

Ingeniería y Consultoría

Revisiones Sísmicas En Proyectos de Energía

Patricio Pineda Nalli
Abril de 2017

Temas de la Presentación

- 1. Aspectos Generales de Sismología**
- 2. Normativa Vigente en Chile**
- 3. Normas Sísmicas para Instalaciones Industriales y de Energía Eléctrica**
- 4. Tipos de Revisión Sísmica**
- 5. Comportamiento Sísmico en Interior de Cavernas**



Sismología en Chile

Sismología

- **Fechas de terremotos no se pueden predecir**
- **Buenas estimaciones de magnitud, lugar y períodos de recurrencia**
- **Fuentes sísmicas: superficies no puntuales**
- **Códigos Chilenos con buenos resultados post sismos**
- **Chile es uno de los países con mayor actividad sísmica en el mundo. Permite estudios “Seismic Backward Analysis”.**
- **Destruktividad depende de: profundidad, tipo de falla tectónica**

Pregunta Frecuente

Terremoto:

Con daño observado

$$\text{IMM} \geq \text{VII}, P_D \geq 4 \text{ cm}\cdot\text{seg}$$

Temblor:

Sin daño observado

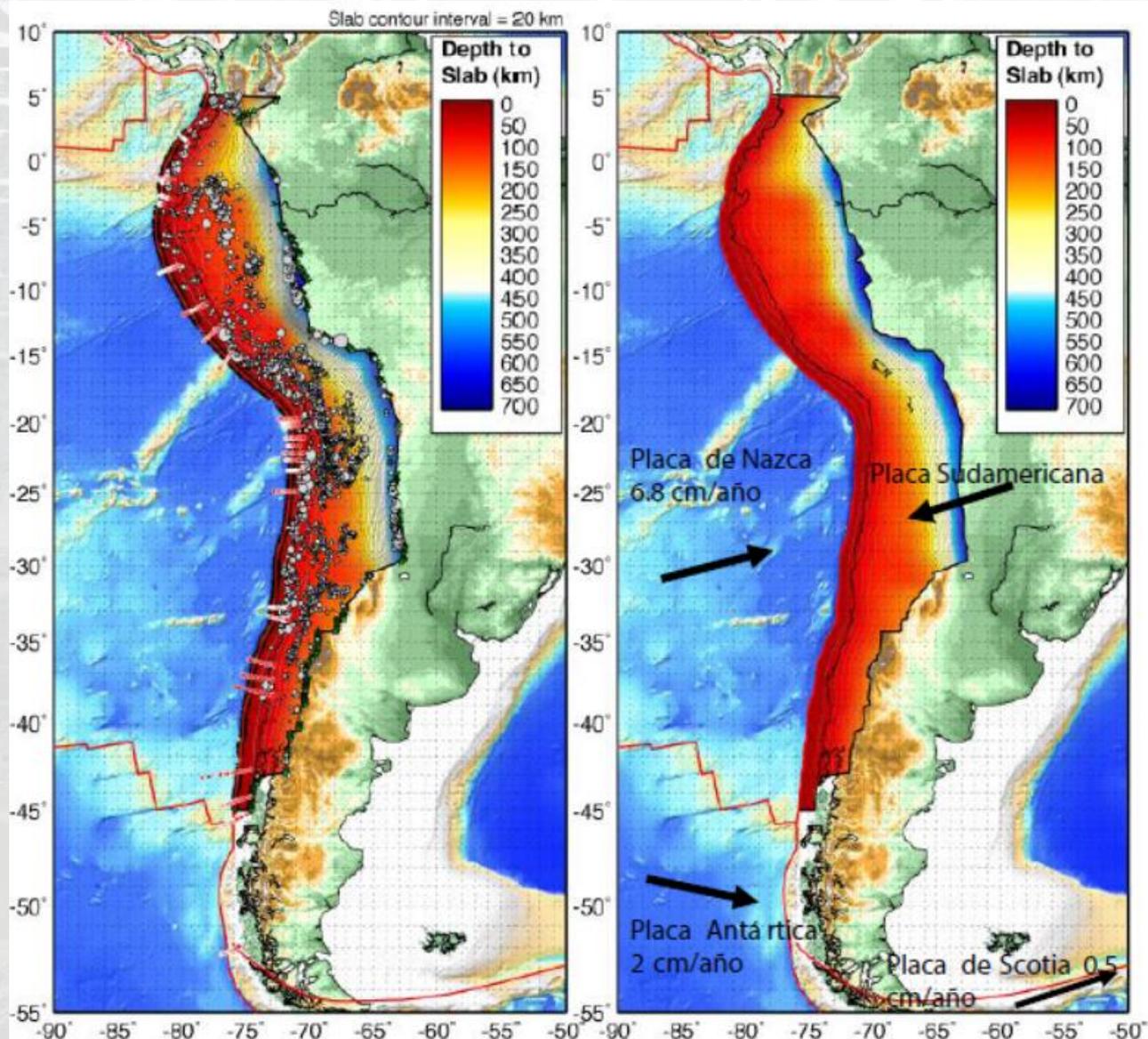
$$\text{IMM} < \text{VII}, P_D < 4 \text{ cm}\cdot\text{seg}$$

