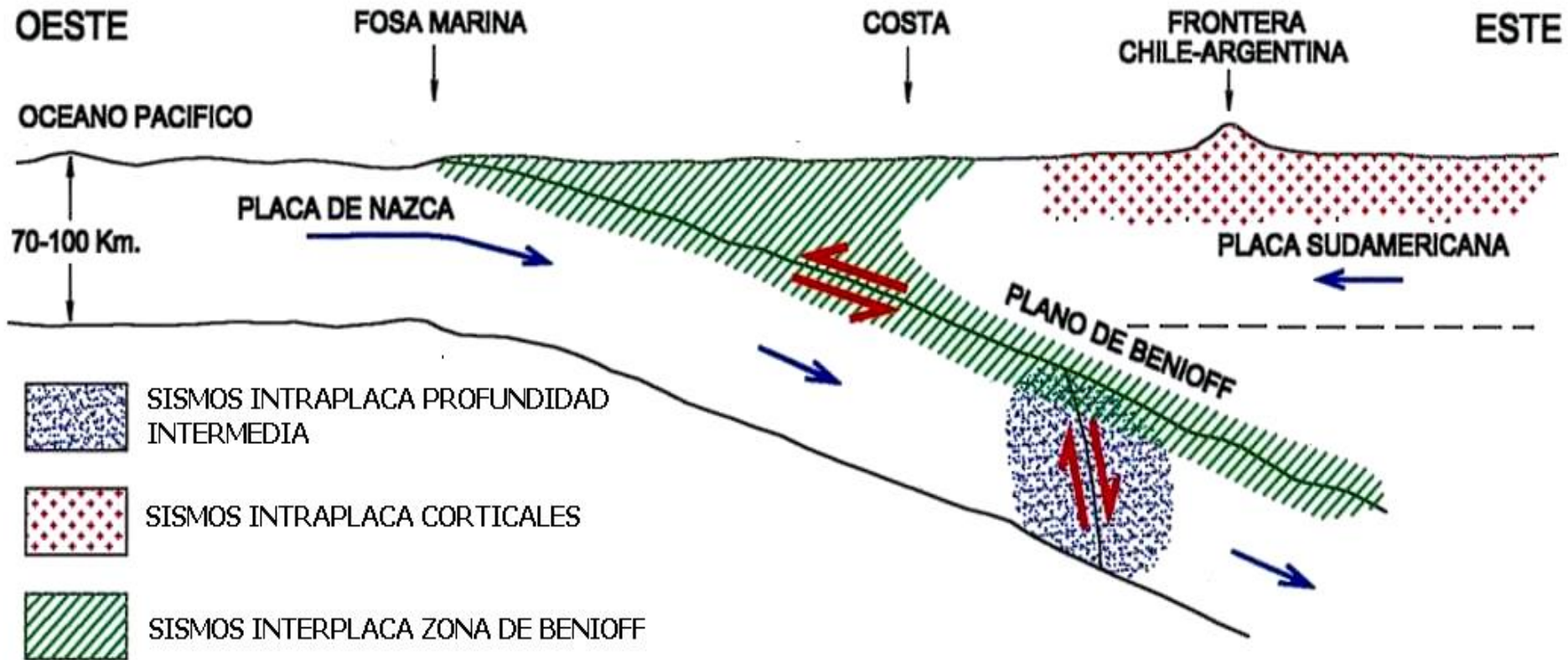
LA ALTA SISMICIDAD DE CHILE

ES LA MAYOR RAZÓN DEL DESAFÍO DE LA
NECESIDAD DE CODIGOS SÍSMICOS
RESILIENTES

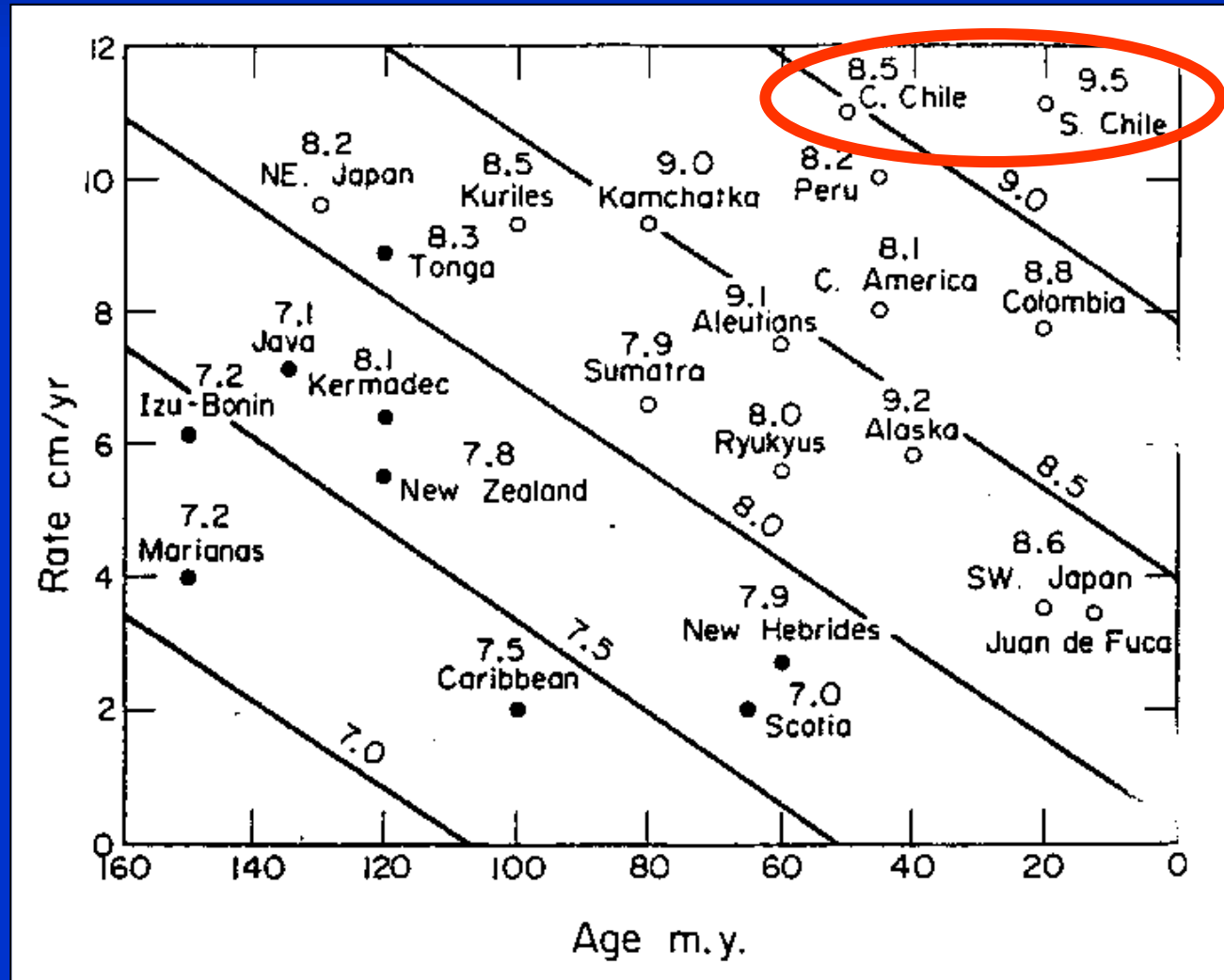
SUBDUCCIÓN DE LA PLACA DE NAZCA BAJO LA PLACA SUDAMERICANA

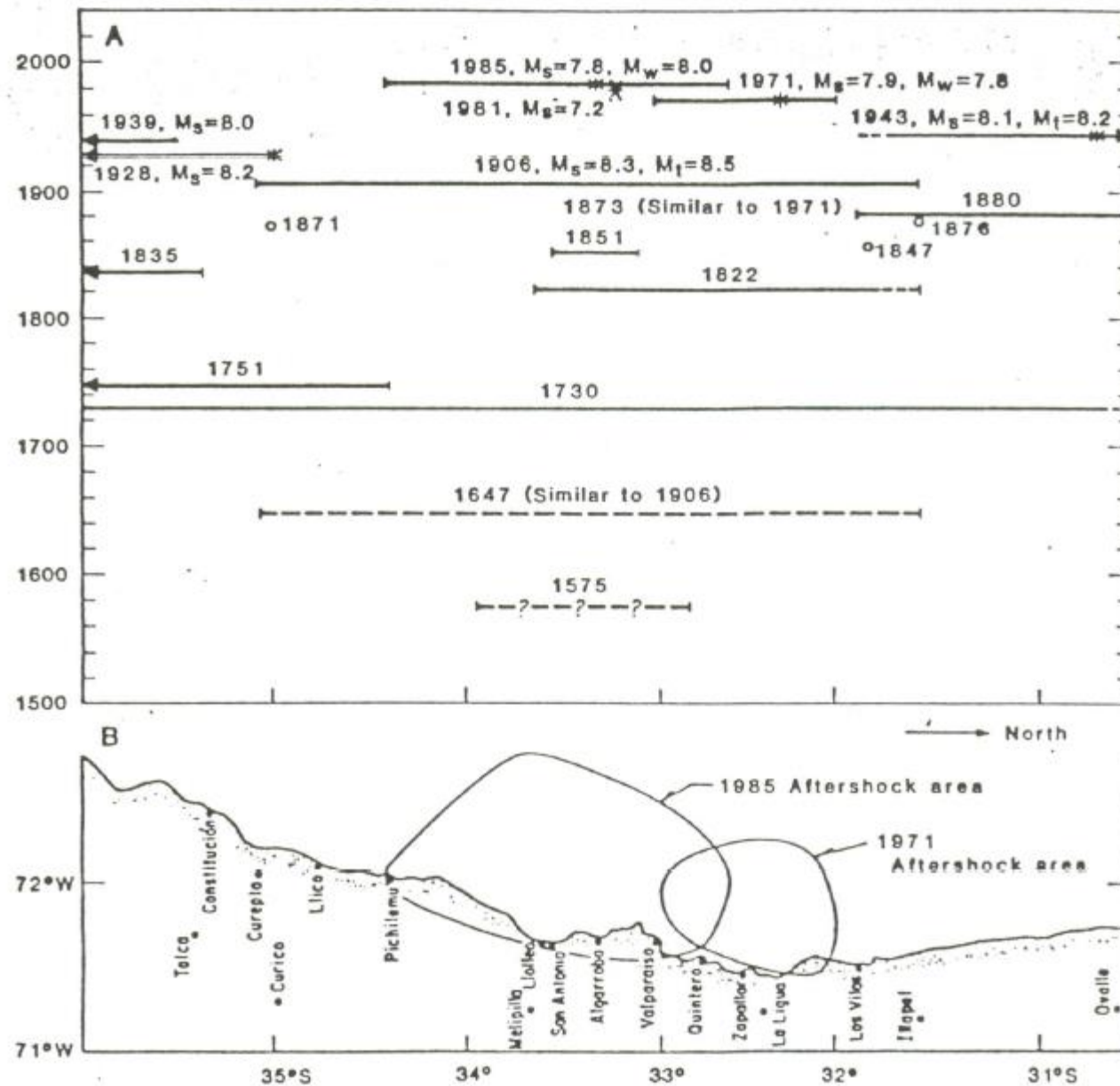


INTERACCIÓN DE PLACAS EN SUBDUCCIÓN



MEGATERREMOTOS DE LA MAYOR MAGNITUD DEL MUNDO





The 1985 Central Chile Earthquake: A repeat of Previous Great Earthquakes in the Region?. Revista Science, Julio 1986

SISMICIDAD DE LOS GRANDES TERREMOTOS DE LA ZONA CENTRAL DE CHILE (SANTIAGO – VALPARAISO)

UN TERREMOTO CADA 83 ± 9 AÑOS

DEBIDO A ESTA ALTA SISMICIDAD, UNA DE
LAS MAS ALTAS DEL MUNDO

INGENIEROS CHILENOS CONSIDERAN
ESTIMACIÓN DETERMINISTICA DEL
PELIGRO SÍSMICO

FILOSOFIA DEL DISEÑO SÍSMICO

LA NORMA NCH 433 DISEÑO SÍSMICO DE EDIFICIOS

LOGRAR ESTRUCTURAS QUE:

- 1.- RESISTAN SIN DAÑOS MOVIMIENTOS SÍSMICOS DE INTENSIDAD MODERADAS.
- 2.- LIMITEN LOS DAÑOS EN ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES DURANTE SISMOS DE MEDIANA INTENSIDAD.
- 3.- AUNQUE PRESENTEN DAÑOS, EVITEN EL COLAPSO DURANTE SISMOS DE INTENSIDAD EXCEPCIONALMENTE SEVERA.

OBJETIVO DE PROTECCIÓN DE VIDA

FILOSOFIA DEL DISEÑO SÍSMICO

