



# PROPUESTA DE MODIFICACIONES PARA CÓDIGOS DE DISEÑO SÍSMICO DE ESTANQUES DE ACERO

**Patricio Pineda Nalli**

**M.Sc. Ingeniería Sísmica**

**PPN Ingeniería y Consultoría**

**4 de Noviembre de 2021**



# Estanques Atmosféricos de Acero



**Petróleo,  
combustibles, ácido  
sulfúrico,  
criogénicos, agua  
potable y de proceso**



**Auto anclado**



**Anclado**

**Muy importante en  
la respuesta sísmica**





- **Fallas reiteradas en grandes terremotos: pandeo pata de elefante, deslizamientos horizontales, colapsos, detención operación, incendios**
- **Uso de códigos de diseño: API650-E, AWWA, NZSEE, NACE**
- **Importancia estratégica para las actividades económicas del país: minería, celulosa, obras portuarias, refinerías, petroquímicas**



- **Evaluación de la respuesta sísmica (382 casos):  
Chile 1960-1985-2007-2010, Alaska 1964,  
Estados Unidos 1933-1995**
- **Chile y otros países con gran actividad sísmica,  
buenas condiciones para Backward Seismic  
Analysis (BSA)**



# Objetivos

- Proponer metodología (BSA) de análisis basada en **respuesta sísmica real** de estanques de acero
- Mejorar prácticas de diseño con principales códigos y otros criterios
- Recoger el estado del arte nacional e internacional para difundir e **implementar las mejores prácticas** en el diseño estructural de estanques de acero.



# Cronología Principales Estudios

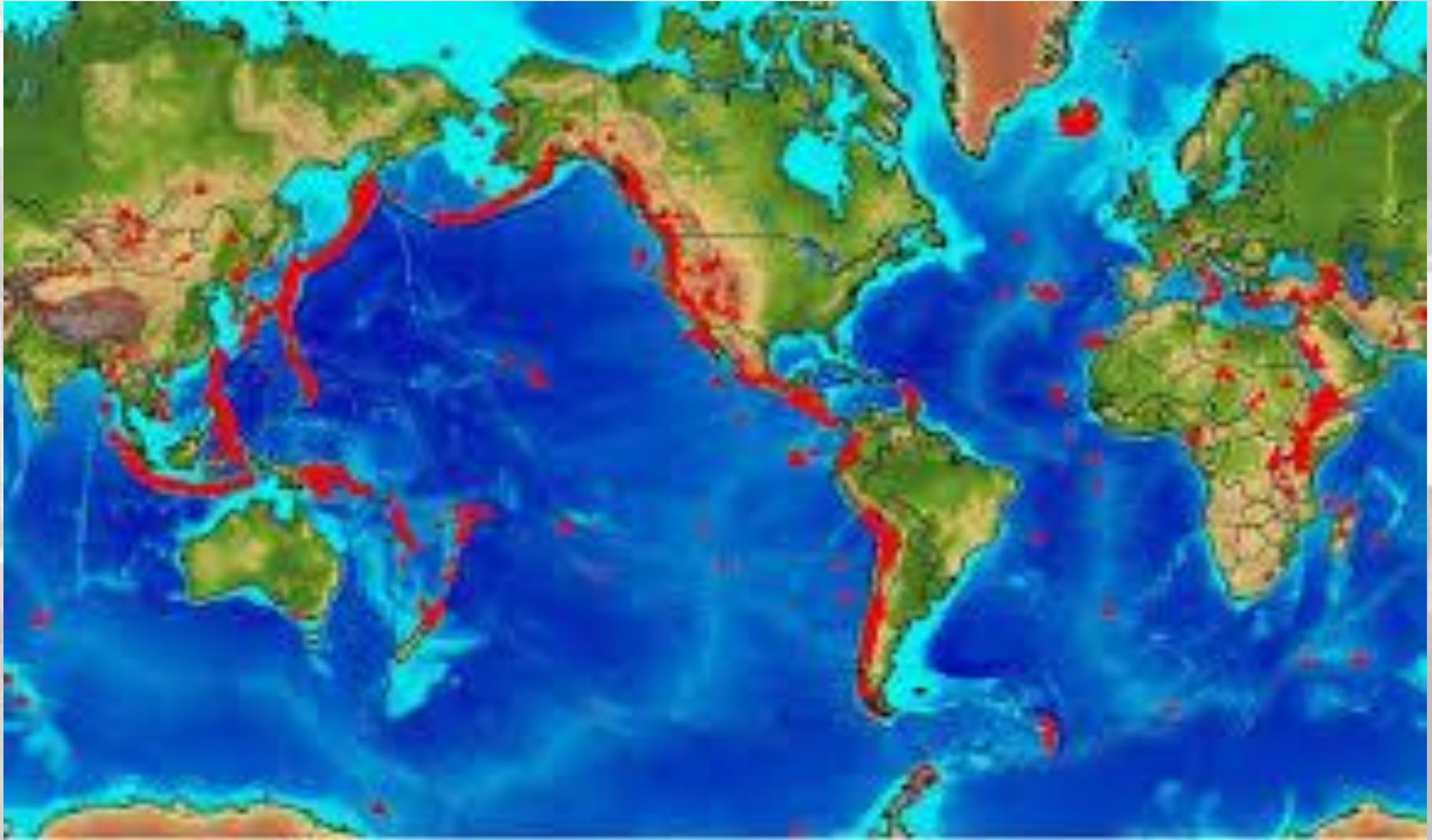
Año	Investigador	Tema	Tipo de Análisis	Publicación
1957	G.W. Housner	Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers	Teórico	SSA (1)
1963	John A. Blume	A Structural-Dynamic Analysis of Steel Plant Structures Subjected to the May 1960 Chilean Earthquake	Backward Analysis	SSA (1)
1961	API 650 (1ed.)	Welded Steel Tanks for Oil Storage Tanks	Teórico	API 650
1967	J. E. Rinne	Oil Storage Tanks, The Prince William Sound, Alaska Earthquake of 1964 and Aftershocks	Backward Analysis	CGS (3)
1977	D.P. Clough	Experimental Evaluations of Seismic Design Methods for Broad Cylindrical Tanks	Experimental	UBC/EERC
1977	Veletsos A.S. & Yang J. Y.	Earthquake Response of Liquid Storage Tanks	Teórico	ASCE (3)
1978	R.S. Wozniak(3) & W.W. Mitchell(4)	Basis of Seismic Design Provisions for Welded Steel Oil Storage Tanks	Teórico	API 650 - E
1979	R.W. Clough & A. Niwa	Static Tilt Tests of a Cylindrical Liquid Storage Tank	Experimental	UBC/EERC
1980	API 650 (8ed.)	Welded Steel Tanks for Oil Storage Tanks (Ap. - E)	Teórico	API 650
1982	G. Manos & R.W. Clough	Further Study of the Earthquake Response of a Broad Cylindrical Liquid-Storage Tank Model	Experimental	UBC/EERC
1986	NZSEE	Recommendations of a NZSEE Study Group on Seismic Design of Storage Tanks	Teórico	NZSEE