Potencial Destructivo

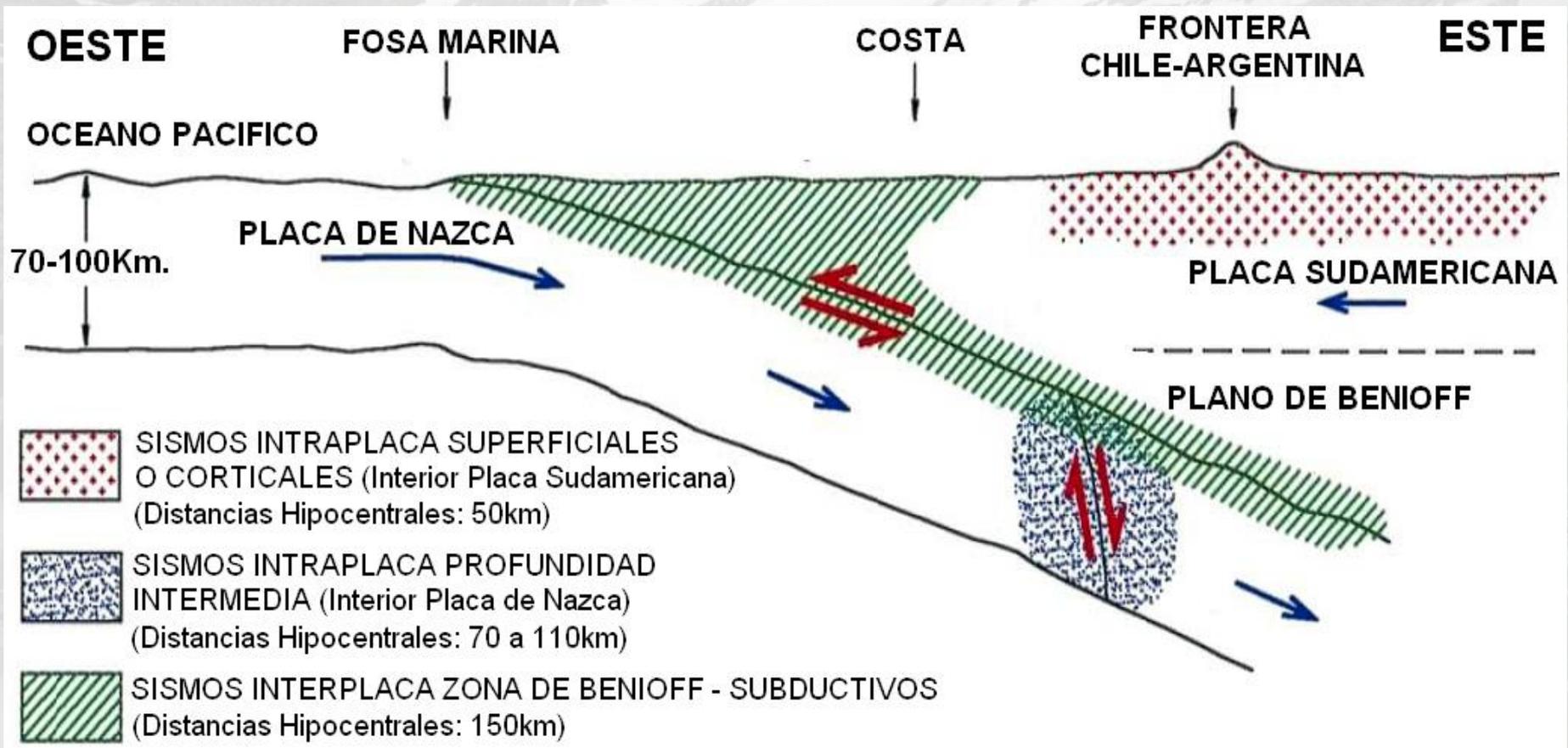
$$P_D = \frac{\pi}{2g} \cdot \frac{\int_0^{t_o} a^2(t) \cdot dt}{v_o^2},$$

- $a(t)$ = aceleración del suelo,
 t_o = duración total del acelerograma,
 v_o = intensidad de cruces por cero por segundo
 g = aceleración de gravedad.

Marco Tectónico en Chile



Interacción de Placas en Chile



Eventos Sísmicos en Chile

En los últimos 450 años:

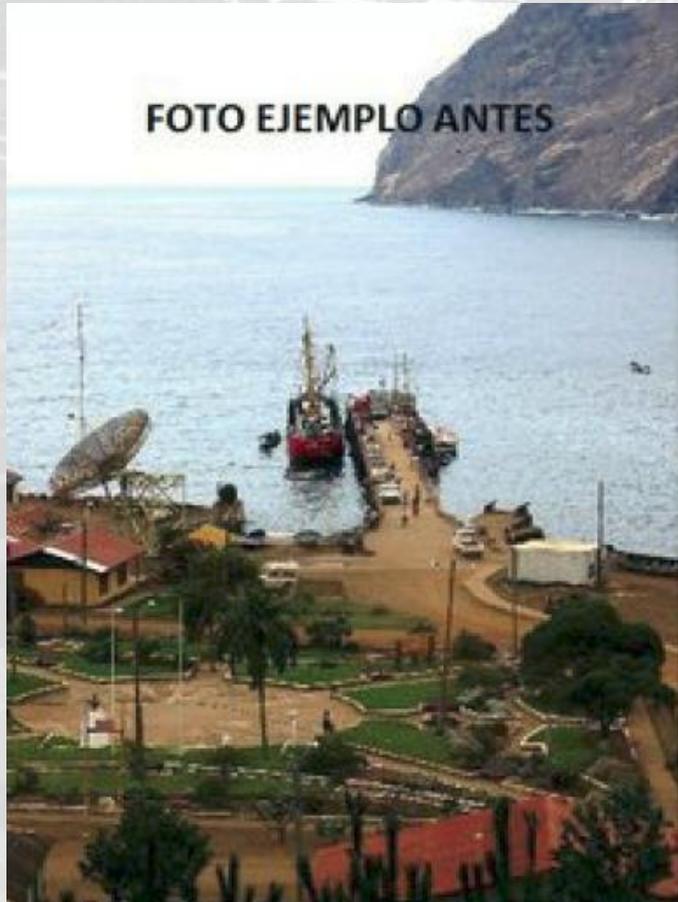
- 38 terremotos $M > 7.5$, 17 seguidos de Tsunamis

Siglo XX: 1 terremoto $M > 7.5$ cada 6.5 años

Importantes terremotos con Tsunami:

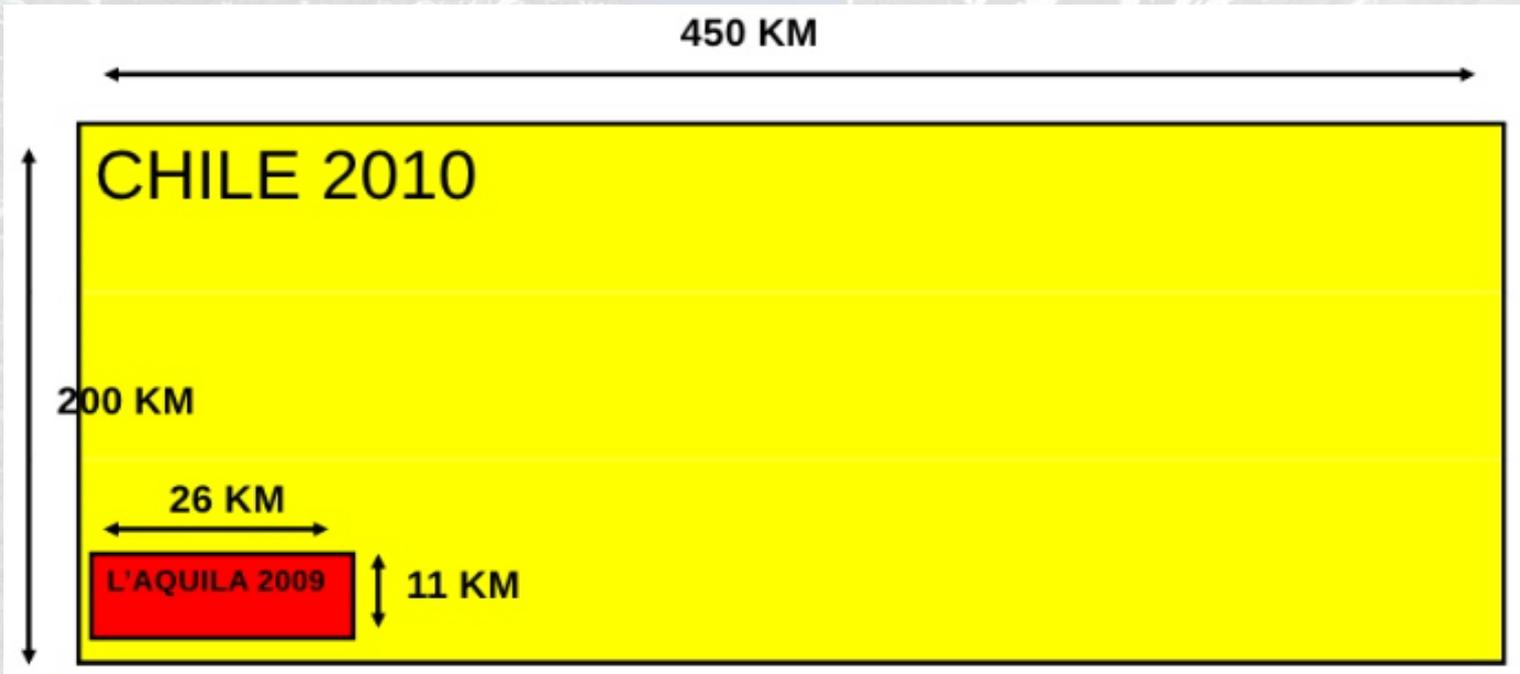
Fecha	Ubicación	$M_{\text{RICHTE}}^{\text{R}}$	Largo Ruptura (km)	Duración (seg)
Mayo, 22 de 1960	Valdivia	9.5	1000	300
Febrero, 27 de 2010	El Maule	8.8	400	120
Abril, 1 de 2014	Iquique	8.2	200	210