SEAOC Vision 2000 conceptual framework for Performance Based Design

Seismic Levels for Design and Verification

Event	Recurrence Interval	Probability of Exceedance
Frequent	43 years	50% in 30 years
Occasional	72 years	50% in 50 years
Rare	475 years	10% in 50 years
Very Rare	975 years	10% in 100 years

Performance Objectives

Earthquake Design Level	Earthquake Performance Level				
		Fully Operational	Operational	Life Safe	Near Collapse
	Frequent (43 years)	Basic Objective	Unacceptable	Unacceptable	Unacceptable
	Occasional (72 years)	Essential/Hazardous Objective	Basic Objective	Unacceptable	Unacceptable
	Rare (475 years)	Safety Critical Objective	Essential/Hazardous Objective	Basic Objective	Unacceptable
	Very Rare (975 years)	Not Feasible	Safety Critical Objective	Essential/Hazardous Objective	Basic Objective

FILOSOFIA DEL DISEÑO SÍSMICO

- El corto intervalo de ocurrencia de terremoto $M_w = 8.5$ en la zona central de Chile ha condicionado la práctica del diseño sísmico chileno ha obtener comportamientos casi operacionales.
- La alta sismicidad de Chile ha conducido a una estrategia determinística para estimar el peligro sísmico para el diseño de edificios, a diferencia del criterio probabilístico considerado por códigos de otras regiones sísmicas del mundo.

