

MITIGACION DE RIESGO SISMICO EN REFINERIAS DE PETROLEO

Ing. Eduardo Tano
SicTec S.A.

Ing. Manuel Fernández
SicTec S.A.

ABSTRACT

Importantes refinerías de petróleo quedan situadas en zonas sísmicamente activas y sus componentes –construcciones y equipos– deben ser diseñados para resistir el evento dinámico con un nivel de seguridad compatible con el de los estándares de aplicación en las plantas de proceso. Esto resulta una tarea difícil, por las incertidumbres que aun existen sobre la determinación de las acciones sísmicas de diseño y la complejidad de la respuesta dinámica de los distintos componentes.

La práctica habitual de adoptar las especificaciones de los reglamentos de construcciones civiles sismo resistentes para el diseño de los componentes de refinerías de petróleo, ha conducido a que en la actualidad contemos con plantas sísmicamente subdimensionadas, debido principalmente a las simplificaciones y a los amplios márgenes de admisibilidad de daño de tales reglamentos.

La importancia intrínseca de los componentes de las plantas de proceso y las graves consecuencias del impacto socioeconómico y ambiental derivado de su falla, justifica el desarrollo de los estudios más sofisticados para conferir a los mismos un nivel de seguridad sísmica adecuado, ya sea durante el diseño de nuevas refinerías o en la adecuación sísmica de refinerías existentes. Para ello se debe analizar el origen y grado de riesgo sísmico, los criterios de diseño y admisibilidad de daño en función de la criticidad del componente y los métodos de análisis que deben ser aplicados.

1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno sísmico está presente en vastas zonas de la superficie terrestre. Los sismos se originan al desplazarse relativamente placas tectónicas adyacentes, a lo largo de superficies denominadas “fallas”. Sus efectos superficiales se caracterizan por la rápida vibración del suelo, principalmente en dirección horizontal. La extensión afectada y la intensidad del efecto varían con la distancia al punto de generación (“hipocentro”), el tamaño de la falla y las condiciones geológicas del medio de transmisión de las ondas vibrantes.

Importantes plantas de proceso quedan situadas en zonas sísmicamente activas y sus componentes – construcciones y equipos – deben ser diseñados para resistir el evento dinámico. Esto resulta dificultoso, por las incertidumbres en las acciones sísmicas de diseño y la complejidad de la respuesta dinámica de los componentes.

Los Códigos de diseño sismo-resistente intentan facilitar la tarea introduciendo importantes simplificaciones, orientadas eminentemente a construcciones “tipo edificios” de determinados materiales y tipos estructurales. Estos Códigos adoptan amplios criterios de admisibilidad de daños, establecidos para construcciones civiles generales, y son periódicamente revisados con los nuevos datos disponibles: la telemedición global de sismos y el análisis de sus consecuencias, han conducido a que las exigencias de los Códigos se hayan triplicado en los últimos 30 años.

La práctica usual de aplicar Códigos civiles de diseño sismo-resistente al proyecto de refinerías ha derivado en que actualmente encontremos plantas sísmicamente subdimensionadas, ya que han sido diseñadas para acciones sísmicas insuficientes, con criterios de aceptación de daños inadecuados y con métodos simplificados ajenos al tipo de estructuras y materiales empleados. Estas falencias no se presentan en otras industrias, como la nuclear, en las que se han desarrollado Códigos específicos.

En este trabajo se aborda el problema del diseño sismo-resistente de nuevas plantas y de la adecuación de las existentes a niveles de seguridad sísmica compatibles con los estándares de aplicación en la industria de procesos petroquímicos. Para ello, se estudia la magnitud de las acciones

sísmicas de diseño, los criterios de admisibilidad de daños y la metodología de análisis que deben ser adoptados en estos casos. Se describe también el método de evaluación de riesgo sísmico de plantas existentes, paso previo al proceso de mitigación del riesgo, y el desarrollo de soluciones típicas. Finalmente, se presenta el programa plurianual de adecuación sísmica que se encuentra en desarrollo en CILC, Repsol-YPF, como ejemplo de aplicación del proceso descrito.

2. EL FENÓMENO SISMICO

2.1. Origen de los sismos

Los sismos provienen de distintas fuentes, naturales o inducidas por el hombre, incluyendo entre otras: impactos de meteoros, actividad volcánica, explosiones nucleares subterráneas y cambios en los estados tensionales de las rocas inducidos por el llenado de grandes reservorios. Sin embargo, la gran mayoría de los terremotos destructivos se originan en – o cerca de – los bordes de las placas tectónicas que conforman la corteza terrestre, debido a deformaciones relativas entre las mismas.

La *corteza* o *litosfera* es la capa superior del planeta. Posee un espesor que varía entre 5 y 70 km y se considera conformada por una serie de placas tectónicas, que se mueven relativamente a baja velocidad sobre el *manto superior* subyacente, parcialmente fundido.

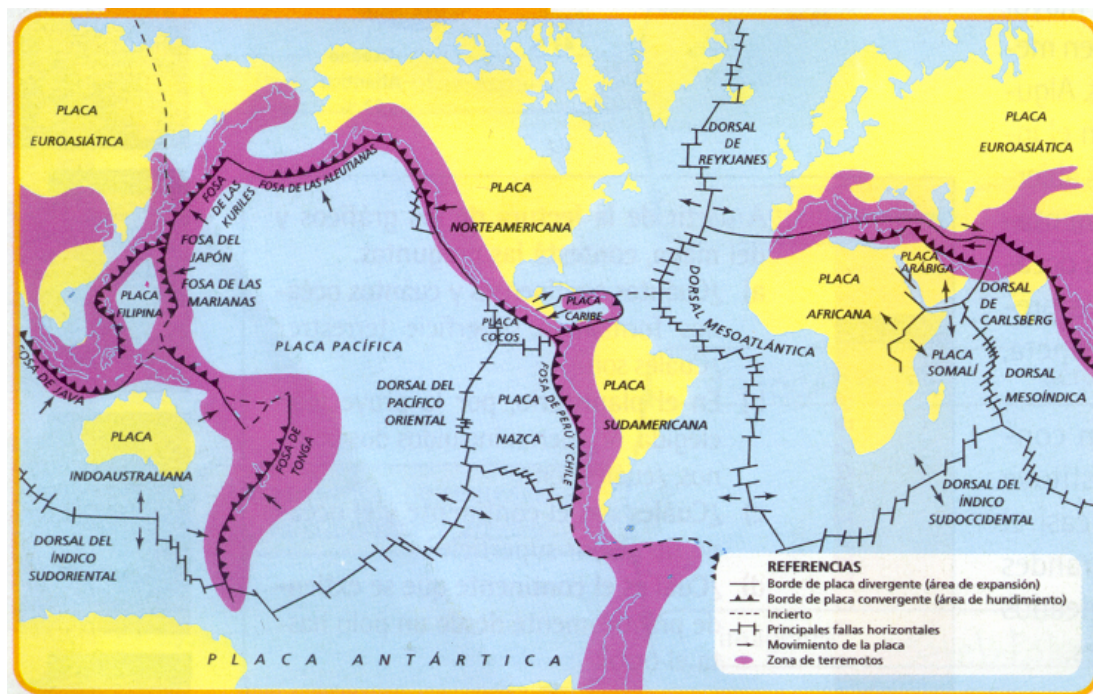


Figura 1: Placas Tectónicas - Deriva

El material fundido asciende en las cordilleras oceánicas y se solidifica, generando nueva corteza y haciendo que las placas diverjan desde estas zonas. Este crecimiento de la corteza, se compensa por la destrucción de una cantidad de material equivalente, allí donde las placas convergen y se hunden en el manto. Estas zonas están asociadas a fosas oceánicas, volcanes y terremotos y se denominan *zonas de subducción*.