Tsunami: Isla Juan Fernández



Tsunamis causan mayor daño que los Sismos

Destructividad de un Terremoto



Sismo	M_{RICHTER}	Profundidad (km)	Tipo de Falla
Chile, 27 Febrero 2010	8.8	30.1	Subducción
Italia, 6 Abril de 2009	6.3	9.6	Superficial



Normativa Vigente en Chile

Normas Sísmicas

NORMA CHILENA OFICIAL

NCh 2369.Of2003

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION • INN-CHILE

Continuidad de la Operación

Versión Final Comité - Abril 2003

NORMA CHILENA

NCh2745-2003

**Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica -
Requisitos**

Reducir efectos sísmicos: fuerzas y deformaciones

NORMA CHILENA OFICIAL

NCh433.Of96

Diseño sísmico de edificios

Seguridad de vida de las Personas

NCh2369.2003 Seismic Backward Analysis

- **Diseño basado en la observación del comportamiento sísmico de estructuras**
- **Terremoto de Chile en 1960, $M=9.5$ (Planta de Huachipato). J. A. Blume.**
- **NCh2369.Of2003 bien calibrada en terremotos posteriores a su preparación**

Blume (Huachipato)

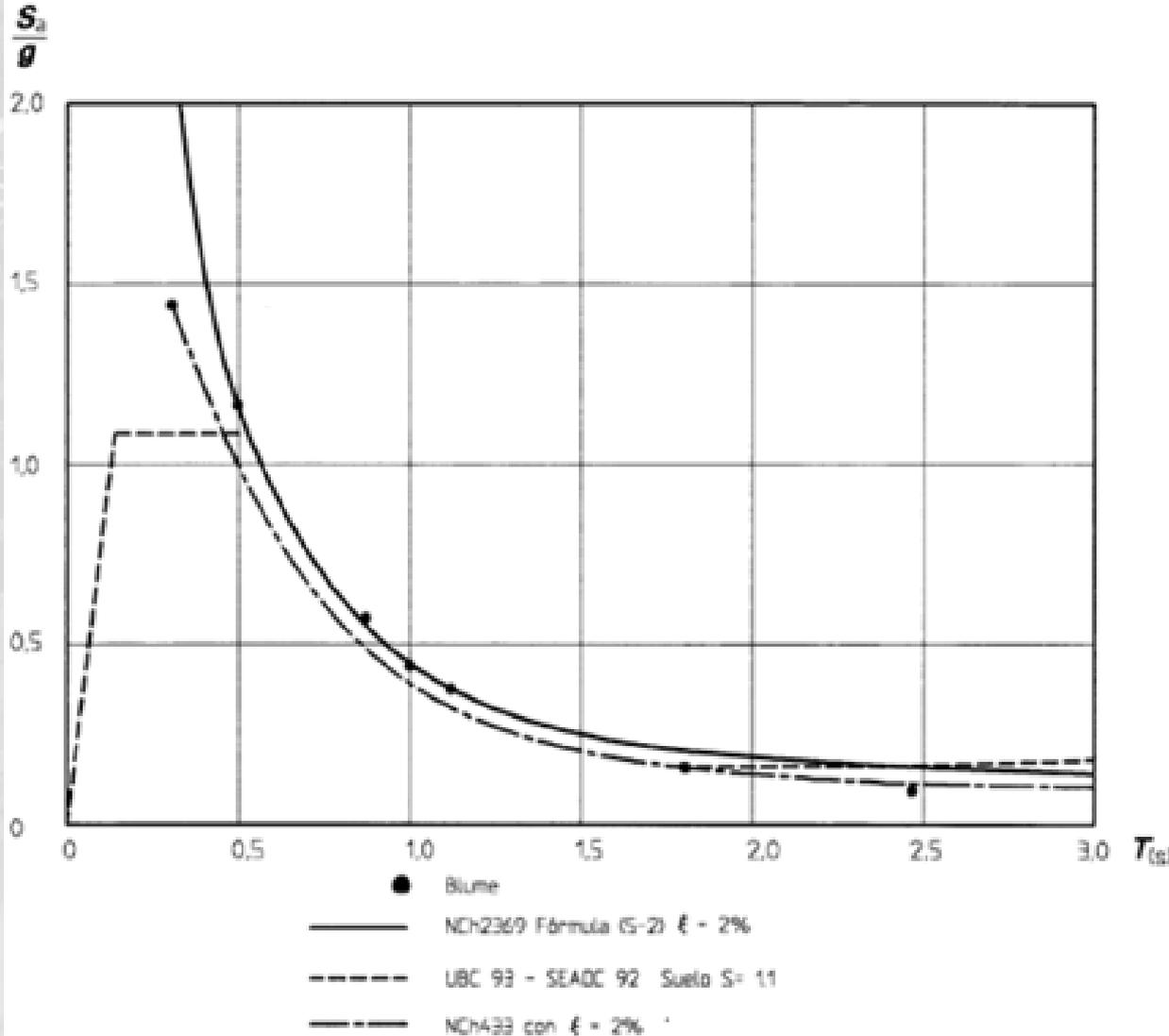


Figura C.1 - Espectros de respuesta para Huachipato
(Zona 3 $A_0=0,4 g$ Suelo II $I=1,0$)