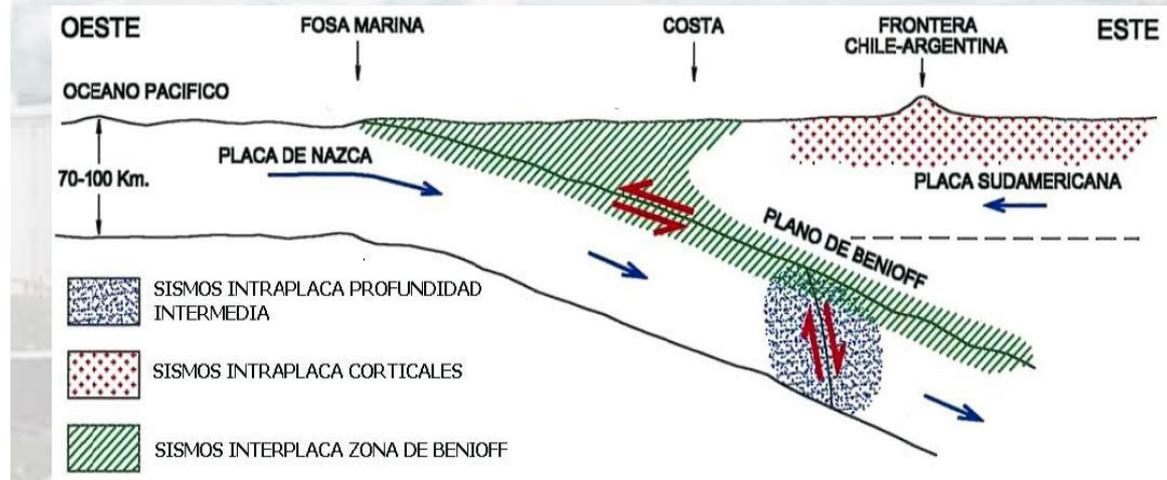
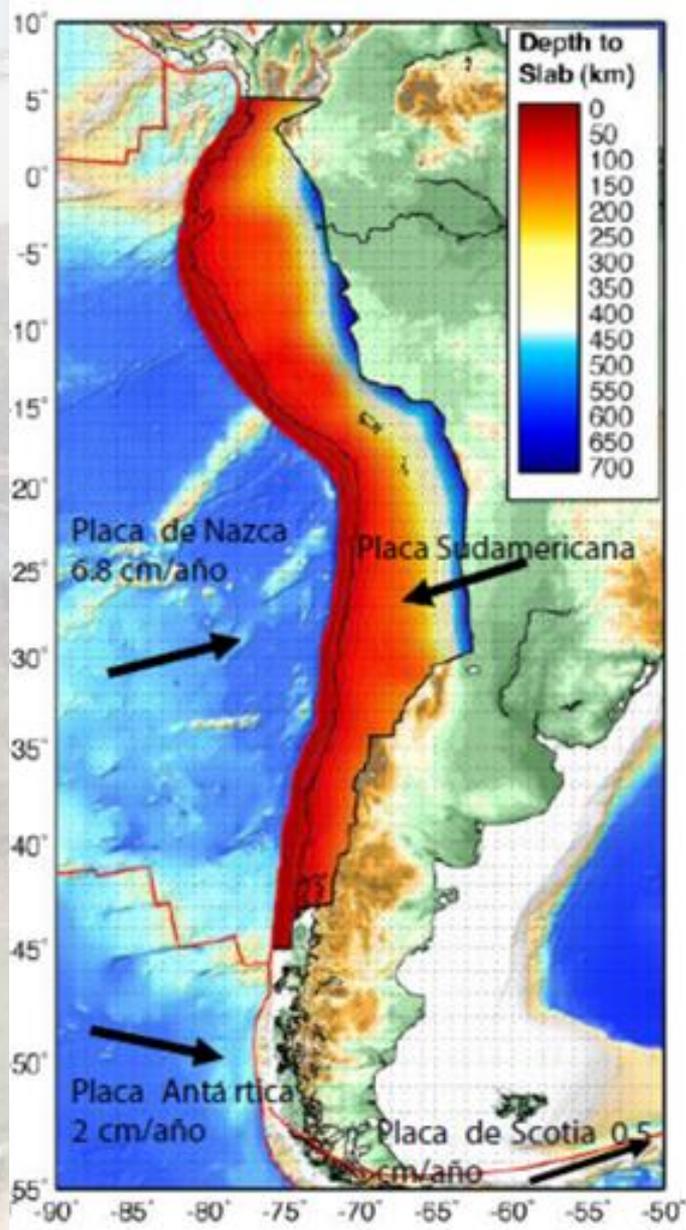
(1) Seismological Society of America  
(3) American Society of Civil Engineers

(2) Coast and Geodesic Survey

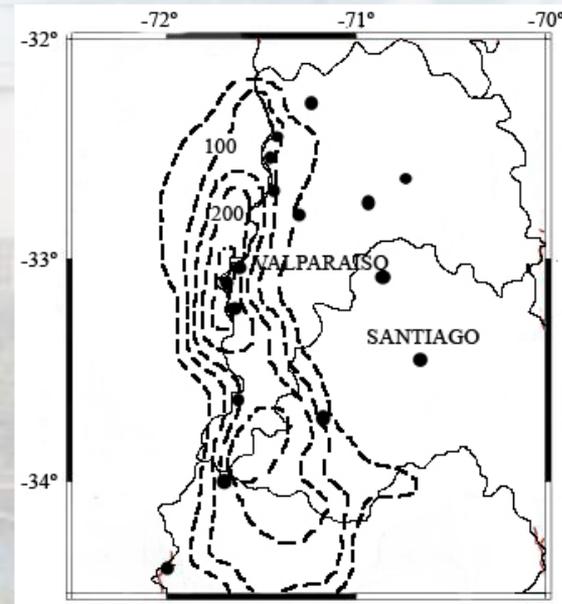


# Actividad Sísmica Circumpacífico

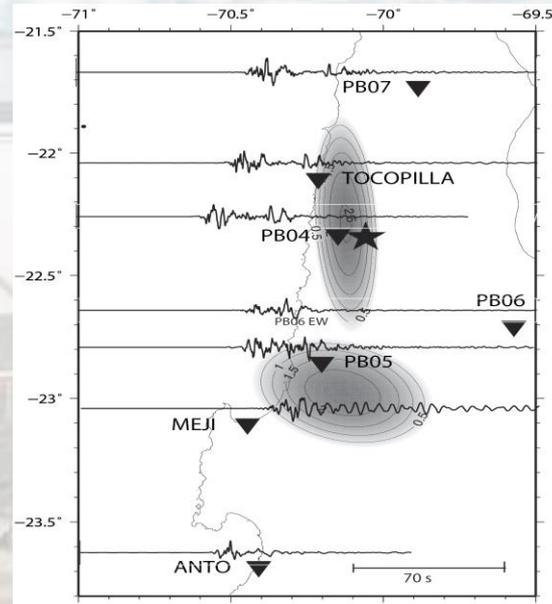




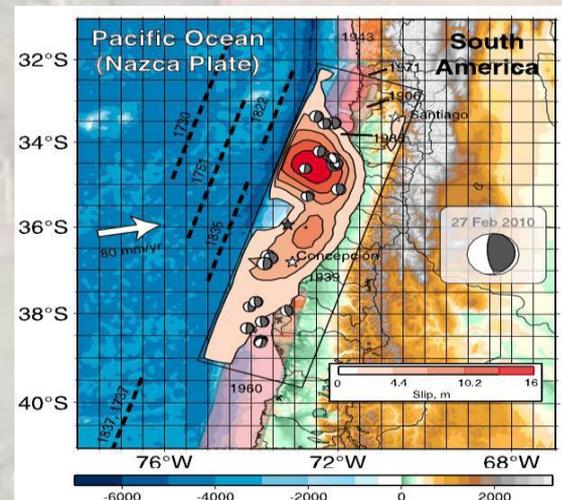
- Alta sismicidad
- Terremotos interplaca subductivos
- Epicentros costa afuera con tsunamis
- **Asperidades**