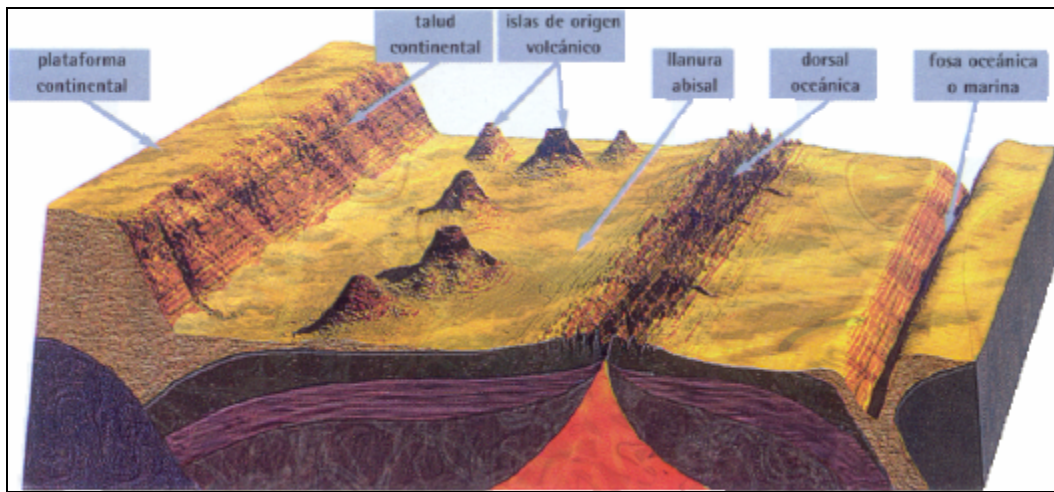


Figura 2: Generación de corteza terrestre

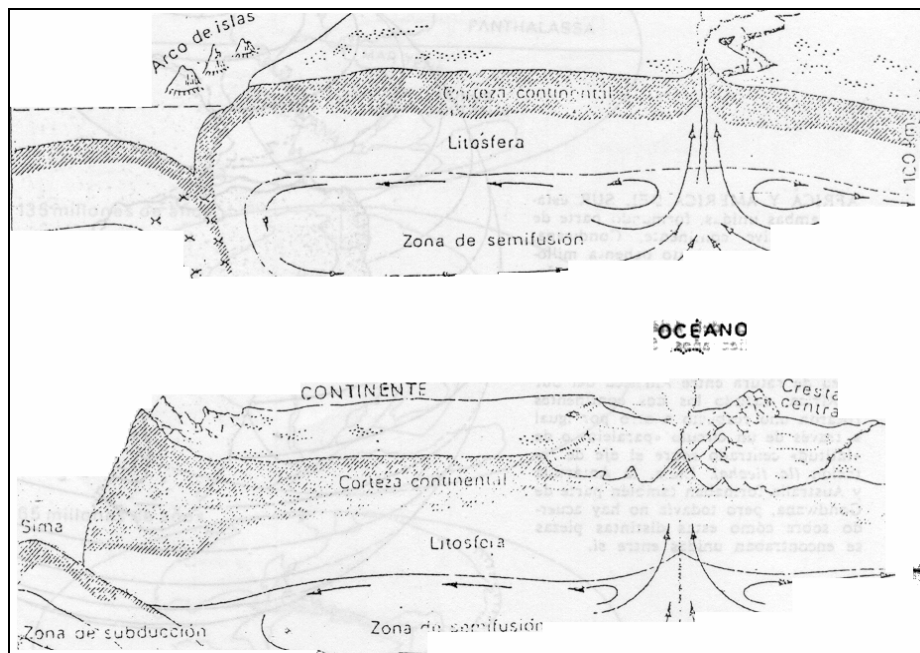


Figura 3: Mecanismo de generación y destrucción de corteza terrestre

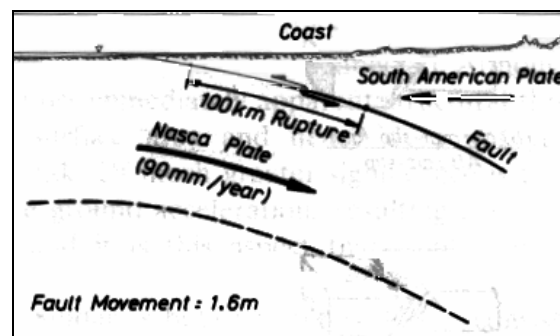


Figura 4: Subducción de la Placa Nazca bajo la Placa Sudamericana

Debido a la naturaleza rugosa de la interfase entre placas adyacentes, su desplazamiento relativo se desarrolla en forma discontinua e irregular. La deformación relativa es resistida por fricción en la superficie de contacto rugosa, induciendo tensiones cortantes en las placas adyacentes. Cuando estas

tensiones exceden la capacidad de fricción de la interfase, o la resistencia mecánica de los materiales inherentes, las caras de la interfase deslizan entre sí, liberando la energía de deformación almacenada en las rocas vecinas en forma de ondas de choque que se propagan a través del medio rocoso a una determinada velocidad.