J.A Blume:
Backward Analysis

Zona 3,
suelo tipo II

Coincidencia
satisfactoria

No es necesario
modificar espectros



Normas Sísmicas para Instalaciones Industriales y de Energía Eléctrica

NCh2369.Of2003 - Objetivos

Continuidad en la operación de la industria:

- **Mantener procesos y servicios esenciales**
- **Evitar o reducir paralización de la operación de la industria.**
- **Facilitar la inspección y reparación de elementos dañados.**

NCh2369.Of2003 - Objetivos

Clasificación:

- **Categoría C1.** Obras críticas, por cualquiera de las razones siguientes:
 - a) Vitales, que se deben mantener en funcionamiento para controlar incendios o explosiones y daño ecológico, y atender las necesidades de salud y primeros auxilios a los afectados.
 - b) Peligrosas, cuya falla involucra riesgo de incendio, explosión o envenenamiento del aire o las aguas.
 - c) Esenciales, cuya falla puede causar detenciones prolongadas y pérdidas serias de producción.
- **Categoría C2.** Obras normales, que pueden tener fallas menores susceptibles de reparación rápida que no causan detenciones prolongadas ni pérdidas importantes de producción y que tampoco pueden poner en peligro otras obras de la categoría C1.
- **Categoría C3.** Obras y equipos menores, o provisionales, cuya falla sísmica no ocasiona detenciones prolongadas, ni tampoco puede poner en peligro otras obras de las categorías C1 y C2.

NCh2369.Of2003

No aplica a:

- **Centrales Nucleares**
- **Centrales de energía eléctrica**
- **Líneas de transmisión**
- **Presas, Tranques de relaves, Puentes, Túneles, Muelles Gravitacionales, Muros de Contención, Líneas de Ductos Enterradas**

No contiene análisis vibratorios: molinos, harneros, otros

Edificios de oficinas, casinos o similares se pueden diseñar de acuerdo a NCh433.Of96

NCh2369.Of2003

Equipos Eléctricos:

11.11.1 Las disposiciones de la presente norma son aplicables a los aspectos estructurales de los equipos eléctricos ubicados en el interior de las plantas industriales. No se aplican a los equipos de generación y transmisión ni a las subestaciones principales, los que se deben regir por especificaciones especiales.

11.11.2 La operatividad eléctrica de estos equipos durante un sismo se debe calificar de acuerdo a normas especiales definidas por los ingenieros de proceso.

11.11.3 Los aisladores se deben diseñar contra la ruptura con un coeficiente de seguridad mínimo de 3,0, para las combinaciones de cargas que incluyen sollicitación sísmica.

Análisis por ubicación del Equipo

Caso 1: Robustos y rígidos apoyados en el suelo:

Esta disposición se refiere a equipos cuyo periodo fundamental propio es menor o igual a 0,06 s, incluyendo el efecto del sistema de conexión a su fundación.

Estos equipos se pueden diseñar por el método de análisis estático, con un coeficiente sísmico horizontal igual a $0,7 A_0/g$ y un coeficiente sísmico vertical igual a $0,5 A_0/g$.

Caso 2: Equipos montados sobre estructuras:

- Efectos generados por la estructura
- Amplificación dinámica
- Tipo de análisis por definir en cada proyecto

NCh2369 Actualización en consulta Pública

Se incorporó:

14. Sistemas de Generación y Transmisión de Energía Eléctrica:

- Centrales Termoeléctricas
- Centrales Eólicas
- Centrales Termo solares
- Sistemas de Transmisión

NCh2369 Actualización en consulta Pública

Norma Técnica de Seguridad y Servicio (Comisión Nacional de Energía), establece:

Aplicación de Normas Chilenas (no se dispone)

ETG-1020 (ENDESA). Especificación De Diseño Sísmico De Instalaciones Eléctricas De Alta Tensión

IEEE 693-2005: IEEE Recommended Practice For Seismic Design Of Substations

NCh2369 Actualización en consulta Pública

Objetivo: Requisitos para un adecuado, comportamiento sísmico similar o equivalente a lo que ha ocurrido hasta ahora (Seismic Backward Analysis)

Alcance:

- **En caso de contradicción con NCh2369 prevalecen estándares específicos**
- **Se debe garantizar la pronta recuperación de la operación: resistencia, límites de deformaciones y desplazamientos**

NCh2369 Actualización en consulta Pública

Alcance:

- El análisis y diseño debe ser sometido a revisión sísmica independiente por un profesional de reconocida experiencia en Proyectos de Instalaciones Industriales

Disposiciones ETG1.020

1. Intensidad Sísmica de Diseño, máximos valores:

aceleración	velocidad	desplazamiento horizontal
a/g	v (cm/s)	d (cm)
0,50	50	25

2. Amortiguamiento:

- **Máximo 2% (menor que NCh2369.Of2003), similar a NCh2369 Actualización**
- **Otros valores con aprobación de Transelec**