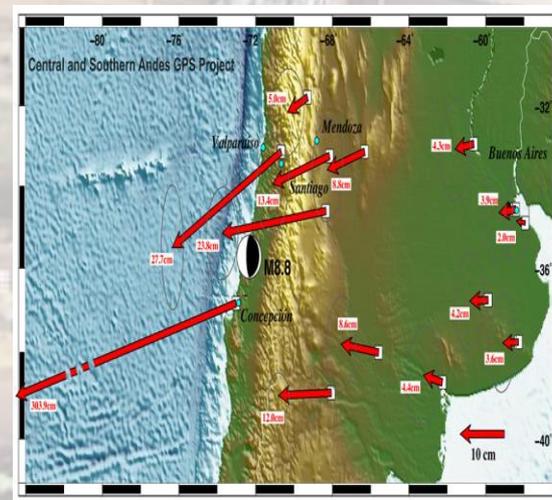
Chile Central 1985



Tocopilla 2007



El Maule 2010



- Gran liberación de energía sísmica
- Directividad sísmica
- Deslizamientos cuasi estáticos  $\perp$  costa
- Estanques en borde costero
- Deslizamiento horizontal



# Daños Observados en Terremotos

Terremoto	Magnitud (Mw)	Fallas Principales						
		RM	PM	MT	CV	PT	PA	DH
Chile 1960	9.5		X		X	X		X
Alaska 1964	9.2		X			X	X	X
Armenia 1972	7.0	X	X		X			
Chile 1985	7.9		X					
Loma Prieta 1989	6.9	X	X	X				X
Hokkaido 1993	7.6		X					X
Northridge 1994	6.7	X	X		X	X	X	X
Chile 2007	7.7		X					X
Chile 2010	8.8							
Fallas Observadas	(%) (*)	38	100	13	38	38	25	75