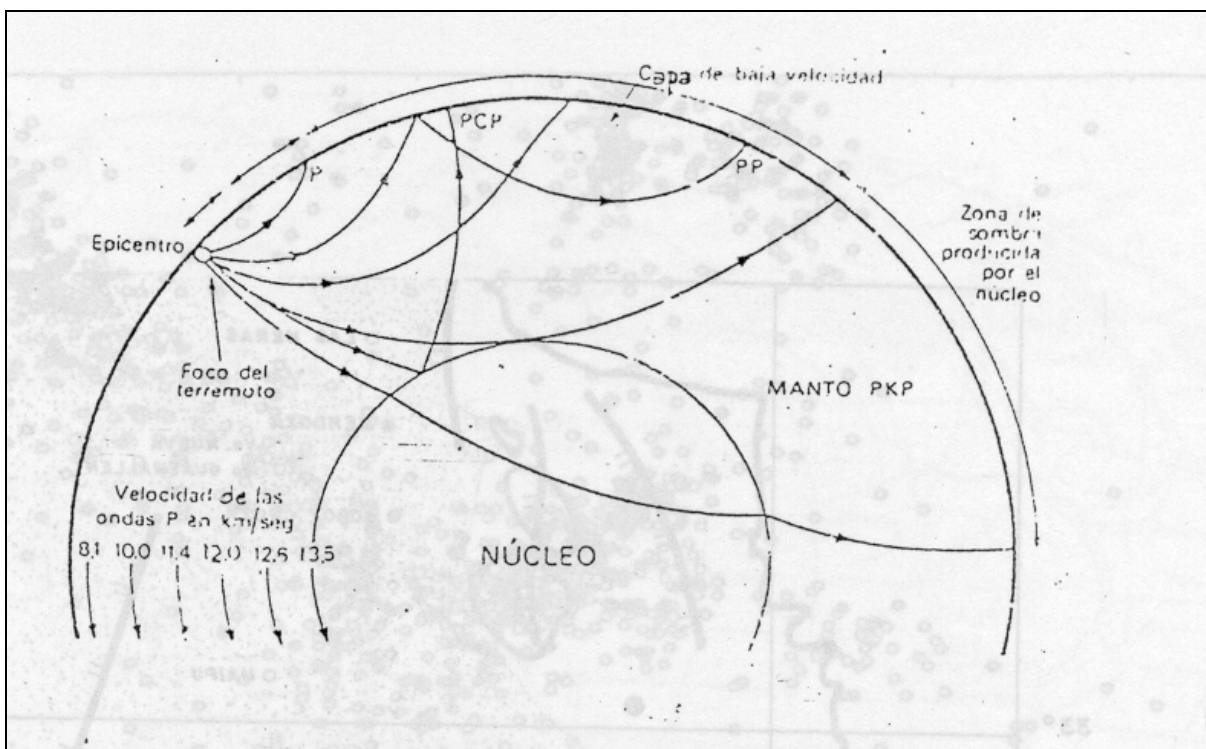


Figura 5: Transmisión de ondas sísmicas

Las deformaciones relativas en los bordes de las placas pueden alcanzar varios metros antes de que se produzca el deslizamiento, dando lugar a importantes desplazamientos relativos de la superficie terrestre una vez producido el mismo. Estos desplazamientos relativos, que pueden ser horizontales o verticales, se conocen como “*trazas de la falla*” y constituyen expresiones físicas de la actividad sísmica de una zona dada.

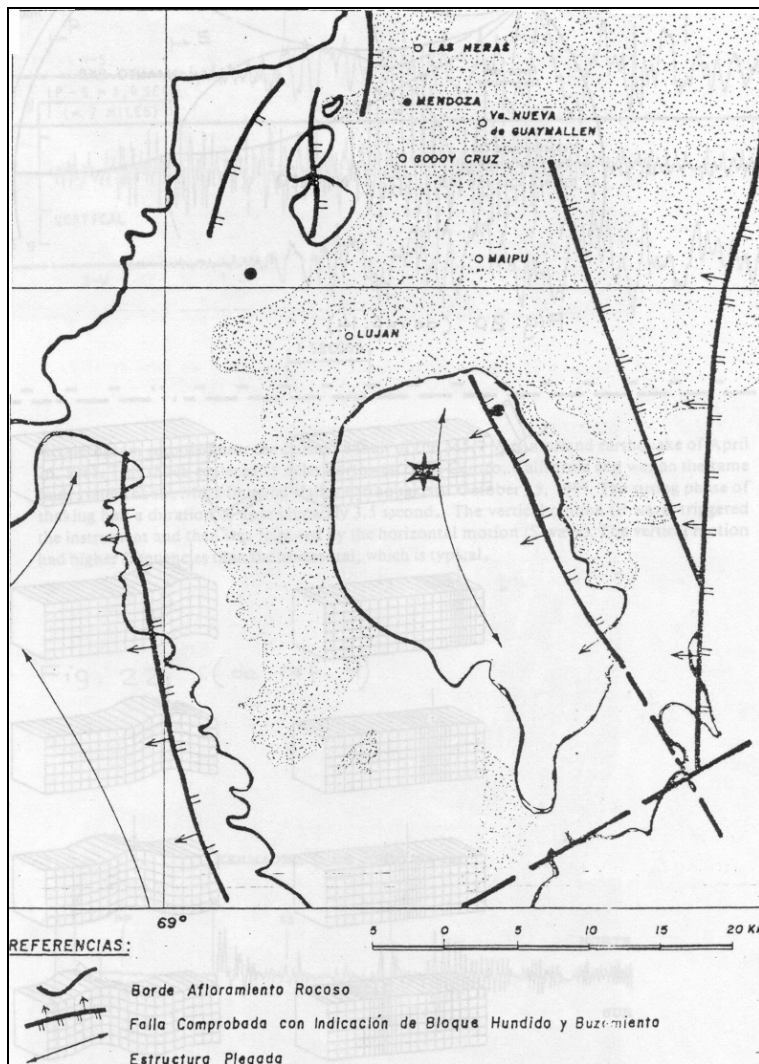


Figura 6: Fallas en las cercanías del CILC Repsol, Luján de Cuyo, Mendoza

Según el modo en el que los bordes de las placas deslizan relativamente, el movimiento se denomina de deslizamiento lateral (“strike-slip fault”), de deslizamiento normal o de tensión (“normal slip fault”) y de deslizamiento revertido o de empuje o subducción (“reverse slip fault”).

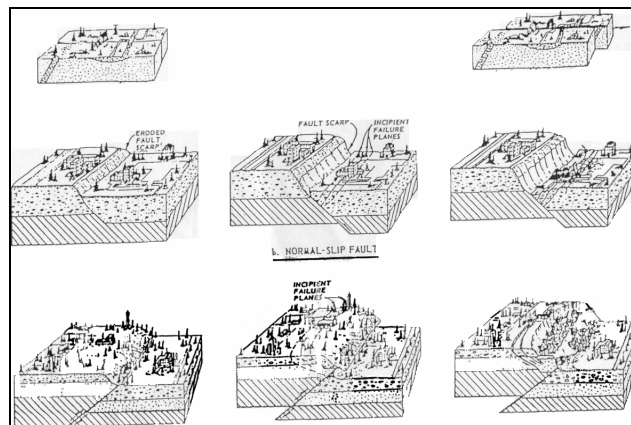


Figura 7: Mecanismos de deslizamiento de bordes de placas tectónicas

2.2. Medición del fenómeno sísmico

Existen diferentes modos de medir el fenómeno sísmico. Inicialmente, a falta de instrumental de medición, se emplearon escalas subjetivas. Entre ellas la más difundida es la Escala Mercalli Modificada (MM) que data de 1902 y asigna una *Intensidad* a un evento dado en función de una evaluación de la observación de sus efectos, entre un valor de “I” para sismos casi imperceptibles a un valor de “XII” para sismos totalmente destructivos.

Con la aparición de instrumentos capaces de registrar los máximos desplazamientos de un punto de la superficie terrestre, denominados *sismógrafos*, a mediados del siglo pasado se comenzó a medir los eventos sísmicos adoptando escalas cuantitativas. Así, la escala de Richter asigna una *magnitud* M a un evento en función del máximo registro de desplazamiento de un sismógrafo patrón (sismógrafo de Wood-Anderson) y existen relaciones empíricas entre la magnitud M asignada al evento y la energía E liberada:

$$\log_{10} E_{(\text{erg})} = 11.4 + 1.5 M$$

Sismos de magnitud inferior a M5 raramente causan algún daño. En el rango M5 a M6 pueden causar daños en las cercanías de la falla, unos 100km² (Mendoza 1985, M5.7). Para magnitudes M6 a M7, el área de daño potencial es de unos 2.000 km² (San Fernando 1971, Northridge 1994), mientras que para M7 a M8 puede extenderse a 10.000 km² (Caucete 1977, China 1976, Chile 1985, Perú 1970) y para M8+ se diseminan daños severos sobre unos 100.000 km² (Chile 1960, Alaska 1964, México 1985).