Performance Objectives

Earthquake Design Level	Earthquake Performance Level				
		Fully Operational	Operational	Life Safe	Near Collapse
	Frequent (43 years)	Basic Objective	Unacceptable	Unacceptable	Unacceptable
	Occasional (72 years)	Essential/Hazardous Objective	Basic Objective	Unacceptable	Unacceptable
	Rare (475 years)	Safety Critical Objective	Essential/Hazardous Objective	Basic Objective	Unacceptable
	Very Rare (975 years)	Not Feasible	Safety Critical Objective	Essential/Hazardous Objective	Basic Objective

PARA EL DISEÑO DE EDIFICIOS
HABITACIONALES DE ACERO EL
BENCHMARK ES EL BUEN
COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE LOS
EDIFICIOS DE HORMIGÓN ARMADO

February 27th – 2010, Maule Earthquake: $M_w = 8.8$



**RESIDENTIAL BUILDINGS THREE STORIES OR MORE
AUTHORIZED BETWEEN 1985 AND 2009**

Number of Stories	Country Region						Country Total
	V	Metro	VI	VII	VIII	IX	
3 story	598	3.412	390	202	673	75	5.350
4 story	213	517	37	23	93	32	915
5 story	143	548	20	17	63	37	828
6 story	53	75	3	3	22	15	171
7 story	22	290	2	13	20	7	354
8 story	63	330	5	2	12	5	417
9 story +	413	1.310	10	27	102	77	1.939
TOTAL	1.505	6.482	467	287	985	248	9.974

Source: Estimate of The Chilean Chamber of Construction based on constructions permits statistics from INE

~ 10,000 new buildings
in the area affected by
the earthquake

¿Como se comportaron los edificios durante el terremoto 27 – F 2010?

Consideran solo edificios residenciales entre 1985 a 2009

Número de edificios mayores de 3 pisos 9.974

(construidos en este periodo)

Número de edificios mayores de 9 pisos 1.939

Edificios que colapsaron : 4

Edificios demolidos: 40 (estimado)

Fallas de mas de 3 pisos 0.5% edificios

Fallas de mas de 9 pisos 2.3% edificios

SE CONSIDERA QUE LA NORMA DE DISEÑO
SÍSMICO DE EDIFICIOS NCH433 OF.96 SE
COMPORTO ADECUADAMENTE

Limitaciones de corte basal:

- $IA_o P/6g \leq \text{Corte Basal} \leq 0.35 SIA_o P/g$
- Si el corte basal es inferior a este valor, las fuerzas y desplazamientos deben ser escaladas hasta alcanzar este valor.
- Corte basal mínimo para edificios:
 - V_{bs} en sísmica **Zone 2** es **5.0%P**
 - V_{bs} en sísmica **Zone 3** es **6.7%P**
- Fuerzas son a nivel de tensiones admisibles.

Código Chileno de Diseño Sísmico

NCh433.Of.96

Índice de deformación entrepiso δ_i / h_s :

La rigidez y la rotación torsional en el plano de piso por espectro de diseño de fuerzas, incluyendo la torsión accidental y el daño de elementos no estructurales son controlado por limitaciones de la deformación entrepiso:

- Deformación de entrepiso del centro de masas:
$$\delta_{C.M.}/h \leq 0.002$$
- Deformación de entrepiso en cualquier punto del piso:

$$(\delta_{C.M.}/h - 0.001) \leq \delta_{C.M.}/h \leq (\delta_{C.M.}/h + 0.001)$$