Disposiciones ETG1.020

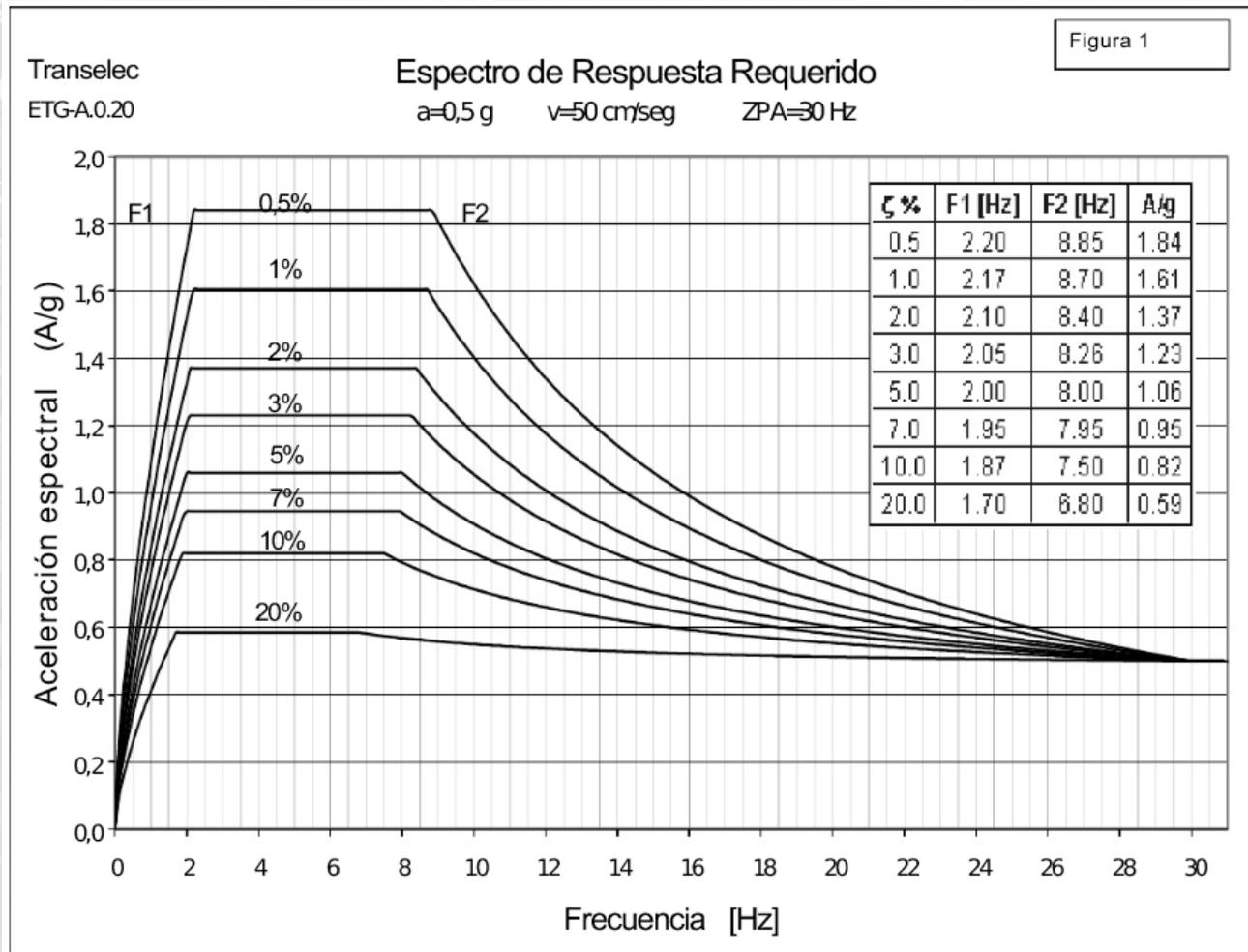
Equipos Rígidos, deben cumplir:

- a) forme una unidad independiente montada sobre una fundación única implantada directamente en el terreno, sin interposición de una estructura soportante;
- b) esté desacoplado mecánicamente de otros equipos o estructuras vecinas;
- c) que su frecuencia natural más baja, determinada experimentalmente, sea superior a 25 Hz.

Equipos sobre Estructuras:

En el caso de verificación de equipamiento que se instala sobre una estructura soporte la cual se desconoce su rigidez, o que no se demuestra que su frecuencia propia es superior a 25 Hz, los valores anteriores para la componente vertical y horizontal de la acción sísmica de diseño se aumentarán en un factor igual a 1,5 (factor estructura).