**RM: Rotura del Manto**

**PM: Pandeo del Manto**

**MT: Rotura Manto-Techo**

**CV: Fallas en Columnas y Vigas**

**PT: Rotura en Planchas de Techo**

**PA: Rotura de Pernos de Anclajes**

**DH: Deslizamiento Horizontal**

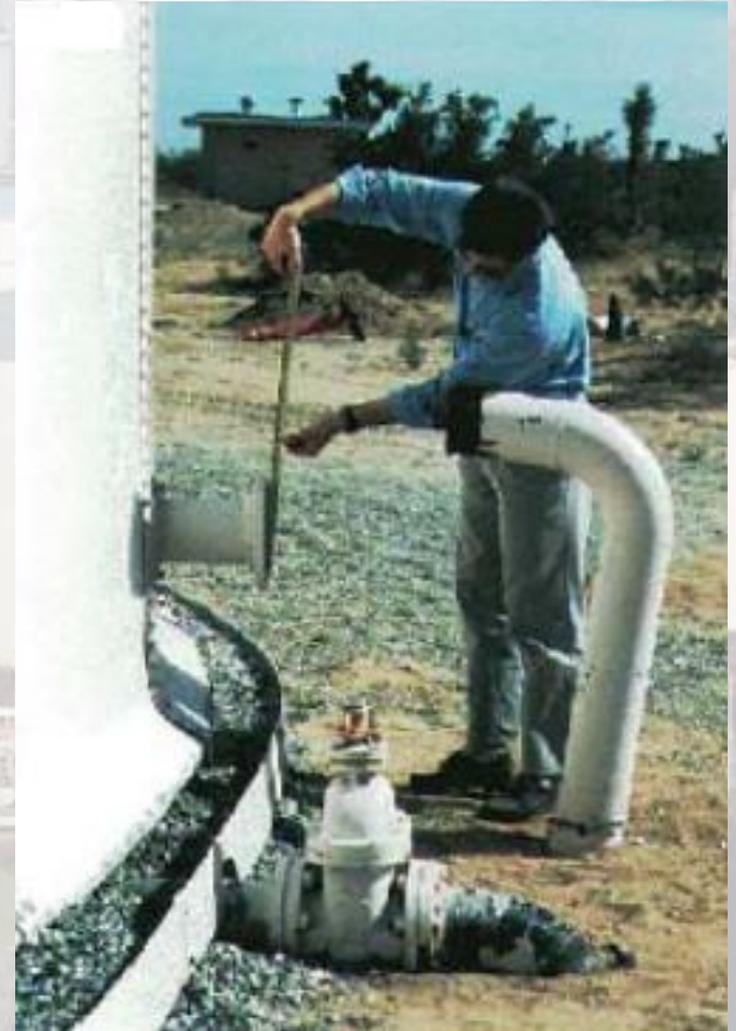
## Diseño Principalmente con API650-E



# Principales Daños Observados



**Pandeo del manto**



**Deslizamiento  
Horizontal**



# Principales Daños Observados



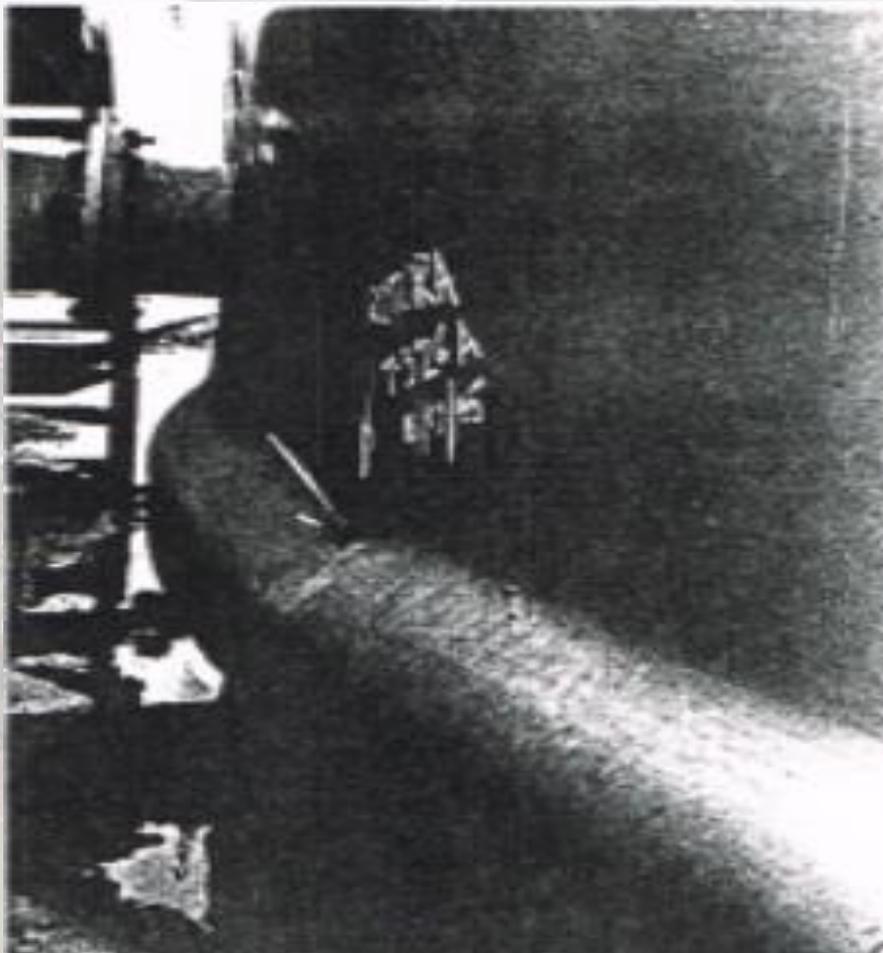
**Rotura de cañerías**



**Fallas uniones manto-techo**



## Refinería de Con Con



Tank	D/ H <sub>1</sub>	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	R <sub>c</sub> (%)	Failure
T-326A	1.06	12.20	11.30	94.4	BSL
T-326B	1.06	12.20	11.30	92.6	BSL
T-418A	1.50	12.20	11.30	92.6	BSL
T-552 (1)	0.92	12.20	11.80	92.6	BSL
T-407A	1.12	12.20	11.60	92.6	BSL
T-320A	0.92	12.20	11.60	95.1	BSL
T-4001A	0.92	12.20	11.60	100	BSL
T-405A	1.50	12.20	11.60	95.1	BSL
T-420A	1.37	11.58	11.60	95.1	BSL
T-301A	1.56	9.75	9.20	95.1	BSL
T-422A	1.83	12.20	11.60	96.7	BSL
T-402	1.84	12.20	11.30	95.1	No Damage

**Pandeo del Manto, No Anclados: diseño API650-E**



# Tocopilla 2007 – Respuesta Sísmica



**Deslizamiento Horizontal**



**Levantamiento del Manto**

**No Anclados: diseño API650-E**



# Tocopilla 2007 – Respuesta Sísmica



**Pandeo del Manto**

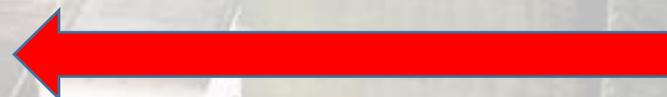
**Asperezas - Directividad Sísmica**



## Colapso. Único no Anclado: diseño API650-E



**Conexiones rígidas  
Deben ser flexibles**





# El Maule 2010 (Bio Bio) – Respuesta Sísmica



**Refinería ENAP, Sloss**



**Ola Sísmica Insuficiente (llenos)  
Diseño API650-E, no anclados**

**Asperezas - Directividad Sísmica**





## Puerto de San Vicente



**Estanques Anclados (cercanos epicentro) - Inclinación 1°  
Directividad Sísmica**

**Buen comportamiento sísmico**

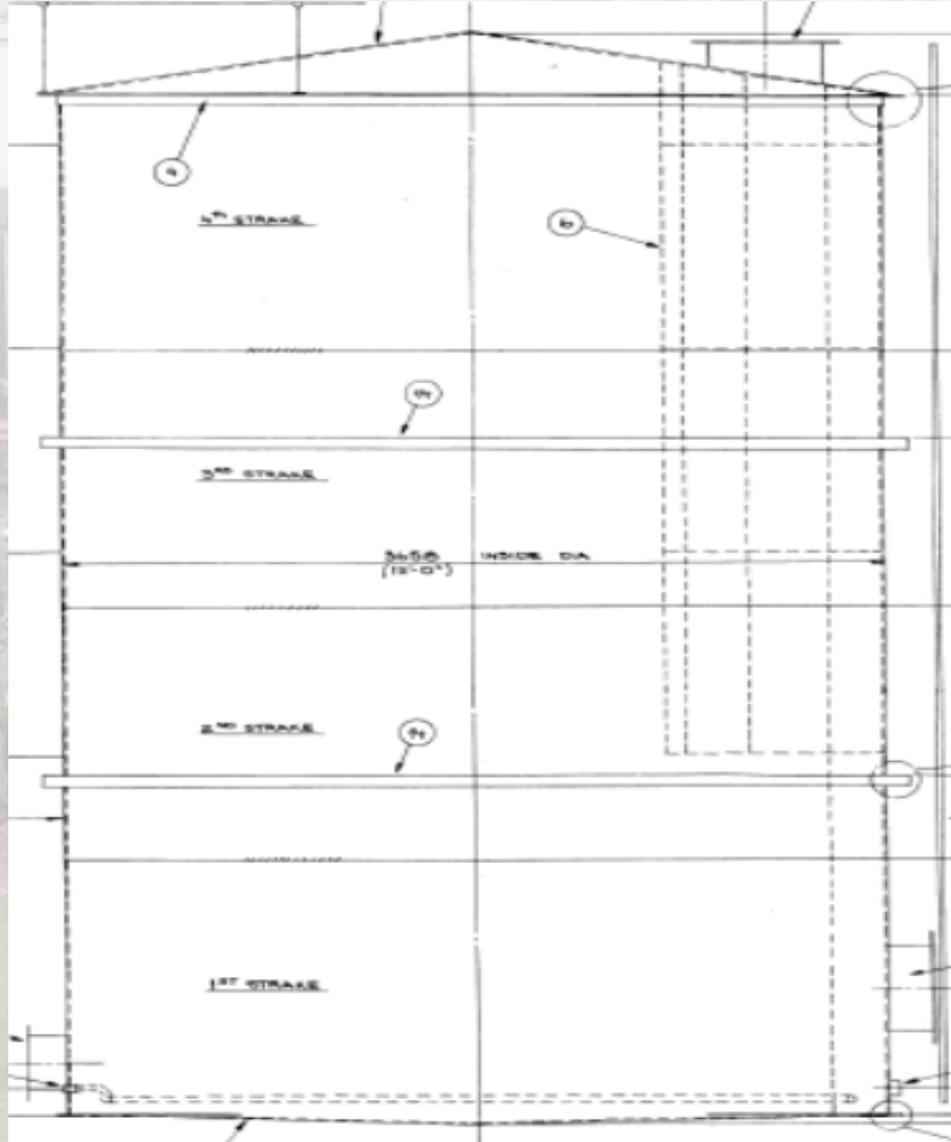


## (Codelco/Terquím, Puerto San Antonio)



**Estanques Anclados**  
**Directividad Sísmica**

**Buen comportamiento sísmico**



**Estanques CAP**  
**Anclados - Sin Daños**



# Metodología Backward Seismic Analysis

Chile: 1960-1985-2007-2010

Estados Unidos: 1933-1995 / Alaska 1964

- Evaluación de la respuesta sísmica
- Análisis de estanques de acero diseñados con códigos
- Clasificación de casos: daños, anclajes, esbelteces
- Calibraciones: diseño / lo observado
- Dimensiones críticas
- Tensiones en el manto (imperfecciones)
- Ola sísmica / Recancha
- Directividad sísmica
- Deslizamiento horizontal
- Coeficientes sísmicos