La práctica Chilena de Diseño Sísmico

Estos valores se comparan con los valores de desempeño de VISION 2000

Objetivos de Desempeño

Deriva

Completamente Operacional ➡ $\delta/H_0 < 0.002$

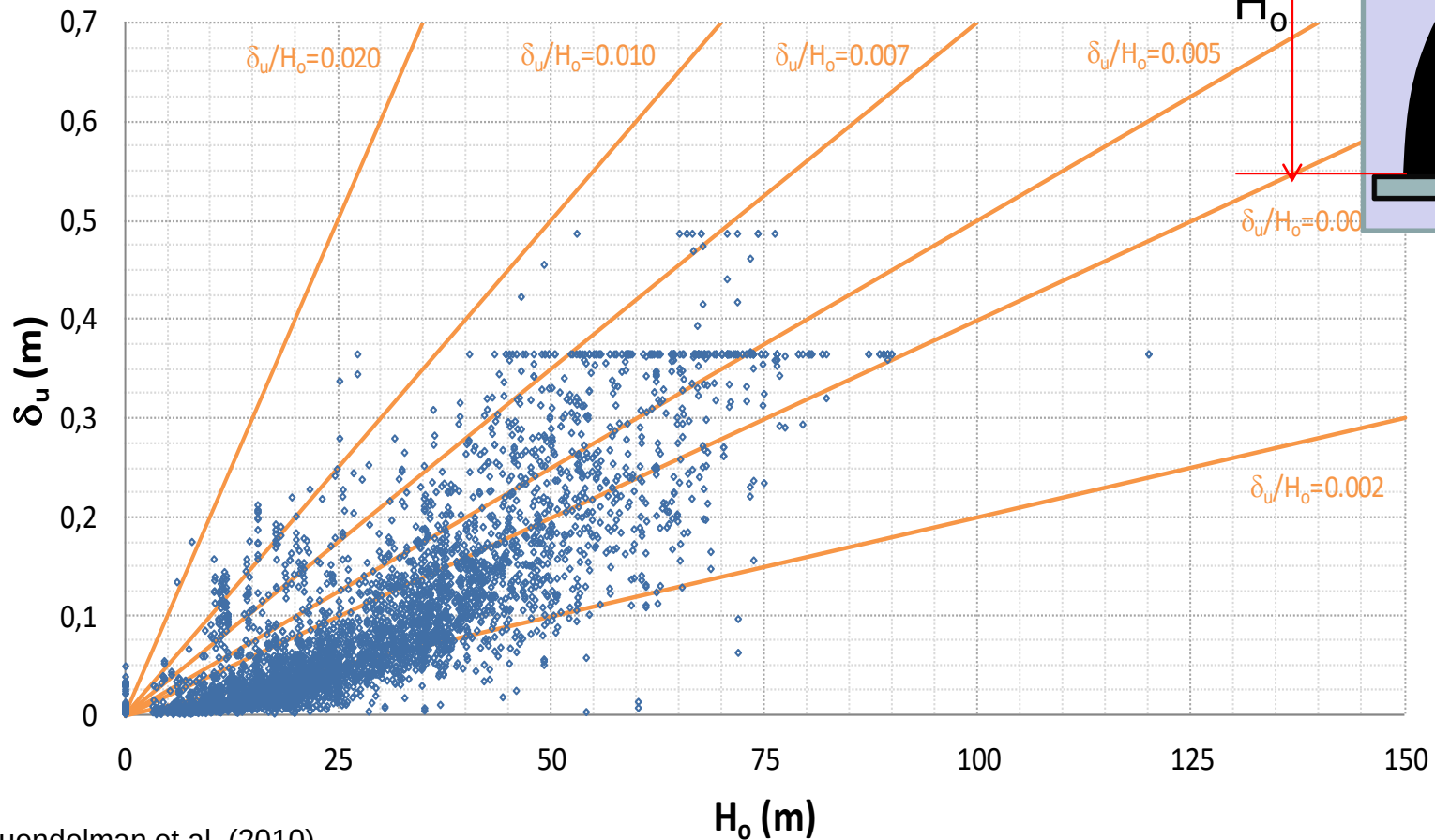
Operacional ➡ $\delta/H_0 < 0.005$

Seguridad de vida ➡ $\delta/H_0 < 0.015$

- Este criterio ha sido aplicado a numerosos edificios de hormigón armado de edificios de diferente altura y tipos (muros, muros - marcos).

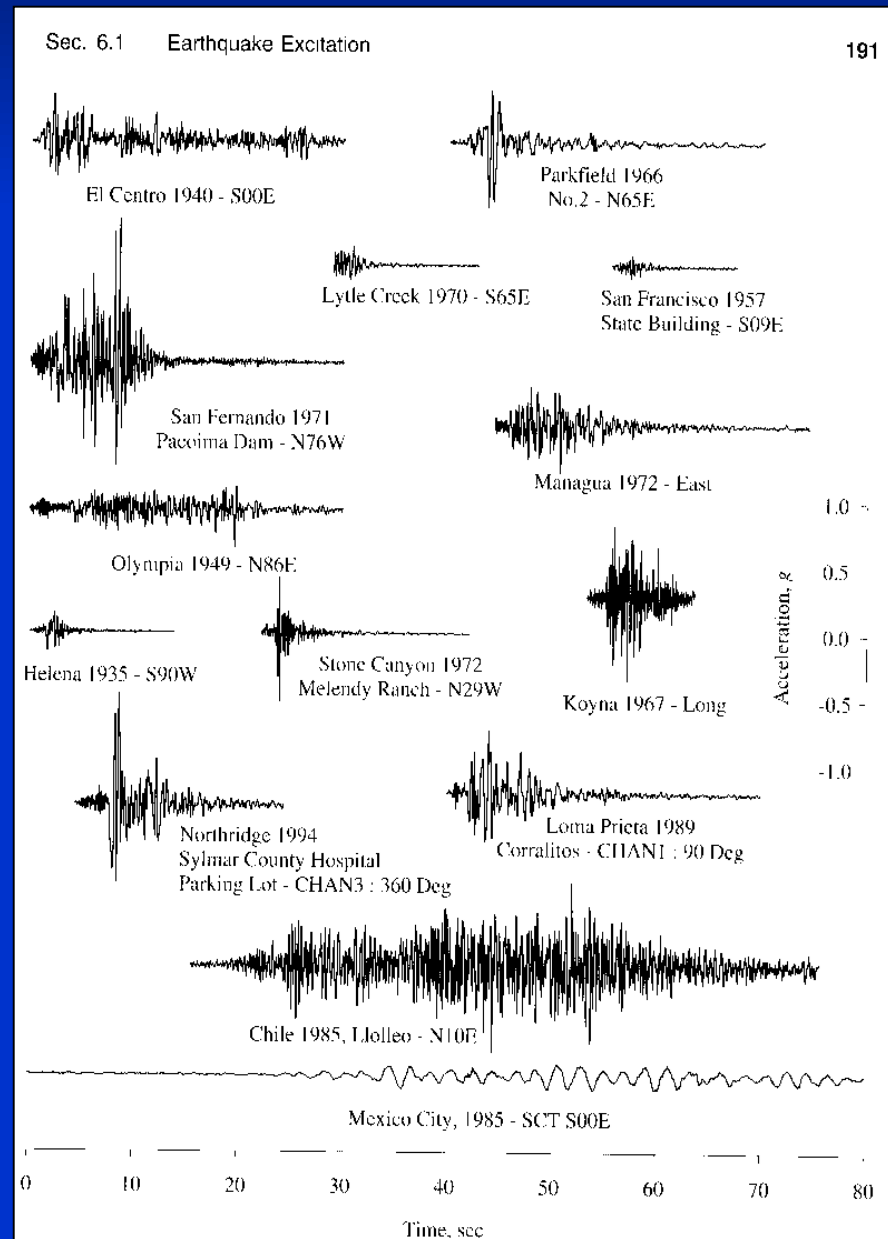
Chilean Buildings: Structural Indexes

Top Level Drift for $\delta_u = 1.3 S_{de}$ (Soil Type II)
2622 Chilean Buildings Database by Guendelman



Guendelman et al. (2010)

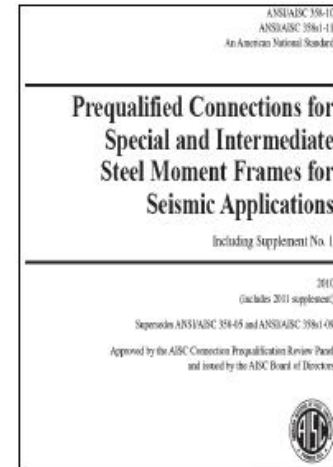
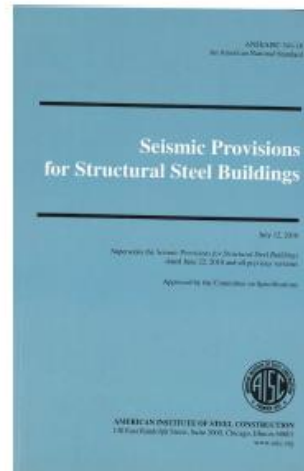
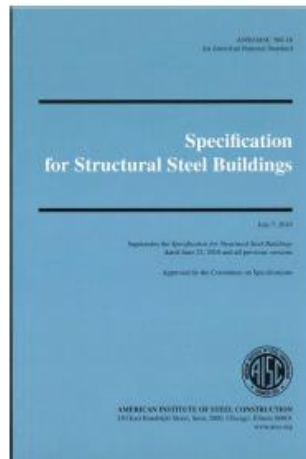
COMPARACIÓN DE ACELEROGRAMAS MUNDIALES



