

## INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE CONTENEDORES ESFÉRICOS DE COMPONENTES QUÍMICOS LICUADOS

<sup>a</sup>Oscar Curadelli, <sup>b</sup>Aníbal Mirasso, <sup>a</sup>Daniel Ambrosini, <sup>a</sup>Marta Amani y <sup>c</sup>Marcos Bajuk

<sup>a</sup>Área de Dinámica Experimental, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo. CONICET. Centro Universitario - Parque Gral. San Martín - (5500) Mendoza. Fax 54 0261 4135000 int 2195.

dambrosini@uncu.edu.ar, <http://leonardo.uncu.edu.ar:9673/fing/posgrados/estructuralT>

<sup>b</sup>Área de Modelación Constitutiva, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo. Centro Universitario - Parque Gral. San Martín - (5500) Mendoza. Fax 54 0261 4135000 int 2195.

aemirasso@uncu.edu.ar, <http://leonardo.uncu.edu.ar:9673/fing/posgrados/estructural>

<sup>c</sup> Petroquímica de Cuyo S.A. e-mail: Marcos.Bajuk@cuyonet.com

**Palabras Clave:** Integridad estructural, identificación de sistemas, evaluación del daño estructural, contenedores esféricos de componentes químicos licuados.

**Resumen.** Las características dinámicas de una estructura pueden estimarse a partir de ensayos dinámicos, procedimiento denominado identificación de sistemas. Existen diversos métodos para determinar experimentalmente las frecuencias naturales, coeficientes de amortiguamiento y formas modales, de estructuras con diferentes condiciones de apoyo.

Este tipo de ensayos tienen una utilidad inicial como calibración de modelos computacionales y, en el caso de estructuras construidas, sirven también de base para la instalación de dispositivos de disipación de energía y control de vibraciones. Además, los valores obtenidos pueden ser utilizados de referencia para verificaciones futuras de la seguridad estructural debido a que un daño o deterioro de cualquier origen se manifiesta en una disminución de las frecuencias naturales de la estructura.

Por otra parte, el riesgo sísmico de centrales nucleares e instalaciones industriales, en particular de la industria petroquímica, debe ser evaluado con máxima rigurosidad debido a que la falla de estructuras de este tipo puede tener consecuencias catastróficas e imprevisibles.

El objetivo fundamental de este trabajo es la evaluación global de la integridad estructural de las estructuras de contenedores esféricos de componentes químicos licuados de PETROQUIMICA DE CUYO S.A., a través de un estudio paramétrico computacional y de sensibilidad, correlacionado con ensayos in-situ.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los tanques esféricos son usados normalmente en la industria petroquímica para almacenar líquidos presurizados y refrigerados de baja densidad, tales como cloro, anhídrido sulfuroso, dióxido de carbono, amoníaco, polipropileno, etc. los cuales son normalmente agrupados en la literatura especializada como componentes químicos licuados (LPG, liquified petroleum gas).

Por ser fluidos con características de alta toxicidad e inflamabilidad se los considera altamente peligrosos ya que un derramamiento de los mismos por accidente, podría ocasionar desastres ecológicos por la contaminación ambiental y pérdidas económicas y humanas de gran importancia. Con el propósito de disminuir los riesgos, las normas de diseño y sistemas de supervisión y control de la seguridad de este tipo de instalaciones son sumamente rigurosas.

En un recipiente esférico típico, la cáscara está soportada generalmente por columnas (entre seis a doce) igualmente espaciadas las que a su vez están empotradas en una platea de fundación que puede considerarse rígida. Los desplazamientos laterales de la estructura están restringidos por riostras diagonales ubicadas entre columnas adyacentes, como se muestra en Figura 1. Si bien investigaciones recientes ([Drosos et al. 2005](#), [Castellano et al. 2006](#), [Bergamo et al. 2006](#) y [Summers et al. 2004](#)) demuestran que un comportamiento dinámico satisfactorio del sistema se puede lograr mediante técnicas de disipación de energía o aislamiento de base, métodos de evaluación del daño estructural que buscan cuantificar la integridad de la estructura a lo largo del tiempo o después de ocurrido un evento tal como un sismo, son sumamente necesarios.



Figura 1 – Vista general de contenedores esféricos de LPG. Vista de riostras

En la literatura científica existen muy pocos trabajos relacionados con recipientes esféricos apoyados sobre columnas entre los cuales se pueden destacar los trabajos de [Ramaneyulu et al. 2003](#) sobre análisis sísmico y confiabilidad de recipientes esféricos y [Dutta y Laha 2000](#) y [Papasprou et al. 2003](#) que analizan el problema de interacción fluido estructura y el movimiento de líquido dentro de los recipientes. Continuando en esta línea de investigación, el trabajo describe una metodología para evaluar el daño en la estructura soporte de este tipo

de recipientes, mediante la determinación del cambio en las frecuencias naturales obtenidas a partir de ensayos dinámicos de campo. El primer paso consiste en la caracterización dinámica de la estructura en estudio, definiendo de esta manera un estado de referencia. A través de un monitoreo periódico de los parámetros establecidos, se puede inferir la integridad del sistema soporte a lo largo del tiempo. Un modo de falla típico de la estructura soporte de un contenedor esférico, se presenta en la figura 2.