## Información necesaria:

- Dimensiones (D/H) y espesores de planchas
- Tipos de fundaciones y sistemas de anclajes
- Tipos de suelos de fundación
- Características de líquidos almacenados
- Niveles de llenado al momento del sismo
- Sismicidad y aceleraciones máximas del suelo
- Daños observados durante los sismos
- Características de los techos: cónicos, flotantes, domos
- Criterios de diseño: API650-E, AWWA, NZSEE
- Planos de ingeniería y As Built



- Modelos **no reflejan** las respuestas sísmicas observadas, no hay correlación entre:

Modelos  
Teóricos



Ensayos Experimentales  
(Mesas Vibratorias)

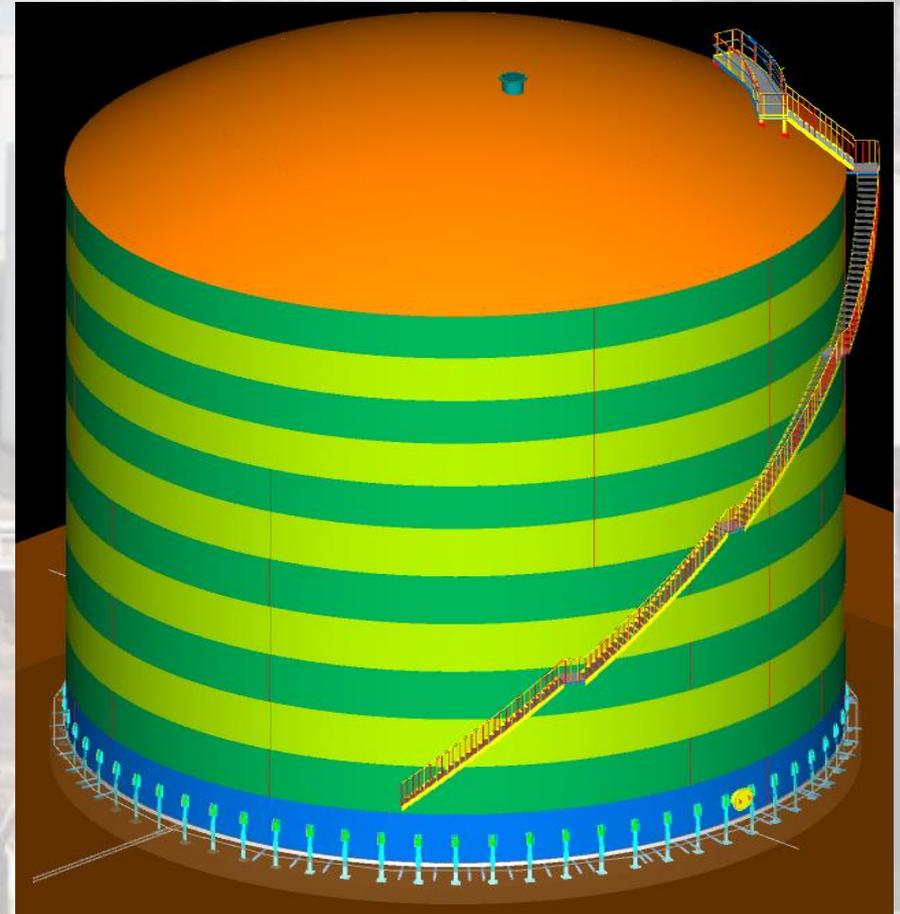


**Lo Observado**  
**Análisis Sísmico Backward**

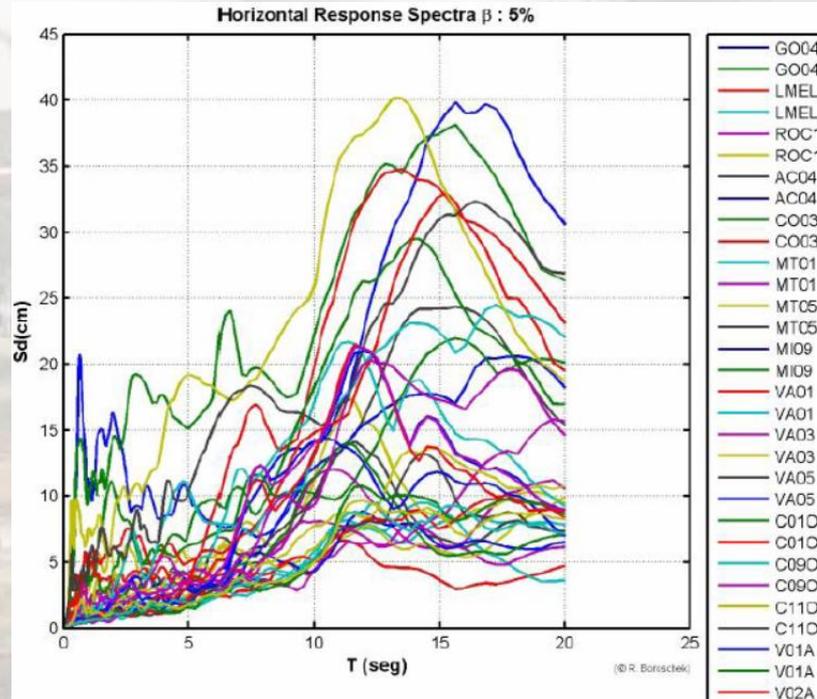
- No se cumplen supuestos:
  - Efecto pared delgada
  - Comportamiento del líquido (leyes de similitud)
  - Imperfecciones del manto (reducción de  $\sigma_{adm}$ )
  - Condiciones del suelo: efecto suelo-estructura-líquido
  - Directividad sísmica



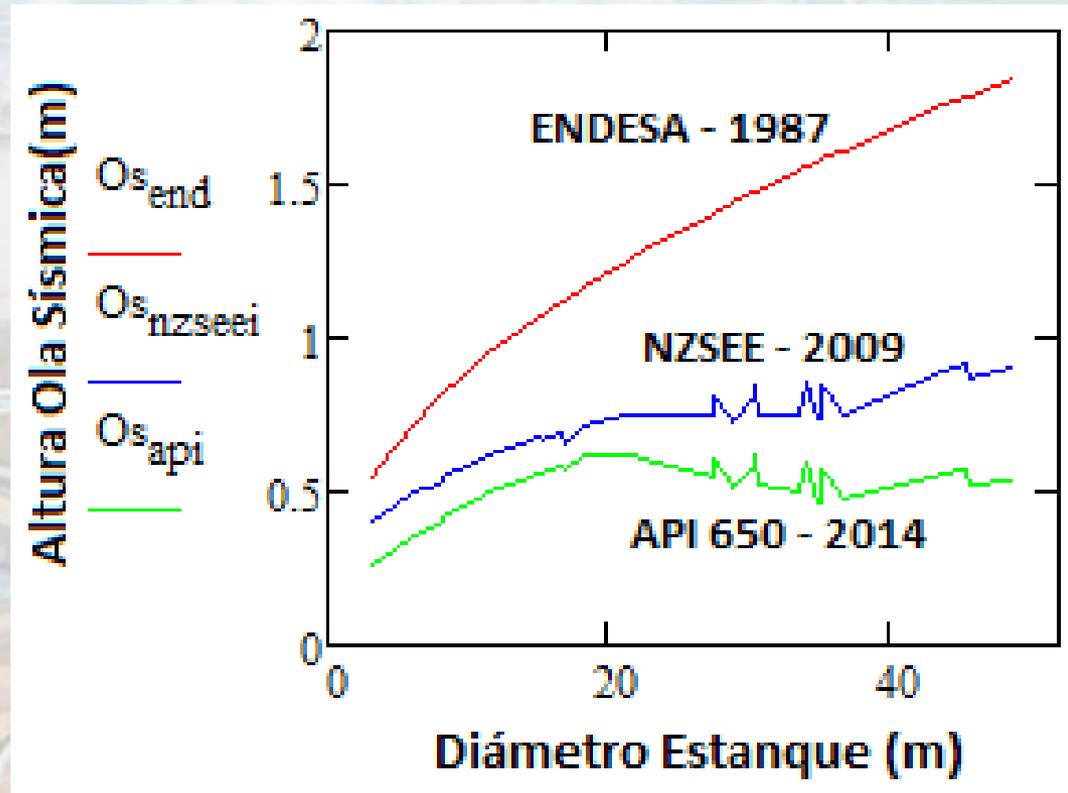
En general usar cómo referencia en sus resultados