DISEÑO SÍSMICO EN ACERO

Normas AISC 2016

- ☐ Diseño de Edificios en Acero (AISC 360-16)
- ☐ Diseño sísmico (AISC 341-16)
- ☐ Conexiones Precalificadas (AISC 358-15)
- ☒ Estructuras Existentes (AISC 342-XX)



Normas Sísmicas AISI : **Sección 1 - Alcance**

- El uso de las *Normas Sísmicas* es obligatorio para las Categorías de Diseño Sísmico D, E o F.
- El uso de las *Normas Sísmicas* es obligatorio para las Categorías de Diseño Sísmico A, B o C cuando
 $R > 3$
- Para las Categorías de Diseño Sísmico A, B o C, se pueden diseñar usando $R=3$ sin proveer especial detallado (diseño con base exclusivamente en las Especificaciones AISI)
- **$R = 3$ No se Aplica en la Construcción Compuesta**

COLUMNA FUERTE VIGA DEBIL

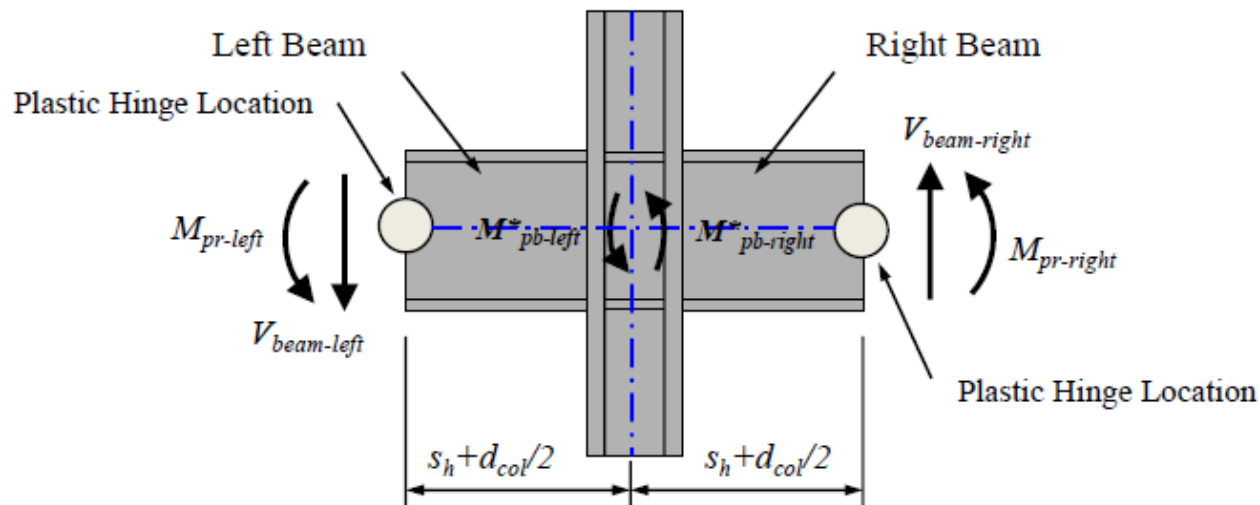
Relación de momentos resistentes
para vigas y columnas de acero

$$\frac{\sum M_{pc}^*}{\sum M_{pb}^*} > 1.0$$

$$M_{pc}^* = \sum Z_c (F_{yc} - P_{uc} / A_g)$$

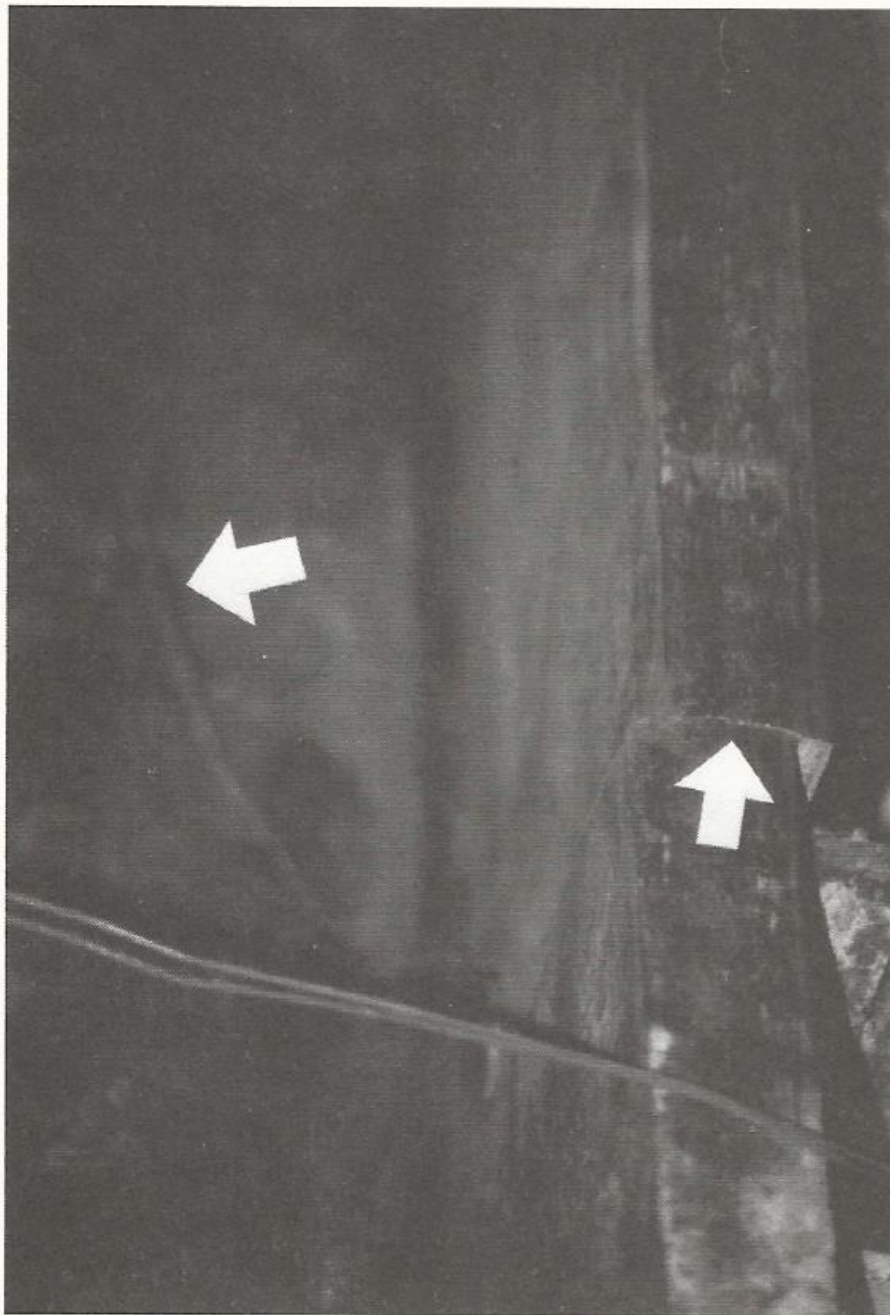
$$M_{pb}^* = \sum (1.1 R_y F_{yb} Z_b + M_{uv})$$