Figura 2 – Falla de contenedor esférico de LPG

Esta tipología estructural presenta importantes dificultades para su correcta modelación, debido a que se trata de un problema acoplado de interacción fluido-estructura, por ello, resulta de fundamental importancia realizar un modelo numérico que represente el fenómeno físico en detalle y la contrastación del mismo mediante la verificación experimental de las características dinámicas.

## 2 ENSAYOS DINÁMICOS

### 2.1 Estructuras ensayadas

Los tres contenedores esféricos de componentes químicos licuados de PETROQUIMICA DE CUYO S.A. son “gemelos” y en este trabajo sólo se estudia el recipiente B521A con un contenido de líquido de 64.5% de su volumen. El mismo está compuesto básicamente de los siguientes componentes (Figura 1).

a) Esfera de 12,4m de diámetro, formada por chapas de acero soldadas de 25.4 mm de espesor. El volumen interior total de la esfera es de aproximadamente  $1000 \text{ m}^3$  (masa total en la prueba hidráulica 1000 t). Las esferas almacenan polipropileno de densidad  $0,5 \text{ t/m}^3$  por lo que, cuando se encuentran totalmente llenas tienen una masa de líquido de 500 t. Las esferas se encuentran recubiertas de material aislante

b) 6 patas cilíndricas de acero, de 0.786m de diámetro exterior y 12,0 mm de espesor. Las patas se encuentran empotradas en la fundación y unidas a las esferas en su parte superior. Internamente a la esfera existe una viga que vincula los extremos superiores de las seis patas.

c) Riostras: que vinculan patas adyacentes en forma de “X”, dando rigidez lateral al sistema.

d) Recubrimiento de protección: Tanto las patas como las riostras se encuentran recubiertas por hormigón ignífugo con el objetivo de protegerlas del fuego.

## 2.2 Identificación de los Parámetros Modales

Como se mencionó en párrafos anteriores el primer paso de la metodología para evaluar daño estructural, consiste en caracterizar los parámetros dinámicos del sistema. Para ello se realizaron ensayos dinámicos en campo mediante los cuales se determinaron las frecuencias naturales y coeficientes de amortiguamiento de los recipientes esféricos. Debido a que se trata de estructuras muy rígidas, fue necesario contar con una excitación externa controlada que permitiera obtener niveles de aceleración compatibles con la determinación confiable de los parámetros. Se implementó una acción dinámica controlada a través de la caída de un peso de 8 t desde una altura variable entre 4 y 5 m (Figura 3). El objetivo de dicha excitación era lograr aceleraciones en la parte superior de la esfera del orden de 2.5% g (25 mg), las cuales se obtuvieron con la caída del peso desde una altura de 4m a una distancia aproximada de 20 m de la estructura. Se realizaron 3 repeticiones del ensayo en estas condiciones.



Figura 3 – Preparación de la excitación dinámica

A partir de la respuesta en términos de aceleraciones obtenidas durante los ensayos, se determinaron las frecuencias naturales y la relación de amortiguamiento crítico viscoso mediante el espectro de Fourier (Peeters 2000; Ewins 2000), ampliamente usado en identificación de sistemas.

En Figuras 4 y 5 se presenta un registro de aceleraciones y su correspondiente espectro de frecuencias de uno de los ensayos realizados. Puede observarse claramente que la aceleración pico alcanzada en el momento de llegada de la onda generada por el impacto en el suelo del peso liberado es de 0.025g. Las dos frecuencias más bajas identificadas corresponden a 6.28 Hz y 13.8 Hz, despreciando la frecuencia de 8.28Hz ya que se trata de una frecuencia espuria como se verificó. El coeficiente de amortiguamiento determinado, en este caso correspondiente a la primer frecuencia, fue de 2.3%. Más detalles de los ensayos dinámicos se pueden encontrar en Ambrosini et al. 2008.