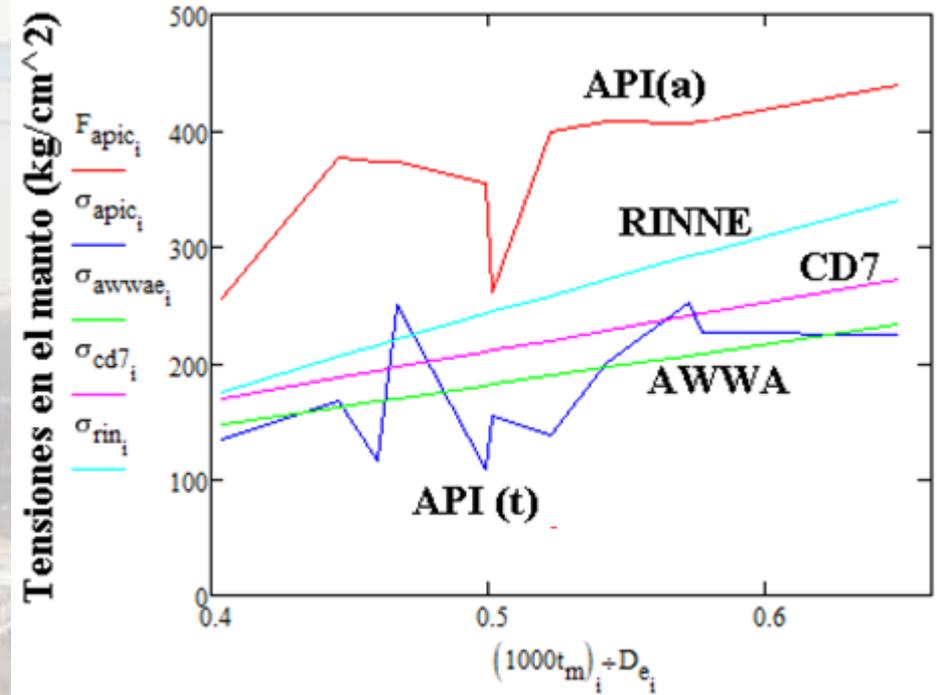
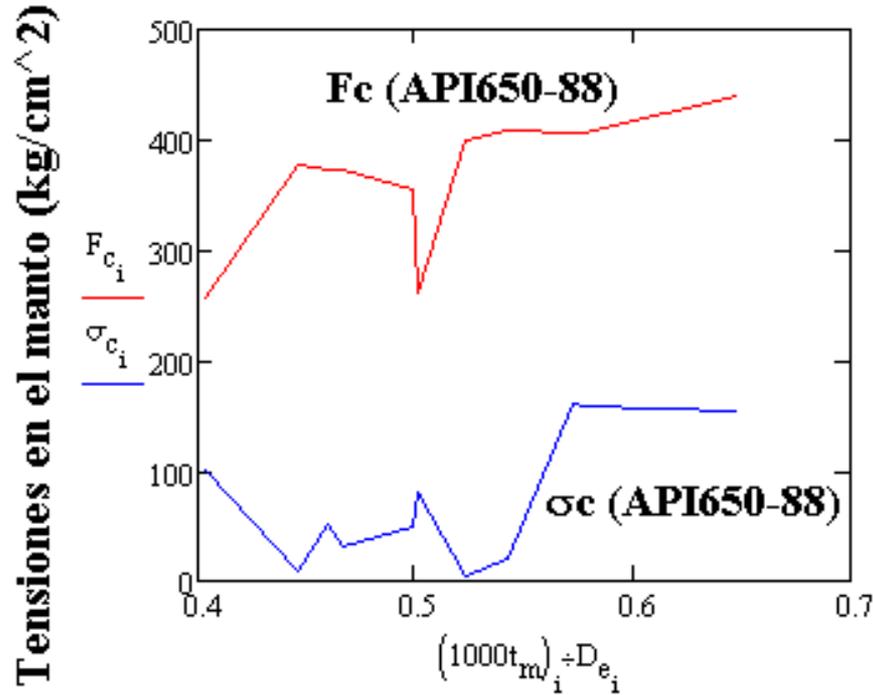
## Espectro de respuesta para desplazamientos horizontales (instrumental)



Para períodos entre 10-15 segundos, grandes desplazamientos (40cm)



- Revanchas insuficientes
- Dispersión entre formulas:
- Endesa: no considera períodos convectivos
- API650, AWWA, NZSEE: sismicidad diferente