Cálculo de M_{pb}^*



- M_{pr} = momento esperado en articulación plástica = $1.1 R_y M_p$
 V_{beam} = resistencia requerida a cortante en viga (Ver Sección E3.6d)
 s_h = distancia de paño de columna a la articulación plástica
 (si es precalificada, ésta se especifica en ANSI/AISC 358)

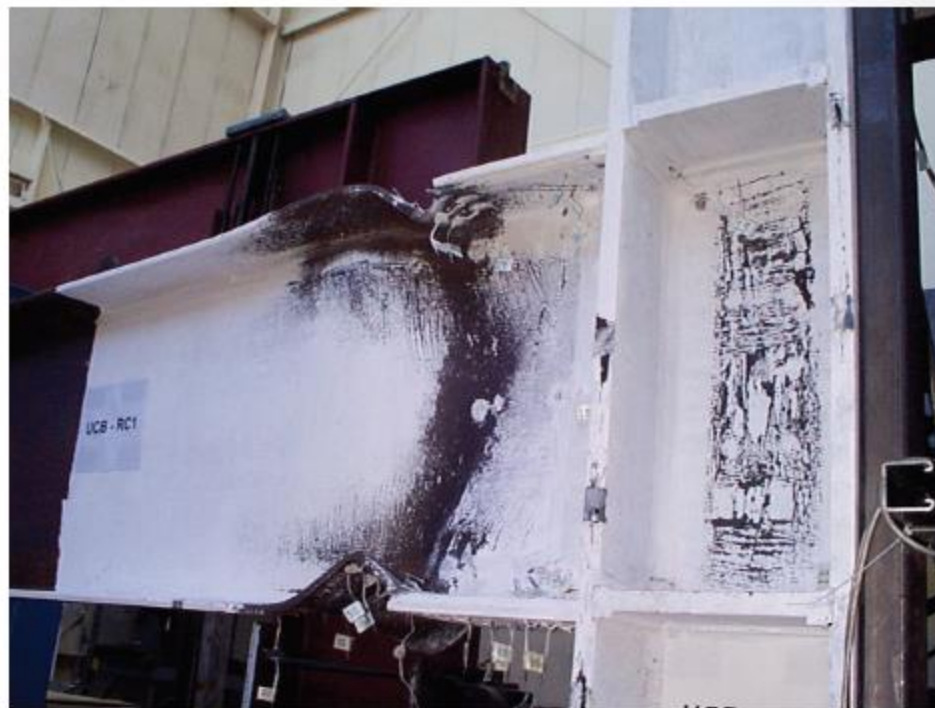
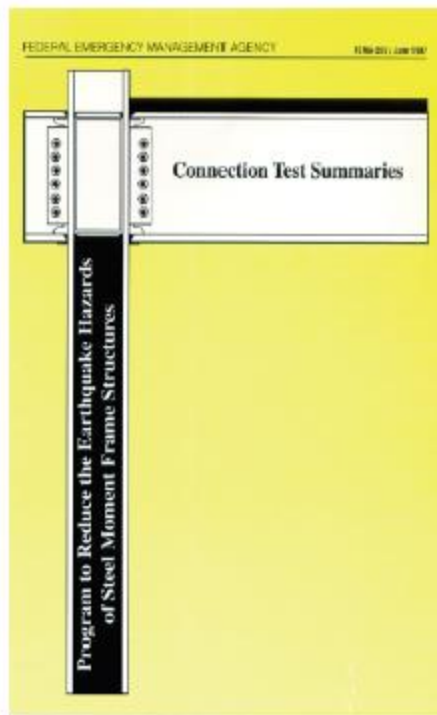
$$M_{pb}^* = M_{pr} + V_{beam} (s_h + d_{col} / 2)$$

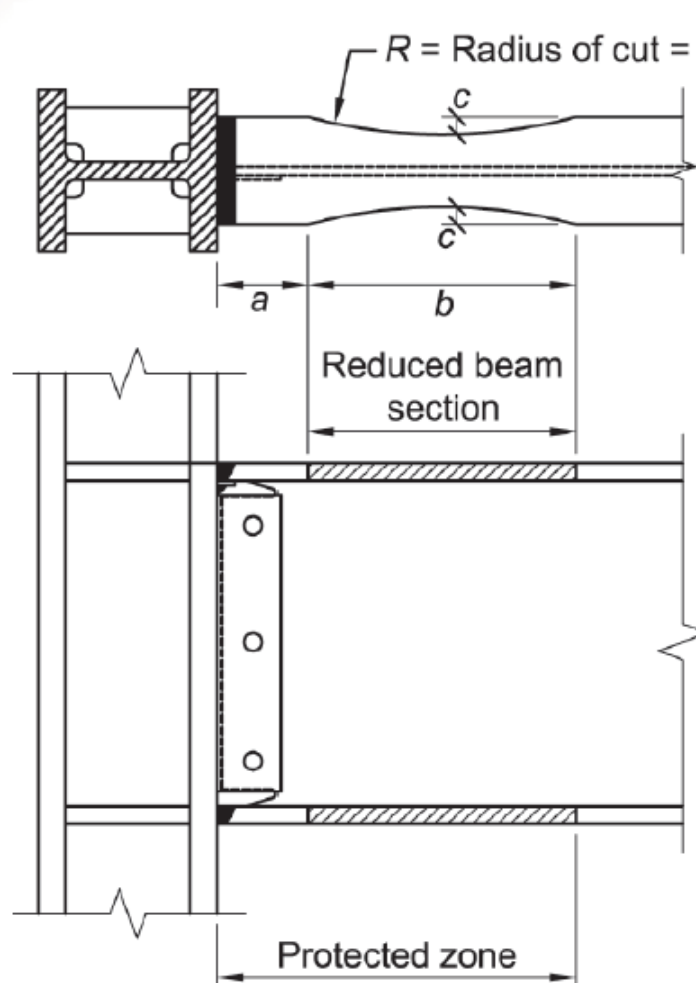


**TERREMOTO
NORTHRIDGE
1994
TERREMOTO
KOBE, JAPON**

Figure 8.16 Examples of Northridge fractures propagating through column flanges: (b) Close-up view of fracture shown in Figure 8.16a.