Disposiciones ETG1.020



Similar a NCh2369 Actualización

Disposiciones ETG1.020

Métodos de Análisis:

1. De preferencia Estático

2. Dinámico:

- Con dispositivos de disipación de energía, cuya respuesta no pueda obtenerse con método estático

3. Acciones sísmicas: similares NCh2369 Actualización

4. Combinar acciones simultáneas con el Sismo: vibraciones, efectos térmicos, cortocircuito, viento.

5. Amortiguamiento:

- Máximo 2% (menor que NCh2369.Of2003), similar a NCh2369 Actualización

Disposiciones IEEE 693

Alcance:

- 1. Edificios de subestaciones, estructuras y equipos**
- 2. Instalaciones deben permanecer operativas durante y después de un sismo. Equipos, anclajes, servicios e interconexiones.**
- 3. Combinar acciones simultáneas con el Sismo: similar a ETG**

Disposiciones IEEE 693

Calificación Sísmica:

1. Nivel sísmico alto: $A_g > 0.5g$
2. Nivel sísmico moderado: $A_g > 0.25g$
3. Nivel sísmico bajo: valores mínimos

Consideraciones Especiales:

- Clasificación diferente a NCh2369
- Considerar sismicidad y tipos de suelo de normas Chilenas



Tipos de Revisión Sísmica

Solicitud Sísmica – Opción 1

Espectros de Respuesta de Aceleraciones

$$\frac{S_{ah}(T,R,\xi)}{g} = \begin{cases} a_0 \left(1 - \frac{T}{T_1} \right) + \frac{A}{R} \left(\frac{T}{T_1} \right) & T < T_1 \\ \frac{A}{R} & T_1 \leq T < T_2 \\ \frac{A}{R} \left(\frac{T_2}{T} \right)^{2/3} & T_2 \leq T < T_3 \\ \frac{A_1}{R} \cdot \left(\frac{T_3}{T} \right)^2 & T_3 \leq T \end{cases} \quad (14-1)$$

Depende de las características de la estructura

Solicitud Sísmica – Opción 2

Estudio de Amenaza Sísmica

- Probabilístico verificado con un estudio determinístico
- Probabilidad de excedencia de 10% en 50 años
- Vida útil considerada de 50 años
- Valores espectrales no pueden ser menores que un 80% del método 1
- Sismo vertical = 60% sismo horizontal

Análisis Estático Equivalente (Coeficientes Sísmicos)

$$C(T, \xi) = \frac{S_a(T, \xi)}{g} \quad (14-2)$$

en que:

$S_a(T, \xi)$: Pseudo aceleración de diseño obtenida de la expresión 14-1. En caso de tratarse de la dirección vertical, el valor se obtiene de la sección 14.6.3.

Análisis Sísmico

Análisis Dinámico (Coeficientes Sísmicos)

El valor del Espectro de Aceleraciones de diseño, S_a , definido en la expresión (5-5) se reemplaza por el que se obtiene de la expresión (14-3).

$$S_a = I_E \cdot S_a(T, \xi) \quad (14-3)$$

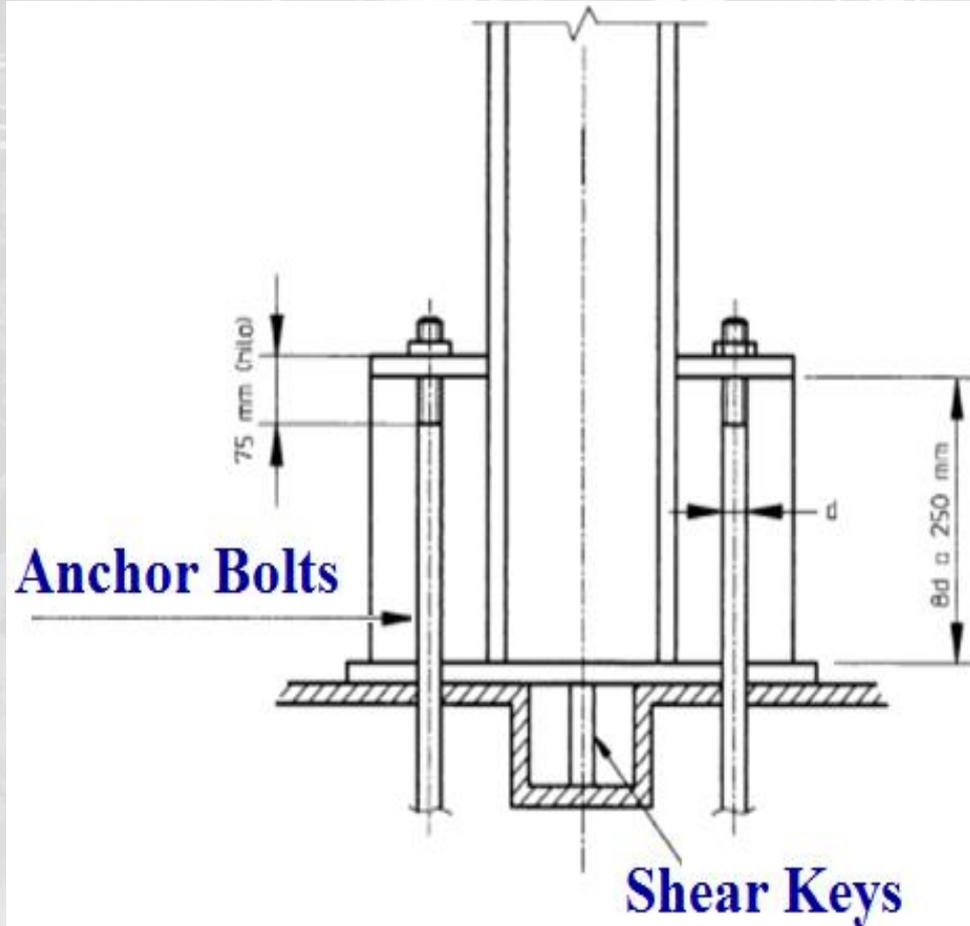
Análisis Sísmico

Análisis Especiales:

El uso de otras metodologías de análisis quedará restringido a verificaciones particulares y debe ser aprobado por el Revisor Sísmico.