Las mediciones más modernas – y precisas – consideran los factores físicos de la falla, como el módulo de rigidez de la roca μ , el área de ruptura A y el desplazamiento promedio de la falla D, reunidos en conceptos tales como el *momento sísmico* MW:

$$MW = \mu \cdot A \cdot D$$

El sismo de mayor *momento sísmico* registrado es el de Chile 1960, con casi 1.000 km de longitud de falla y MW 9.9 .

En la actualidad, organizaciones como la USGS (U.S. Geological Survey) mantienen una amplia red de telemedición y registro permanente de sismos, extendida sobre todo el planeta. Los datos acumulados han permitido comprender mejor no solo las características de los movimientos sísmicos, sino también sus efectos sobre los distintos componentes estructurales que deben resistirlos.

2.3. Consecuencias del sismo

Aunque la dislocación física de la superficie terrestre aparece como el principal temor, ésta afecta solo a áreas muy reducidas y por lo tanto no constituye un riesgo sísmico importante. De mucho mayor importancia son las aceleraciones de la superficie terrestre debidas a la energía liberada durante el deslizamiento de la falla y las respuestas dinámicas inducidas sobre los componentes asentados en ella. Esto es lo que nos interesa básicamente en el diseño sismorresistente de los componentes de una refinería de petróleo.

La zona de rotura, desde donde se emite la energía de movimiento, puede alcanzar varios cientos de kilómetros cuadrados en sismos grandes. Se denomina *hipocentro*. El punto ubicado directamente sobre éste en la corteza terrestre es el *epicentro* y su profundidad la *profundidad focal*. La distancia de un punto cualquiera de la superficie terrestre al hipocentro se denomina *distancia focal*.

La energía liberada desde el hipocentro se propaga a través del cuerpo del planeta mediante ondas primarias o de compresión “P” y secundarias o de corte “S”, de diferentes velocidades. Al llegar a la superficie, estas ondas se reflejan; pero también generan ondas superficiales tipo “R” y “L”.

Cuando este tren de ondas alcanza un determinado punto de la superficie terrestre, el resultado es una rápida y más o menos larga vibración del suelo, principalmente en dirección horizontal. La intensidad y duración de la vibración dependerá del tamaño del sismo, de la distancia focal y de las condiciones geológicas y geográficas del medio de transmisión de las ondas.

Las aceleraciones del terreno durante el fenómeno vibratorio, son registradas en forma óptica o digital mediante *acelerógrafos*. Los registros de estos instrumentos, denominados *acelerogramas*, muestran la historia de la variación de las aceleraciones del suelo, generalmente en dos direcciones horizontales perpendiculares (NS y EO) y una vertical.

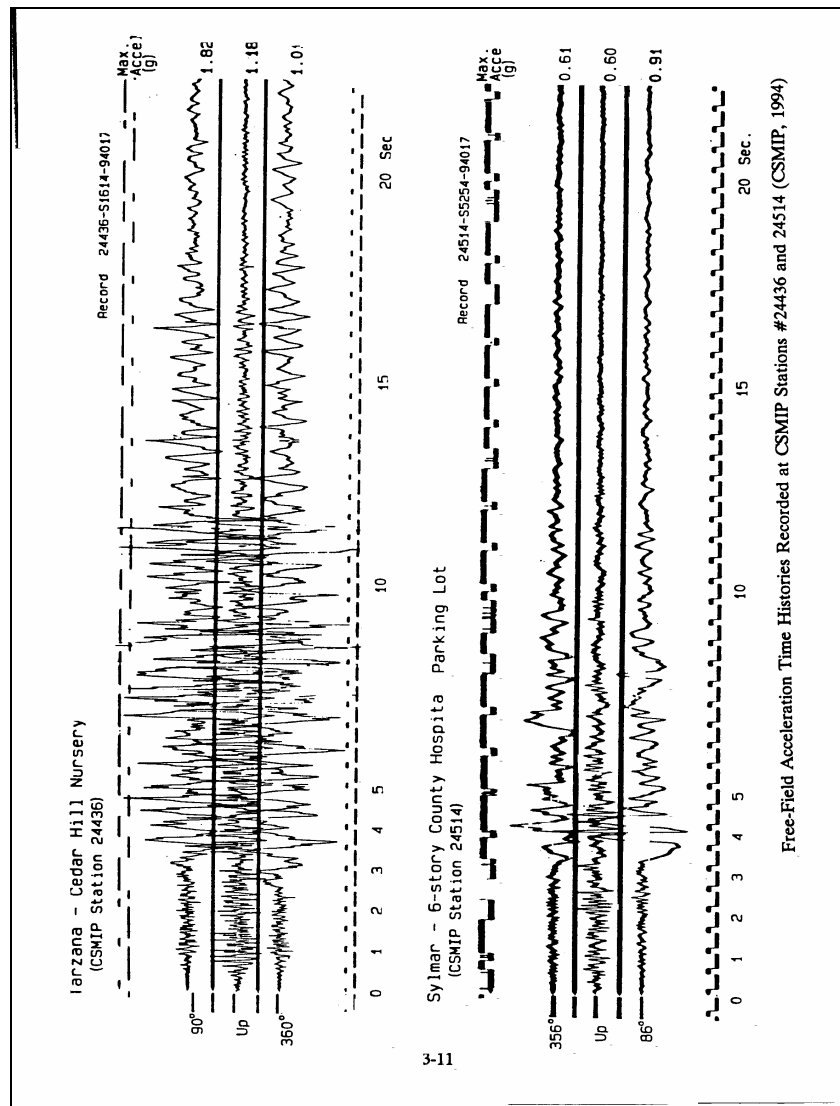


Figura 8: Acelerogramas terremoto Northridge 1994

La información provista por los acelerogramas de grandes terremotos, disponible desde hace solo unos 50 años, constituye nuestro mejor conocimiento de la acción sísmica sobre las estructuras y ha permitido una profunda revisión y mejora de la metodología de diseño de los componentes que deben resistirla. Esta información nos permite estimar tres de los factores determinantes del *potencial destructivo* de un sismo: la *aceleración máxima del suelo* (PGA), el *contenido de frecuencias* de la vibración y su *duración*. Como ejemplo, citemos que los valores de aceleración máxima del suelo han alcanzado registros de hasta 180%g (Northridge 1994) y las duraciones han superado los 70 segundos (Chile 1985, México 1985).

A medida que nos alejamos del epicentro, la aceleración máxima del terreno se reduce y la vibración se va tornando más compleja y extensa. Esto es debido a que la energía se difunde en un volumen cada vez mayor, al amortiguamiento del medio transmisor y a la reflexión de ondas en las

interfaces entre capas de distintos materiales. De este modo, el riesgo de un cierto sitio de soportar un sismo severo se reducirá con su distancia a la o las fallas que puedan liberar la energía.