Programa SAC : Pruebas en >200 Conexiones





Reduced Beam
Section

(A. Plumier)

Bolted End Plates

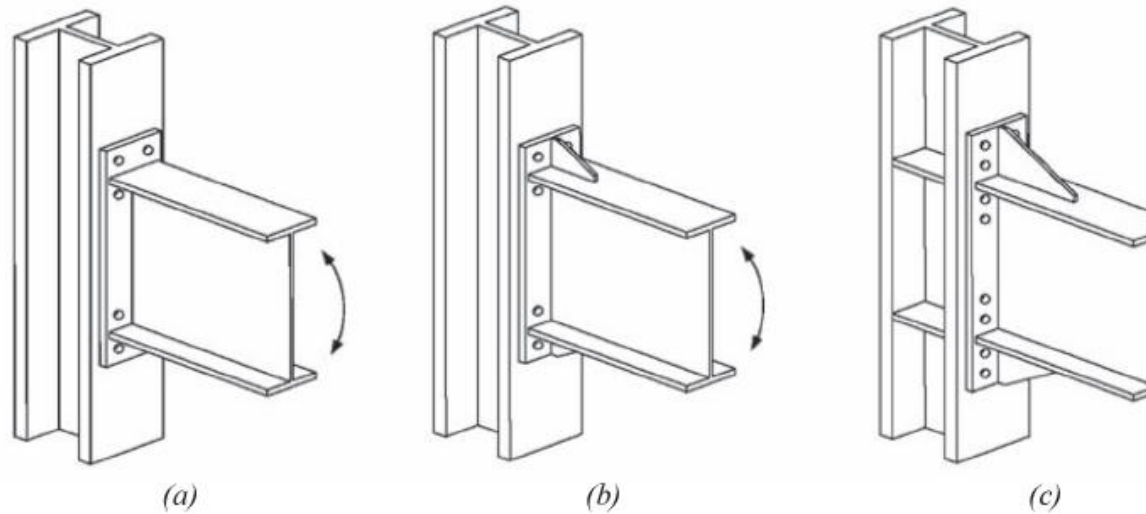
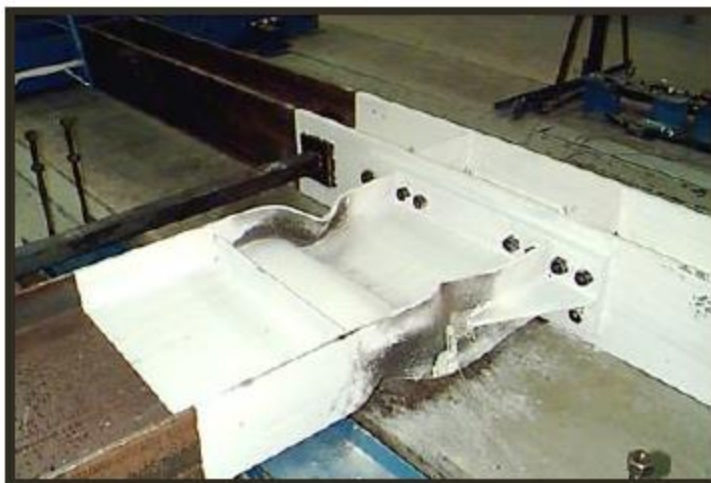


Fig. 6.1. Extended end-plate configurations: (a) four-bolt unstiffened, 4E; (b) four-bolt stiffened, 4ES; (c) eight-bolt stiffened, 8ES.

Seismic App. K2 Qualifying Cyclic Tests

Quasi static test conducted at Virginia Tech



ConXL

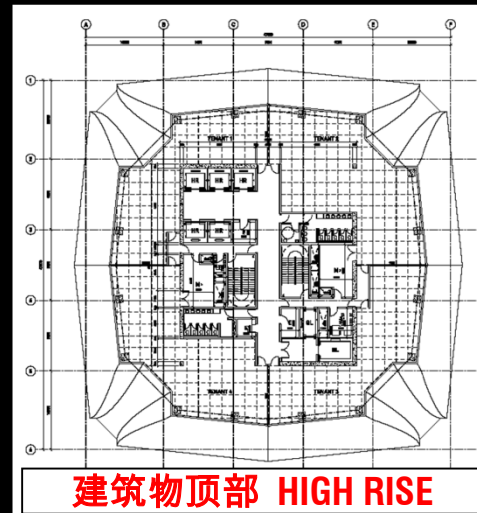
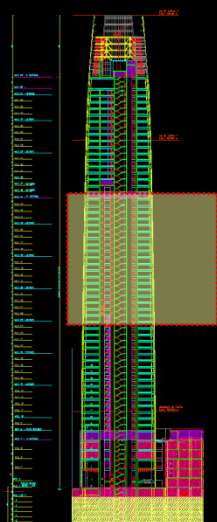
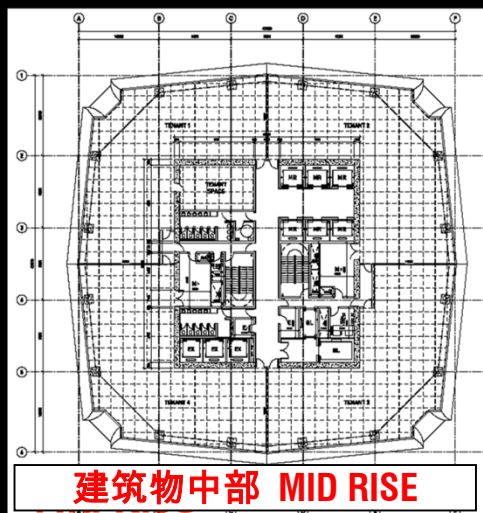
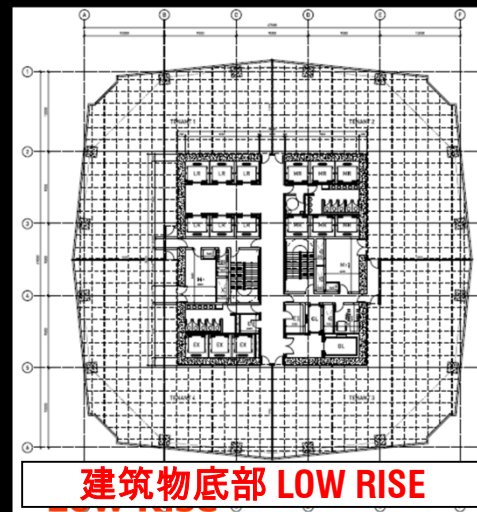
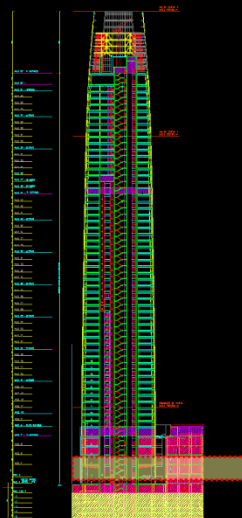
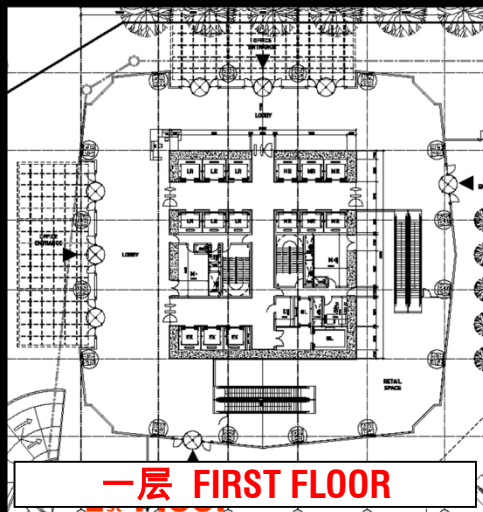