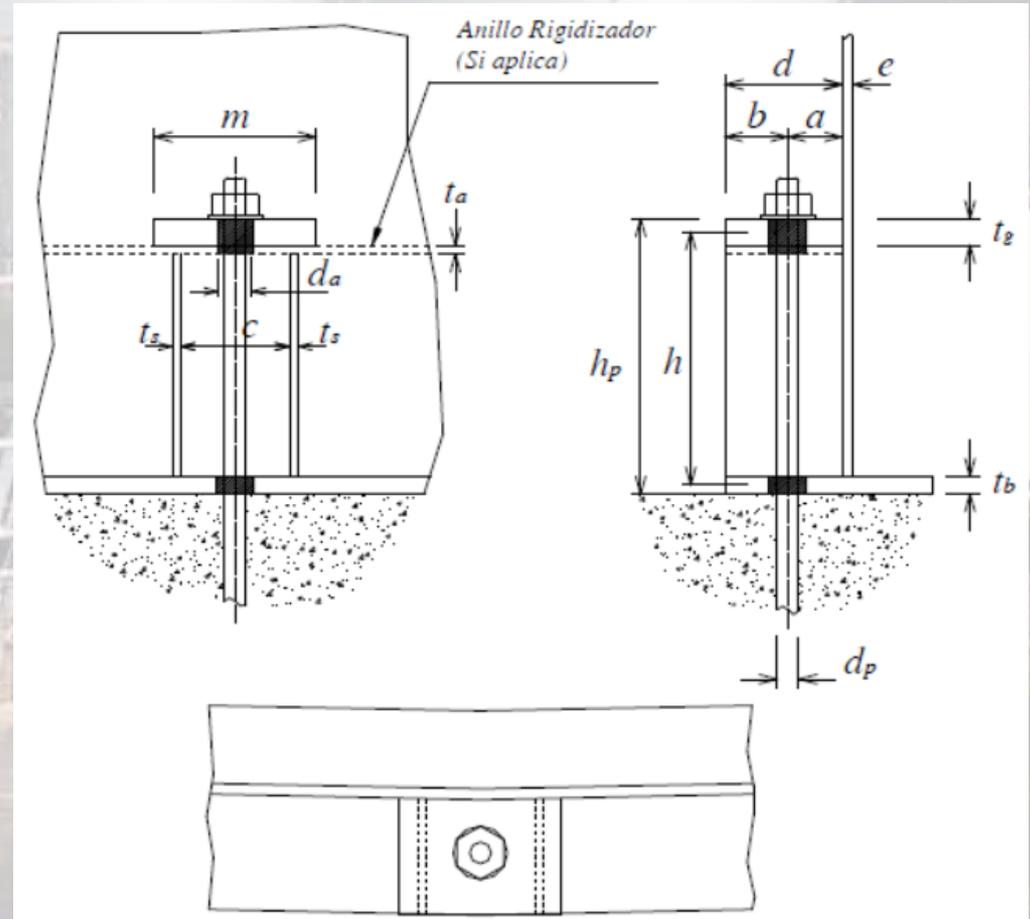


Chile 1985, subestimación con diseño API650

Dispersión entre códigos (c/s imperfecciones)

## Consideraciones para el diseño sísmico:

- Pernos de anclaje
- Llaves de corte
- Sillas de anclaje
- Anillos de anclaje
- Topes sísmicos



**Coeficiente sísmico horizontal:**

$$C_{ps} := \frac{\frac{\pi}{4} \cdot t_s \cdot (D_e)^2 \cdot F_c}{M_t} \cdot \frac{V_s}{M_s}$$

- **Amplio registro de estanques en operación (382)**
- **Ecuación propuesta considera la respuesta sísmica de los estanques**

**Efecto sísmico vertical:**

$$C_v(V_{so}, \gamma) = A_o \cdot \left( \frac{a \cdot V_{so}^{b+c}}{R^{\frac{1}{4}}} \right) > 0.10 \cdot A_o$$

$$\gamma = \frac{H_m}{R}$$

$$a(\gamma) = -3351 + 485.6 \cdot \gamma$$

- **Velocidad de ondas de corte**
- **Esbelteces (H/R)**
- **Aceleración máxima del suelo**



- Para estanques **No Anclados**
- En zonas de subducción perpendicular a la convergencia
- Fórmula para respuestas **inerciales**:

$$S[m] = - 7.76 + 1.010M ; M \geq 7.7 \text{ (Pineda \& Saragoni)}$$

( $M_w$ : magnitud momento)

## Deslizamientos observados en terremotos

Earthquake	Magnitude	Tectonic	$S_h$ (mm)	D (mm)	H (mm)
Alaska 1964	9.2	Subduction	1524	3200	9144
Tocopilla 2007	7.7	Subduction	10	35000	14500
Landers 1992	7.3	Cortical	80	16500	7300

**(Efecto cosísmico inercial: medido por GPS en metros)**



## Estudios por Clough y otros (Tesis Berkeley/Compañías): 1977-1979-1982-1989

### **Estudios 1977**

- Chevron Oil Field Research Company  
(project coordinator)
- Bechtel Corporation.
- Burmah Oil Field Research Company.
- Chicago Bridge and Iron Company.
- Foster Wheeler Corporation.
- Graver Tank and Manufacturing Company.
- Mobil Research and Development Corporation.
- National Science Foundation.
- Pittsburgh Des-Moines Steel Company.

### **Estudios 1982**

- Standard Oil Company of California  
(project coordinator).
- Brown and Root.
- Pittsburgh Des-Moines Steel Company.
- Exxon Research and Engineering Company.
- Pacific Gas and Electric Company.
- Mobil Research and Development Company.
- American Iron and Steel Institute.
- East Bay Municipal Utility District.
- Los Angeles Department of Water and Power.
- CATX Tank Erection Corporation.
- Chicago Bridge and Iron Company.



- Estudios por Clough y otros (Tesis Berkeley/Compañías): 1977-1979-1982-1989:
- “Análisis descriptivos sin aplicaciones a casos prácticos”
- “Supuestos conservadores y generales”
- “API-650 no es confiable, tiene vacíos importantes, procedimientos de diseño cuestionables ”

Se necesita mejor entendimiento del comportamiento sísmico de los estanques, BSA lo permite



# Comentarios Finales

- **API 650-E: “Application of this standard does not imply that damage to the tank and related components will not occur during seismic events”**



# Conclusiones

- Metodologías aplicadas en últimos 80 años son deficientes: API-650, AWWA, NZSEE
- Fallas reiteradas en zonas críticas, con diseños de códigos mas utilizados
- No hay correlación entre teoría y lo observado (BSA)
- Imperfecciones en el manto reducen tensiones admisibles, no consideradas en códigos de diseño



- **Modelo de Housner (códigos de diseño) con limitaciones: efectos de sitio, directividad, fuerzas inerciales**

## Mega Terremotos de Subducción



**Ocurrencia simultánea no considerada en códigos de diseño**



- **Directividad sísmica: deslizamientos horizontales cuasi estáticos, perpendiculares al borde costero, pandeo en dirección de convergencia**
- **Desplazamientos Cosísmicos no pueden ser representados en mesas vibratorias**
- **Se dispone de pocos estudios “Análisis Sísmico Backward”**
- **Mayoría de daños observados están en estanques no anclados**



- **Corregir prácticas actuales para el diseño sísmico**
- **Uso de anclajes para reducir: levantamiento, deslizamiento horizontal, tensiones en el manto**
- **Propuesta para estimar deslizamiento horizontal (Estanques No Anclados)**
- **$R_c = 1$  (masa convectiva con baja disipación de energía)**
- **Considerar imperfecciones en el manto (reducción de tensiones admisibles)**
- **Complementar resultados con mediciones de terreno**



# Líneas de Investigación

- Levantamiento y pandeo del manto considerando imperfecciones
- Análisis de espectros de diseño para períodos largos (probabilidad de excedencia / valores espectrales)
- Altura ola sísmica / Presiones en el techo
- Evaluación de Resistencia crítica de pandeo en condiciones reales (anclados y no anclados)
- Distribución de anclajes según relaciones de esbeltez
- Actualización fórmula deslizamiento horizontal
- Factor sísmico clasificador de los límites de riesgo en los diseños



## CAPÍTULO 1: Alcance y campo de aplicación

Tipos: cilíndricos, atmosféricos, apoyados en el suelo, anclados y no anclados.

Materiales: acero al carbono e inoxidable

Usos/almacenamiento: petróleo, gas licuado, ácido sulfúrico, agua, otros líquidos.