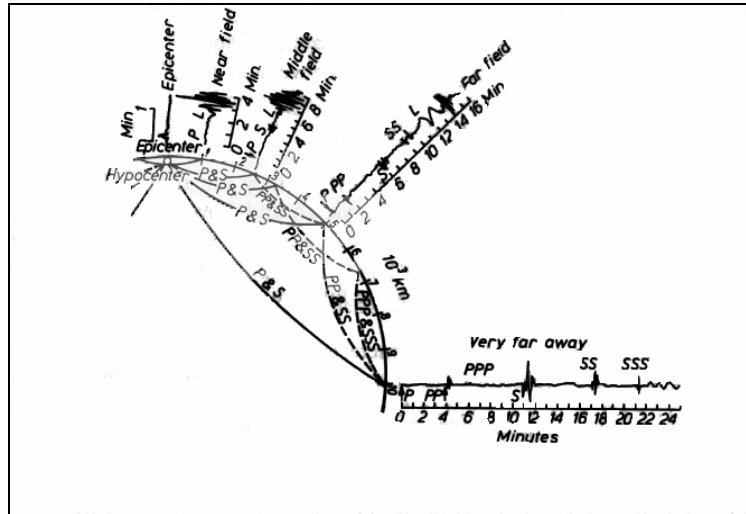


Figura 9: Propagación de ondas sísmicas y patrones de aceleración del suelo

Existen relaciones empíricas, llamadas *leyes de atenuación*, que nos permiten estimar la aceleración máxima horizontal del suelo para una magnitud Richter de sismo M y una distancia epicentral Re , de la forma:

- $a_0 \text{ (cm/s}^2\text{)} = 5829 \cdot e^{0.8 M} (Re_{(km)} + 40)^{-2}$ (Esteva & Villaverde, NZS 3101 Part 1)
- $a_0 \text{ (cm/s}^2\text{)} = 2300 \cdot e^{0.71 M} (Re_{(km)} - 40)^{-1.6}$ (Saragoni et al., 1982, modificada)

Como ejemplo vemos que en la segunda ecuación, para $Re=100\text{km}$, sismos $M6$, $M7$ y $M8$ producirán aceleraciones de 24%, 48% y 98% respectivamente y para $Re=250\text{km}$, 3%, 7% y 13% respectivamente.

Cabe acotar que las expresiones de este tipo que han sido desarrolladas hasta el presente, permanecen en constante revisión y poseen marcada influencia regional. Por ello, no son totalmente aceptadas por la mayoría de los especialistas.

2.4.El sismo de diseño

Los distintos componentes de las refinerías de petróleo deben ser diseñados para resistir un determinado nivel de vibración del suelo sobre el que están fundados. A los fines del diseño, es necesario definir el potencial destructivo del sismo que debe ser resistido. Como ya se había acotado, lo anterior implica conocer, al menos:

- la aceleración máxima del suelo
- el contenido de frecuencias de la vibración
- la duración de la fase de mayores aceleraciones del evento

Para adoptar un valor de aceleración máxima del suelo, se necesita disponer de una adecuada ley de atenuación y de un relevamiento de fallas cercanas potencialmente activas. También es necesario conocer los datos locales de sismicidad histórica, que nos permitan estimar las tasas de recurrencia de sismos de distinta magnitud. Con respecto al contenido de frecuencias y duración de un sismo de diseño, son mucho más difíciles de prever.

ESTUDIOS GEOLOGICOS:

- Análisis de las condiciones geológicas locales
- Evaluación de fallas potenciales
- Identificación de riesgos adicionales: licuefacción, deslizamientos, hundimientos

SISMICIDAD HISTORICA:

- Identificación de fuentes sismogénicas locales
- Estimación de tasas de sismicidad de sismos de diferentes magnitud

Relación de Guttenberg-Richter:

$$\log N = a - b \cdot M$$

N: tasa de sismicidad (sismos > M / año)

M: magnitud del sismo (expresado como M o MW)

Fuente / Formación	Max Mw	a	b
Cordillera Principal	7.3	4.85	1.00
Precordillera	7.6	3.54	0.78
Cinturón de empuje Cuyo	6.8	2.37	0.64
Sierras pampeanas	7.5	4.00	0.80
Subducción entre placas	8.5	3.85	0.65
Subducción intra placa	7.5	5.40	1.00

Ejemplo:

Tasa de sismicidad para sismos M 7.5:

Fuente: Subducción intra placa:

N = 0.008 / año → Periodo recurrencia: 126 años

LEYES DE ATENUACIÓN:

$M_{(N)} \rightarrow a_0$: aceleración max. suelo

Ejemplos:

$$a_0 \text{ (cm/s}^2\text{)} = 5829 \cdot e^{0.8 M} (R_{e(km)} + 40)^{-2}$$

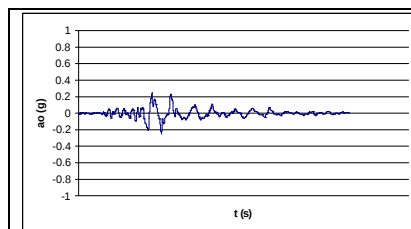
$$a_0 \text{ (cm/s}^2\text{)} = 2300 \cdot e^{0.71 M} (R_{e(km)} - 40)^{-1.6}$$

DEFINICION DE ESTADOS LIMITE DE DISEÑO:

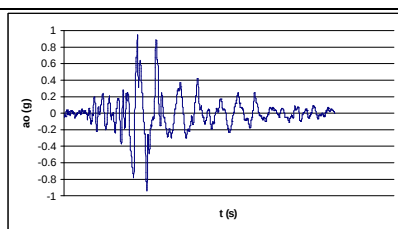
Ejemplo: Construcciones civiles – Ley de atenuación: $a_0 \text{ (cm/s}^2\text{)} = 2300 \cdot e^{0.71 M} (R_{e(km)} - 40)^{-1.6}$

Estado Límite	Tasa de sismicidad	Periodo recurrencia	Magnitud	Acel. max. $R_e=100\text{km}$
	N (sismos/año)	T (años)	M	a_0 (%g) - (Ley atenuación)
Servicio	0.02	50	5.6	18
Control de daños	0.002	500	7.5	69
Supervivencia	0.0002	5000	8.5	140

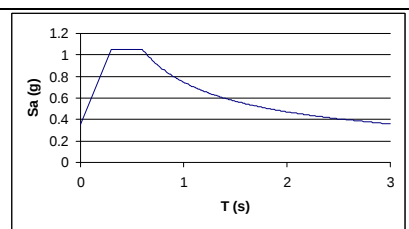
ACCION SISMICA DE DISEÑO:



Acelerograma típico



Acelerograma escalado al valor a_0



Espectro de diseño lineal

La determinación de la acción sísmica de diseño es un proceso complejo y en el que persisten incertidumbres. Los reglamentos de aplicación, generalmente originados en el campo de la ingeniería civil, adoptan ciertas simplificaciones para superar el problema, entre ellas destacamos las siguientes:

- con los datos de sismicidad histórica, se adoptan magnitudes de diseño correspondientes a ciertos *estados límite de diseño*, del tipo: *estado límite de servicio* (magnitud correspondiente a una tasa de recurrencia $p \cong 0.02/\text{año}$), *estado límite de control de daños* ($p \cong 0.002/\text{año}$) y *estado límite de supervivencia* ($p \cong 0.0002/\text{año}$)
- adoptando algunas leyes de atenuación y relativizando la influencia local de la distancia epicentral, se determinan las correspondientes aceleraciones máximas del suelo
- considerando el contenido de frecuencias y las duraciones de sismos análogos a los que se esperan en la zona, obtenidos de acelerogramas convenientemente seleccionados escalados a las aceleraciones máximas del suelo adoptadas, se determina la máxima respuesta de una serie de osciladores lineales de un grado de libertad de diferentes frecuencias propias (*espectro de diseño lineal*)
- se asimila la respuesta de las estructuras a la de un oscilador lineal de un grado de libertad de cierta frecuencia y se las diseña para la máxima respuesta sísmica del mismo, aun cuando se reconoce la profunda diferencia de comportamiento entre el oscilador lineal y la estructura real (fuertemente no lineal en la gran mayoría de los casos)

Nótese las importantes simplificaciones introducidas y las diferencias entre la acción real del sismo y las acciones reglamentarias utilizadas en el diseño.