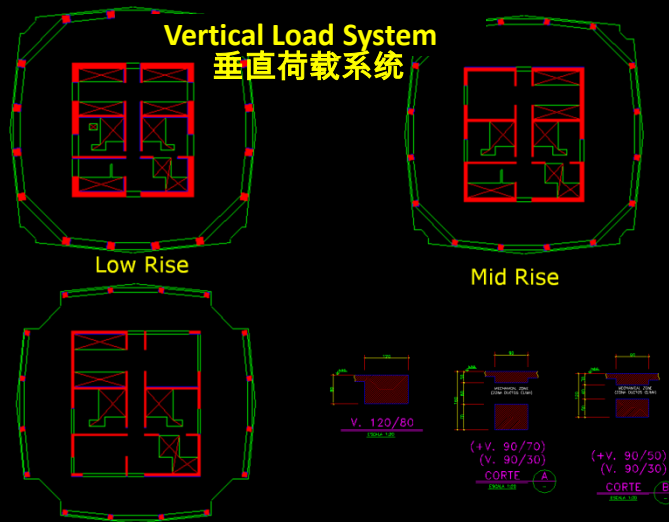


**EDIFICIO
SALESFORCE
TOWER
EDIFICIO MAS ALTO
DE SAN FRANCISCO
 $H=300$ [m]
NUCLEO HORMIGON
MARCO
PERIMETRAL
ACERO**

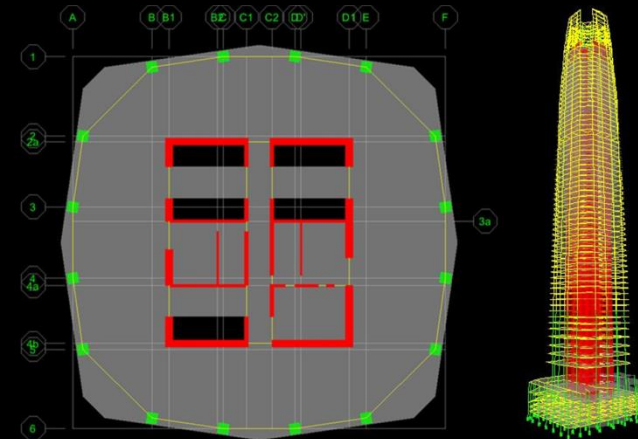


**EDIFICIO
COSTANERA
CENTER
SANTIAGO
HORMIGON
 $H=300[m]$**

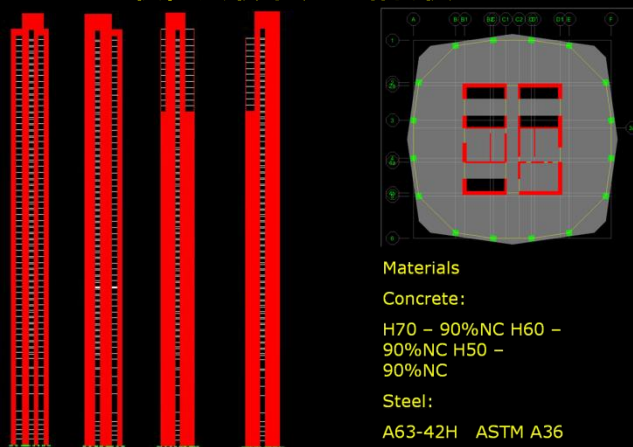




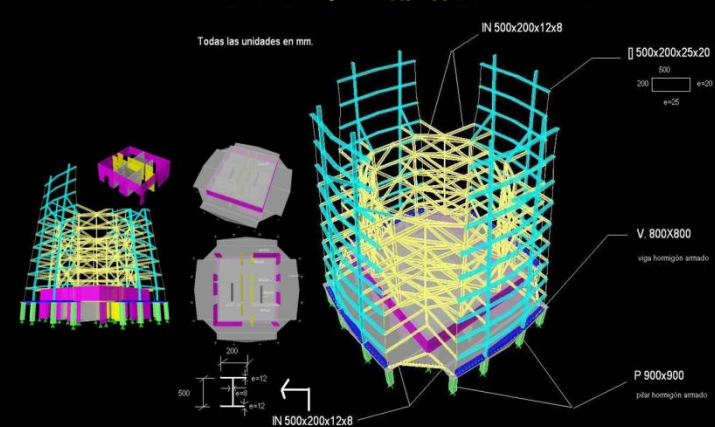
Lateral Load System: Structural Model
横向荷载系统：结构模型



Lateral Load System: Structural Model
横向荷载系统：结构模型



Building Top Structure
建筑物顶部结构



**COSTO ALTERNATIVA ACERO
COMPARADO ALTERNATIVA
HORMIGÓN
2 A 3 VECES**

Tabla 9

Story drift requirements.

Code	Permitted story drift	Scenario
Eurocode	0.5%	Brittle non-structural element, under the 10% in 10 years earthquakes
	0.75%	Ductile non-structural element, under the 10% in 10 years earthquakes
	1%	No interfering, under the 10% in 10 years earthquakes
U.S. code	2%	Under design earthquakes, i.e. 2/3 MCE
Japanese code	0.5%	Commonly used, under Level 1 earthquakes
	0.83%	Drift tolerant, under Level 1 earthquakes
Chinese code	0.4%	Under the 63% in 50 years earthquakes
	2%	Under the 2% - 3% in 50 years earthquakes.

Figura 16. Requerimientos de deriva para cada norma.



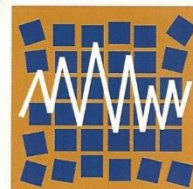
DEFORMACIÓN ENTREPISO δ



DAÑO EDIFICIO



RESILIENCIA



ACHISINA
Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica

DISEÑO SÍSMICO BASADO EN DESEMPEÑO

UN PROCEDIMIENTO ALTERNATIVO
PARA EL ANÁLISIS Y DISEÑO SÍSMICO
DE EDIFICIOS

COLABORADORES

AICE
INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES DE CHILE A.G.

ICH
Instituto del Cemento y
del Hormigón de Chile

NOVIEMBRE 2017

CONCLUSIONES

- **COSTO DE SOLUCIONES DE ACERO MUY ALTO CON RESPECTO A HORMIGON ARMADO**
- **DESPLAZAMIENTO ENTRE PISO MUY ALTOS 2% INACEPTABLE POR EL NIVEL DE DAÑO Y EN DESACUERDO CON LA PRÁCTICA CHILENA 0.2 %**