- **Análisis Espectrales**
- **Análisis Tiempo Historia (Registros Sísmicos)**

Dispositivos de Traspaso de Fuerzas Sísmicas





Comportamiento Sísmico en Interior de Cavernas

Efectos Sísmicos



**Reducciones de aceleraciones del orden de 30%
(superficie) a los 60m de profundidad.**

Motivación

Proyecto

Andina Fase II

Nuevo Nivel Mina

**Mina Chuquicamata
Subterránea**

Túneles

50km

2 x 9km

1.020km al año 2060

**“1.200 km de túneles en
los próximos 5 años
(Codelco)”**



Instalaciones en Cavernas

Estructuras metálicas

Áreas de chancado: primario-secundario

Correas transportadoras

Molinos

Plantas de hormigón

Salas eléctricas

Sistemas de soportes de cañerías

**Barrios cívicos: casinos, comedores,
habitaciones**

Diseño actual en Cavernas

- **En Chile, no existe una norma que aborde el comportamiento de infraestructuras subterráneas.**
- **Diseños se realizan con NCh2369.Of2003.**
- **Uso de registros y espectros en superficie.**
- **Consideran efectos dinámicos de superficie y de sitio.**

Certificaciones

NORMA CHILENA OFICIAL *NCh* 2369.Of2003

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION • INN-CHILE

Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales

Earthquake-resistant design of industrial structures and facilities

Primera edición : 2003

Descriptor: diseño estructural, diseño sísmico, industrial, instalaciones industriales, requisitos

CIN 91.080.01

COPYRIGHT © 2003 : INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION - INN * Prohibida reproducción y venta *
Dirección : Matías Cousiño N° 64, 6° Piso, Santiago, Chile
Web : www.inn.cl
Miembro de : ISO (International Organization for Standardization) • COPANT (Comisión Panamericana de Normas Técnicas)

- Coordinador subcomité de Estanques, Chimeneas Industriales y Recipientes de Proceso
- Autor Capítulos: Estanques de acero, estanques elevados, tolvas y silos

Certificaciones

Revisor Sísmico Codelco


CODELCO
Orgullo de Todos

Corporación Nacional del Cobre de Chile
Vicepresidencia Corporativa de Proyectos
Avda. Lib. B. O'Higgins #1449, Torre 2 piso 9.
Santiago, Chile
www.codelco.com (56 - 2) 690 3000

VP-GIC-MD-CAR-005
Santiago, 13 de abril de 2016

Señores
PPN Ingeniería
Presente.

Ref.: Confirmación de Patricio Pineda Nalli como Revisor Sísmico para Proyectos de Codelco.

Estimado señores:

Mediante la presente carta y en mi calidad de Director Técnico de Diseño Civil Estructural de la Vicepresidencia de Proyectos de Codelco, confirmamos que el Sr. Patricio Pineda N. puede actuar como revisor sísmico en los proyectos de Codelco.

Sin otro particular saluda atentamente a usted,


Alejandro Espinoza C.
Gerencia de Ingeniería y Constructibilidad
Vicepresidencia de Proyectos
CODELCO-Chile

c. c.: Gustavo Soto L.
Carlos Droguett M.
Archivo.

Casa Matriz | Chuquibambilla | Radomiro Tomic | Ministro Hales | Salvador | Ventanas | Andina | El Teniente | VP

Comité Técnico de Minería e Industrias



Procedimientos de Diseño para Minería e Industrias

Publicaciones: Seismic Backward Analysis

Pineda, P. & Saragoni, G.R., “Analysis of Steel Tanks in Chile Subduction Earthquakes”. 16th World Conference on Earthquake Engineering, 16WCEE 2017. Santiago, Chile, 9th to 13th 2017. Expositor.

Pineda, P. & Saragoni, G.R., “Backward Seismic Analysis of Steel Tanks”. Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas, 8th International Conference STESSA 2015. Shanghai. Expositor.

Pineda, P., Herrera, J., “Comportamiento sísmico de instalaciones en el interior de cavernas”. XI Congreso Chileno de Sismología en Ingeniería Sísmica, 2015. Expositor.

Pineda, P., Saragoni, G.R. & E. Arze L. †, “Performance of Steel Tanks in Chile 2010 and 1985 Earthquakes”. Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas, 7th International Conference STESSA 2012. Santiago. Expositor.

INFORMACIÓN DE CONTACTO

Patricio Pineda Nalli
Consultor en Ingeniería Sísmica
M.Sc. Universidad de Chile

(+569) 7377 7963

patricio.pineda@ppningenieria.com

patricio.pineda@ppning.com

ppinedan@gmail.com

www.ppning.com