3. DISEÑO SISMO RESISTENTE DE PLANTAS DE PROCESO

3.1. Datos para el diseño

La respuesta dinámica de los componentes de una planta a la acción sísmica depende de varios factores, entre ellos se destacan:

- las características propias de la acción sísmica local: su intensidad, contenido de frecuencias y duración
- las propiedades mecánicas del componente: características rehológicas de los materiales resistentes, distribución de rigidez y resistencia estructurales
- la distribución de masas vibrantes del componente, incluyendo su propia masa, la masa debida a su uso u operación y las masas que accidentalmente pudiesen estar vinculadas al mismo durante el evento sísmico.

En el caso de los componentes de refinerías de petróleo, es posible definir con suficiente precisión tanto sus propiedades mecánicas como la distribución de masas. Sin embargo, las incertidumbres referidas anteriormente respecto de la determinación de la acción sísmica de diseño se mantienen y en ocasiones se incrementan, debido a que las plantas de proceso suelen ubicarse en localidades alejadas de centros poblados, con menor información sísmica.

La importancia intrínseca de los componentes de las plantas de proceso y las graves consecuencias del impacto socioeconómico y ambiental derivado de su falla, justifica el desarrollo de detallados estudios geológicos y sismológicos destinados a acotar la acción sísmica de diseño con la mayor precisión posible. Los resultados de tal estudio se presentan generalmente como espectros de diseño lineales para sismos de distintas tasas de recurrencia.

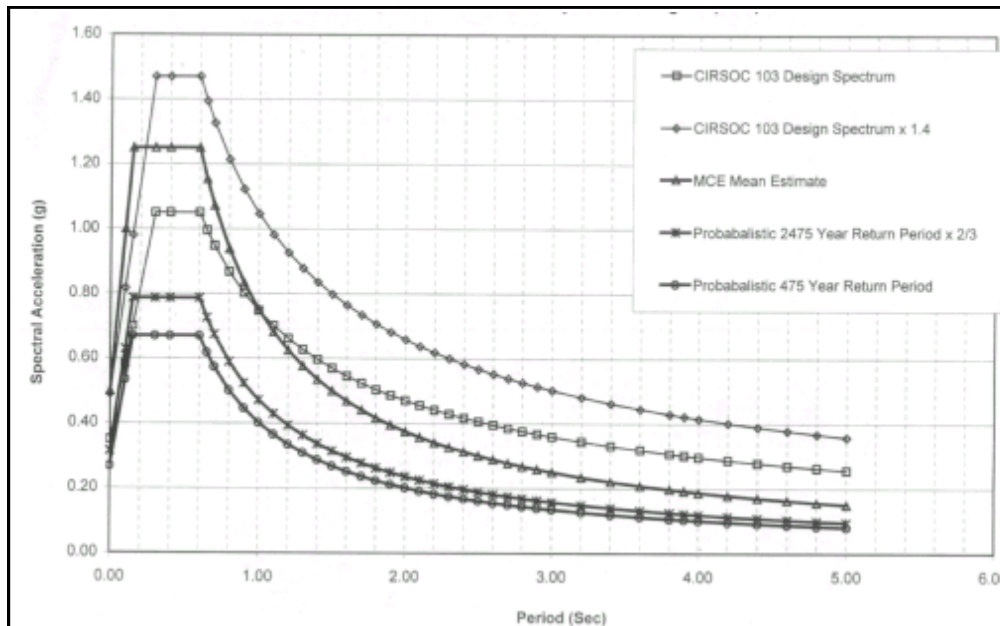


Figura 10: Espectros de diseño lineales para sismos de distintas tasas de recurrencia

Cabe acotar que en ocasiones estos resultados no son suficientes para asegurar un diseño y se hace necesario contar con datos más precisos, como un *acelerograma de diseño* – o un conjunto de ellos –. Esto ocurre en aquellos casos en que la respuesta estructural es compleja y difiere de la del oscilador lineal de un grado de libertad adoptado en la generación del espectro de diseño lineal.

3.2. Límites de diseño de componentes de plantas de proceso

En toda planta de proceso existen componentes cuya falla posee consecuencias de mayor o menor riesgo para el proceso, la seguridad de las personas y el ambiente. Así, lo primero que debemos conocer es la *criticidad* del equipo o conjunto de equipos cuya seguridad sísmica se está verificando.

Para determinar la criticidad de un equipo, se debe considerar al menos los siguientes factores:

- consecuencias de su falla sobre la seguridad de las personas y el medio ambiente
- consecuencias de su falla sobre la continuidad de operaciones críticas del proceso
- necesidad de contar con el componente en los momentos posteriores al terremoto
- consideraciones económicas sobre costos de reposición de componentes y lucros cesantes

Generalmente, se acostumbra a asignar a cada componente una valoración cualitativa de criticidad, en una escala de 3 a 4 niveles o grados (C1 a C4). En función de esta evaluación, deben definirse los *estados límite de diseño* a adoptar en el diseño sísmo resistente de los componentes asociados a sismos de distinta probabilidad de ocurrencia:

CRITICIDAD Y ESTADOS LÍMITE DE DISEÑO DE COMPONENTES DE PLANTAS DE PROCESO						
Nom	Criticidad	Consecuencias de la falla		Sismo de diseño		
		Seguridad y de Operación	Económicas	AF	MF	BF
C1	Baja	Sin riesgo humano o ambiental ni compromiso operativo	Costo de reposición muy reducido. No generan lucros cesantes	Sin daños	Reparable	Sobrevive
C2	Media	Sin riesgo humano ni ambiental y con bajo compromiso operativo	Costo reposición muy superior a costo protec. sismo resistente	Sin daños	Reparable	Reparable
C3	Alta	Alto riesgo operativo. Riesgos humanos o de contaminación menores.	Reposición honerosa. Alto lucro cesante.	Sin daños	Sin daños	Reparable
C4	Muy Alta	Riesgo humano, liberación de sustancias letales y/o contaminantes. Necesidad operativa post sismo	Compromete la continuidad de la explotación	Sin daños	Sin daños	Sin daños

Notas: AF: Sismos frecuentes ($\cong 0.02/\text{año}$, periodo de recurrencia 50 años)
MF: Sismos de frecuencia media ($\cong 0.002/\text{año}$, periodo de recurrencia 500 años)
BF: Sismos de baja frecuencia ($\cong 0.0002/\text{año}$, periodo de recurrencia 5.000 años)

Una vez clasificado el componente a diseñar según su criticidad, utilizando una tabla semejante a la anterior, se definen los límites de diseño, admitiendo mayores niveles de daño para menores criticidades y sismos de menor frecuencia (más destructivos).

3.3. Tipología estructural del componente y metodología de diseño

Los métodos de diseño sismo resistente basados en la aplicación de espectros de diseño lineales son de aplicación generalizada en el diseño de estructuras “tipo edificio” situados en zonas sísmicas. El espectro elástico indica la máxima respuesta de estructuras de comportamiento lineal de un grado de libertad al sismo de diseño. En la medida que la tipología estructural del componente se aparte de este patrón, el método comienza a perder validez y el diseño es menos seguro.