## CAPÍTULO 4: Disposiciones de aplicación general

- Clasificación: NCh2369 (ampliado)
- Tipos de suelos: NCh2369/DS N°61
- Coordinación con otras normas
- Revisión estructural y sísmica



## CAPÍTULO 5: Estados y combinaciones de cargas

- Permanentes: proyecto
- De líquidos: proyecto
- Vivas: proyecto/NCh1537
- De nieve: estudio experto/NCh431
- De viento: NCh432
- De montaje: **por definir**
- Combinación de resultados: NCh3171



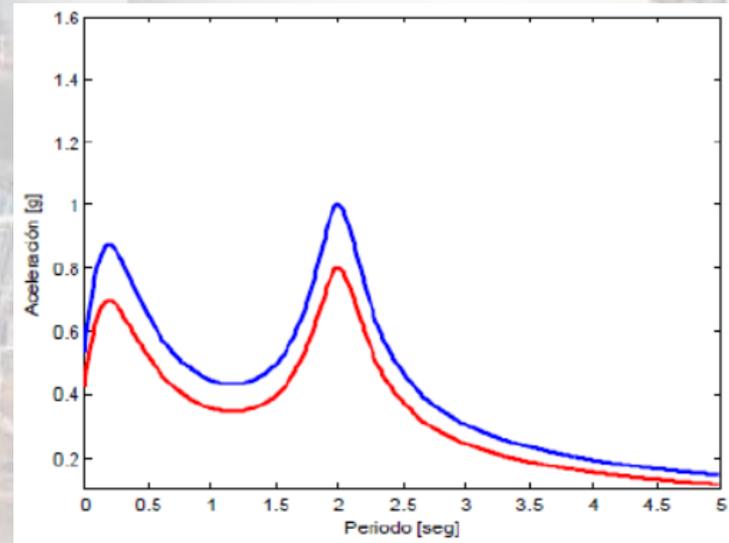
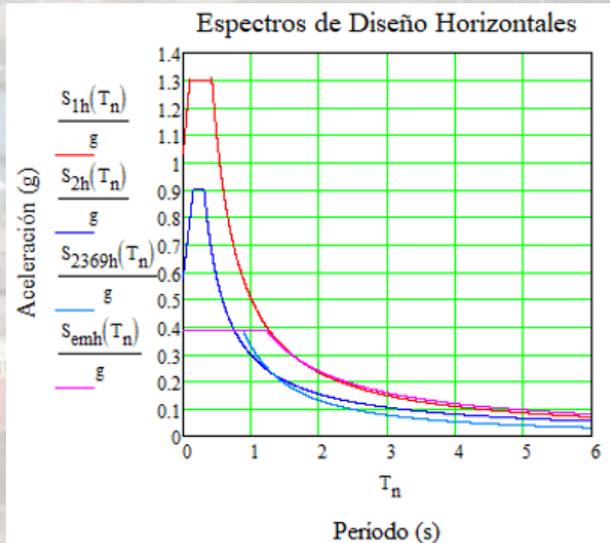
## CAPÍTULO 6: Análisis sísmico

- Zonificación sísmica: NCh2369
- Parámetros sísmicos:  $R_i=4$  /  $R_c=1$ ,  $\xi_i=2\%$  /  $\xi_c=0,5\%$
- Tipo de suelo ( $T'$ ,  $n$ ): NCh2369/DS N°61
- Interacción suelo-estructura
- Metodologías de análisis: modal espectral
- Espectros de diseño (BSA) (en trabajo)
- Efectos/aceleraciones verticales
- Estabilidad (J): anclados / no anclados (en revisión)
- Ola sísmica: nueva propuesta (en trabajo)



## CAPÍTULO 6: Análisis sísmico (BSA – 382 estanques)

### Espectro de diseño (BSA)



**BSA**

**Efecto de sitio**



## CAPÍTULO 6: Análisis sísmico (BSA – 382 estanques)

Coeficiente sísmico horizontal:

$$C_{ps} := \frac{\frac{\pi}{4} \cdot t_s \cdot (D_e)^2 \cdot F_c \cdot V_s}{M_t} \cdot \frac{V_s}{M_s}$$

( $F_c$ : defectos en el manto)

Deslizamiento horizontal:

$$S[m] = -7.76 + 1.01M \quad ; \quad M \geq 7.7$$

Coeficiente sísmico vertical:

$$C_v(V_{so}, \gamma) = A_o \cdot \left( \frac{a \cdot V_{so}^{b+c}}{R^{\frac{1}{4}}} \right) > 0.10 \cdot A_o$$
$$\gamma = \frac{H_m}{R}$$
$$a(\gamma) = -3351 + 485.6 \cdot \gamma$$





## CAPÍTULO 7: Diseño estructural

- Manto: imperfecciones en las planchas
- Presiones en el techo: nueva propuesta (en trabajo)
- Columnas: nueva propuesta (en trabajo)
- Estanques apernados: en trabajo





## CAPÍTULO 8: Sistemas de anclajes y fundaciones

### Tipos de anclajes:

- Pernos de anclaje
- Llaves de corte
- Sillas y anillos de anclaje
- Topes sísmicos
- Aceleraciones verticales
- **Otros por definir**



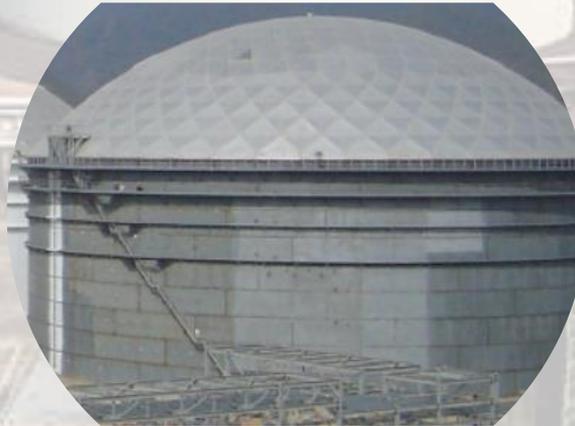
### Limitaciones: **nueva propuesta en trabajo**

- $F_s$  por perno  $< 5\text{ton}$
- Cantidad:  $Q_s = (1/3) \times \text{pernos}$



## CAPÍTULO 9: Diseño de techos

- Principalmente: cónicos, flotantes, domos
- Diseño independiente de elementos (viga coronamiento): “no es accesorio”
- Grandes tamaños: incorporar en análisis sísmico





## CAPÍTULO 10: Accesorios

### Estructurales:

- Escaleras, plataformas



### Mecánicos: API, otros

- Manhole, venteos, cañerías





## CAPÍTULO 11: Inoxidables (pared delgada)

- Alcance y campo de aplicación: dimensiones, usos.
- Materiales.
- Diseño: manto, anclajes, techos.





- Patricio Pineda: PPN Ing. y Consult.
- Sergio Contreras: SCA Consult.
- Miguel Leal: Colbún S.A.
- Juan Carlos Gutierrez: Director ICHA
- Rodolfo Saragoni: S&S Ing.
- Erwin Hevia: Salfa Montajes
- Jorge Marambio: Marambio Ing.
- José Luis Almazán: PUC
- Mauricio Martínez: CyD Ing.
- Gonzalo Cáceres: EDYCE
- Carlos Torres: Tersainox
- Fernando Elorza: independiente
- Manuel Isla: MOR Tanks
- Guillermo Gómez: OGM
- Víctor Pérez: MOP
- Luis Valdés: FLSMIDTH
- José Colombo: UDP
- Sebastián Barrios: independiente
- Carlos Ortuzar: SK
- Luis Márquez: IDIEM
- Frank Stanger: PPN Ing. y Consult.



**GRACIAS POR SU ATENCIÓN**

[patricio.pineda@ppningenieria.com](mailto:patricio.pineda@ppningenieria.com)

[patricio.pineda@ppning.com](mailto:patricio.pineda@ppning.com)

[ppningen@gmail.com](mailto:ppningen@gmail.com)

[www.ppning.com](http://www.ppning.com)