Conscientes de estas diferencias, los diseñadores modernos de estructuras sismo resistentes, tienden a conferir a las mismas la capacidad necesaria para resistir el evento dinámico con independencia de las características y – hasta cierto grado – de la intensidad del mismo. Esto lo logran a través de una adecuada distribución de resistencias y de zonas de falla controlada a lo largo de la estructura, lo cual es factible gracias a la topología y conformación propias de las estructuras civiles “tipo edificio”. Esta posibilidad no siempre se encuentra en las estructuras resistentes de componentes de plantas de proceso.

En el caso de los componentes de plantas de proceso, dada su particular topología estructural y los límites de diseño adoptados, que deben admitir menores niveles de daño que los reglamentos civiles, no es posible extender las simplificaciones válidas para estructuras “tipo edificio” y se deben realizar análisis más rigurosos. En tales ocasiones, corresponde analizar la historia de la respuesta de la estructura al acelerograma de diseño, en un análisis dinámico que considere las verdaderas características mecánicas del componente (geometría, materiales, distribución de masas y rigideces, etc.). Las diferencias observadas entre estos resultados y los derivados de la aplicación del método simplificado son sustanciales.

La siguiente figura muestra la historia del esfuerzo axial en el anclaje de una torre fraccionadora obtenida de un análisis dinámico no lineal por elementos finitos del conjunto fundación – anclaje – torre. Se puede observar que el máximo esfuerzo, obtenido aproximadamente a los 14 seg de iniciado el terremoto alcanza el 83% de la capacidad última del anclaje y es un 40% y hasta un 70% mayor que

la estimada con los métodos reglamentarios simplificados (método “modal espectral” y “método estático”, respectivamente).

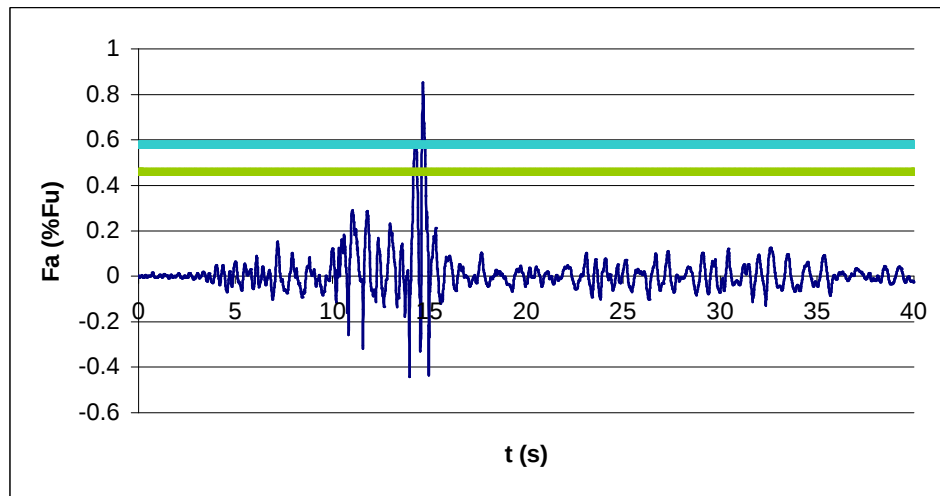


Figura 11: Historia de esfuerzo acial de un anclaje de torre fraccionadora – Sismo de diseño M7.5

Se puede observar que en casos como el anterior, no resulta seguro utilizar métodos simplificados en el diseño sismo resistente de componentes de plantas de proceso, debiéndose aplicar procedimientos de análisis más exactos, que permitan determinar la verdadera respuesta del componente a la acción del sismo.

4. PLANTAS EXISTENTES - PROGRAMA DE ADECUACION SISMICA DEL CILC

Numerosas plantas de proceso están situadas en zonas sísmicamente activas. La práctica habitual de diseño ha sido aplicar las previsiones de los códigos de construcciones civiles sismo resistentes, considerando sus mayores recaudos. Estos códigos adoptan amplios criterios de admisibilidad de daños, compatibles con el destino de construcciones civiles generales, y son periódicamente revisados a la luz de los nuevos datos disponibles. Los nuevos datos acerca de registros sísmicos obtenidos de las redes globales de telemedición y el aprendizaje logrado del análisis metódico de las consecuencias de sismos severos, ha conducido a que las exigencias de los códigos se hayan triplicado en los últimos treinta años.

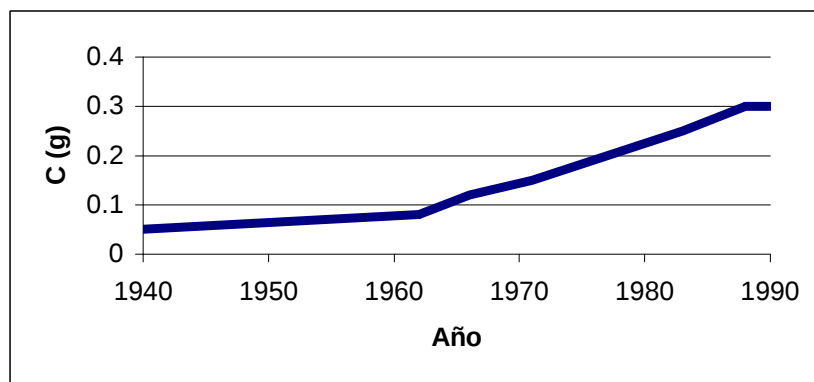


Figura 12: Variación de las acciones de diseño sísmico indicadas en los códigos civiles

Como resultado, encontramos en la actualidad plantas sísmicamente subdimensionadas, por los siguientes motivos:

- las plantas han sido diseñadas para acciones sísmicas reducidas, que no alcanzan a representar el potencial destructivo de los sismos que hoy se sabe actuarían sobre las mismas
- los diseños se han basado en códigos que admiten criterios de aceptación de daños incompatibles con los requisitos de seguridad de una planta de proceso
- el análisis de la respuesta de los componentes a las acciones dinámicas ha adoptado hipótesis simplificativas válidas para estructuras de materiales y tipología estructural muy diferente al común de los componentes de una planta de proceso.

En el caso de CILC, el Complejo cuenta con más de 20 unidades operativas y 100 tanques de almacenamiento, y ha sido integrado por diferentes etapas o ampliaciones:

Etapa	Año	Plantas	Diseñador	C (estimado)
1° Expansión	1942	Topping II	Desconocido	Sin previsión sísmica
2° Expansión	1962	Coque II, FCC I, Topping II	M.W. Kellog	Estructuras: 0.08 / 0.12 Equipos: 0.15
3° Expansión	1971	Crudo y Vacío, Platforming I, Unifining I, Gascon I, Isomax Hidrógeno, Aguas Ácidas I, Servicios Aux I, Planta Agua	Lummus	Idem anterior
4° Expansión	1986	Coque II, HDS, FCC II, Merox, Aguas Ácidas II, Servicios Aux II	Foster Wheeler	CIRSOC 103 o NAA 80 + Código Mendoza 1970 $0.07 < C < 0.30$
5° Expansión	1994	MTBE Unifining II	McKee del Plata IESA Montreal	CIRSOC 103; $\gamma_D = 1.4$ $0.09 < C < 0.75$
6° Expansión	1996	Isomerización, Alquilación	Foster Wheeler	Idem anterior + Diseño conservativo de estructuras modernas

Nota: C (coeficiente sísmico): Fuerza lateral equivalente al efecto sísmico como fracción de la masa del componente

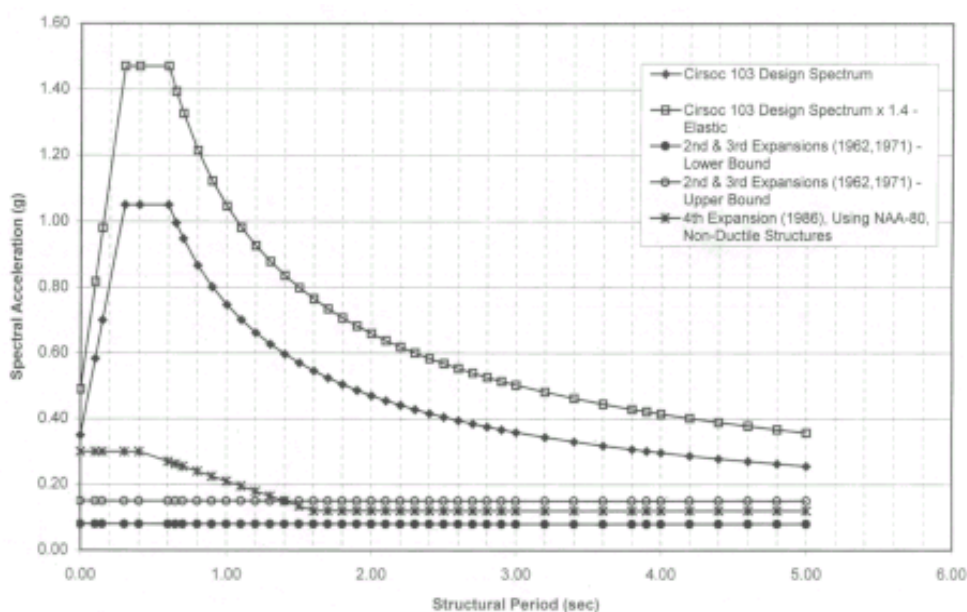


Figura 13: Comparación de espectros de diseño lineales de las distintas ampliaciones del CILC

Los datos anteriores revelaron la necesidad de desarrollar un *Programa de Adecuación Sísmica* de los distintos componentes de la Refinería. La mayor necesidad recaía, obviamente, sobre las construcciones más antiguas.

A fin de determinar un orden de prioridad para el proceso de adecuación, se desarrollaron dos tareas de evaluación paralelas y concurrentes:

- Evaluación estructural de los componentes existentes: categorizándolos con una calificación de V1 a V4 en orden decreciente de vulnerabilidad en su estado actual, en función del periodo de recurrencia del sismo que vulneraría al componente (250, 475, >475 años y máximo sismo esperado, respectivamente). Para ello, profesionales expertos realizaron recorridos de inspección a través de las plantas, asignando la categoría adecuada mediante distintos métodos de evaluación (observación, referencias, análisis).
- Determinación de criticidad del componente: Asignando la categoría C1 a los componentes considerados críticos, desde el punto de vista de las consecuencias de su falla para el proceso y la seguridad de las personas y el ambiente, y C2 para los menos críticos.

Una matriz de decisión permitió combinar ambas evaluaciones y obtener un orden de prioridad de adecuación:

CRITICIDAD	VULNERABILIDAD			
	V1	V2	V3	V4
	Periodo recurrencia < 250 años	Periodo recurrencia 250 – 475 Años	Periodo recurrencia 475 años – Máx. sismo esp	Periodo recurrencia > Máx. sismo esperable
C1 (Críticos)	R1 ++	R1	R2	OK
C2 (Menos críticos)	R1	R2	OK	OK

Nota: R1 indica la mayor prioridad, R2 la menor y OK los componentes que se consideran adecuados en su estado actual.

En el caso de CILC, tras la evaluación de más de 250 componente importantes, entre los que se incluyen distintos tipos de equipos de proceso (torres, acumuladores, intercambiadores, aerorefrigerantes, etc.), sus fundaciones y estructuras de soporte, parrales, tanques de almacenamiento y edificaciones, 120 componentes debieron ser analizados detalladamente y la mitad de ellos requirieron tareas de adecuación, las que se están desarrollando desde el año 2001 a la fecha.

La experiencia recogida indica que el mayor número de tareas de adecuación consiste en simples reparaciones de soportes, de pedestales de equipos y reposición de anclajes. El soporte lateral de líneas en parrales y el refuerzo de estos últimos ocupa también un lugar importante a nivel presupuestario. Las obras de mayor envergadura, como adecuación de fundaciones, modificaciones de sistemas de anclaje y refuerzo de estructuras de soporte de equipos elevados constituyen el ítem más gravoso, pero no es la generalidad de los casos.

En otras palabras, es posible reducir fuertemente el grado global de riesgo de las instalaciones anticipando tareas sencillas y poco costosas, evaluando y planificando las tareas de mayor envergadura en las etapas posteriores del plan de adecuación.

5. CONCLUSIONES

Si bien en el diseño de los componentes de las plantas de proceso se han tenido en cuenta las indicaciones de los códigos de construcciones civiles sísmo resistentes desde la aparición de los mismos – en los años 60 –, la capacidad sísmica de gran parte de las plantas existentes es insuficiente y debe ser revisada. En función de los resultados obtenidos, las plantas deben ser sometidas a procesos de adecuación de su seguridad sísmica que eleven su nivel al de los estándares de aplicación en plantas de proceso.

Dado el elevado periodo de recurrencia de los fenómenos sísmicos destructivos, existe una tendencia natural a olvidar la existencia latente de este riesgo y ocuparse del mismo solo en los periodos que siguen a las catástrofes. Esta tendencia debe ser revertida, desarrollando programas de adecuación sísmica de plantas debidamente concebidos y sostenidos en el tiempo.

En el diseño de las plantas nuevas, se debe tener precaución al aplicar las indicaciones de los códigos sísmo resistentes desarrollados para construcciones civiles. Los criterios de admisibilidad de daños y las simplificaciones que introducen, conducen muchas veces a diseños poco confiables, cuando se trata de componentes de plantas de proceso.

La importancia intrínseca de los componentes de las plantas de proceso y las graves consecuencias del impacto socioeconómico y ambiental derivado de su falla, justifica el desarrollo de los estudios más sofisticados para conferir a tales componentes un nivel de seguridad sísmica compatible con los estándares de aplicación en las plantas de proceso.

Breve CV de los autores:

Ing. Eduardo Tano: Ingeniero Civil UNCuyo, especializado en estructuras en la UNTucumán y en la Washington University, St. Louis, USA. Diseñador estructural de equipamiento portuario e hidromecánico en IMPSA, Mendoza. Asesor estructural en ingeniería sismorresistente y mecánica de equipos. Docente de la UTN, Facultad Regional Mendoza. Actualmente, Ingeniero Estructural Senior en SICTEC SA.

Ing. Manuel Francisco Fernández: Ingeniero Civil UNCuyo, especializado en estructuras en la UNTucumán. Diseñador estructural de equipamiento electromecánico en IMPSA, Mendoza. Asesor estructural en ingeniería civil, sismorresistente y mecánica de equipos. Actualmente, Líder División Civil y Estructuras en SICTEC SA.