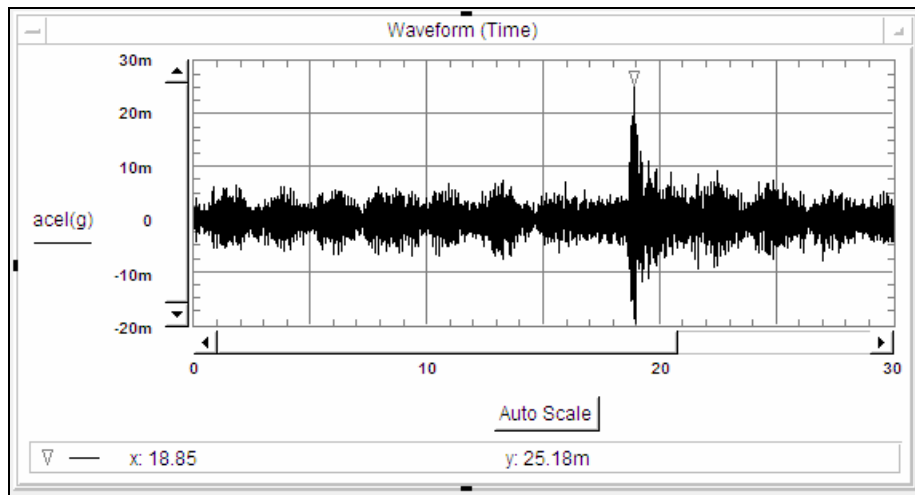


Figura 4 – Registro de aceleraciones. Ensayo E3

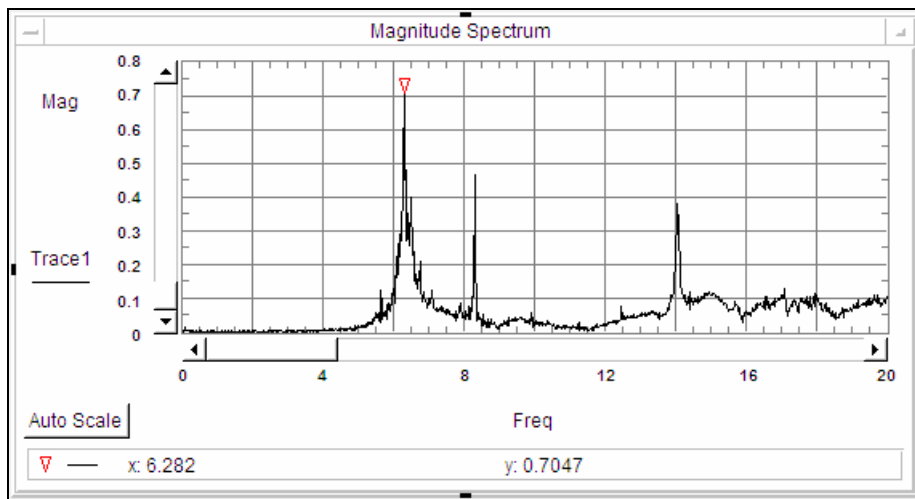


Figura 5 – Espectro de frecuencias. Ensayo E3

### 3 EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL

#### 3.1 Modelo Numérico

Con el objetivo de llevar a cabo el estudio de integridad estructural, se realizó un modelo numérico de la estructura. Las patas, vigas y riostras se modelaron con elementos de viga con 6 (seis) grados de libertad por nodo. La esfera se modeló con elementos de cáscara con 6 (seis) grados de libertad por nodo que incluyen efectos membranales, flexionales y de corte. Las columnas se consideraron empotradas en la base despreciando el efecto de la interacción suelo-estructura. El líquido admitido sin viscosidad, fue representado con elementos hexaédricos de 3 grados de libertad por nodo que pueden representar efectos de aceleración como el “sloshing”. Para satisfacer las condiciones de continuidad en la interfase entre el líquido y la cáscara, los nodos “coincidentes” son acoplados en la dirección normal a la interfase, permitiendo el desplazamiento tangencial. La figura 6 muestra el modelo utilizado en el análisis.

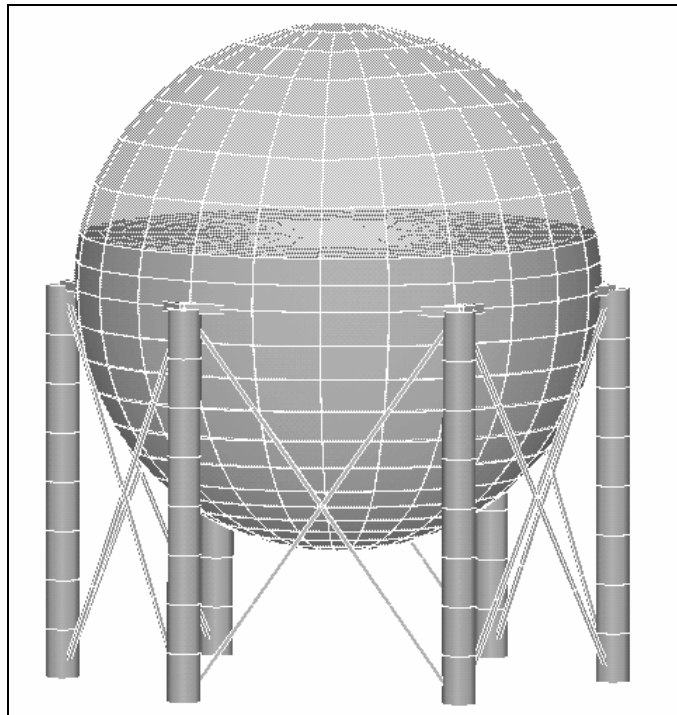
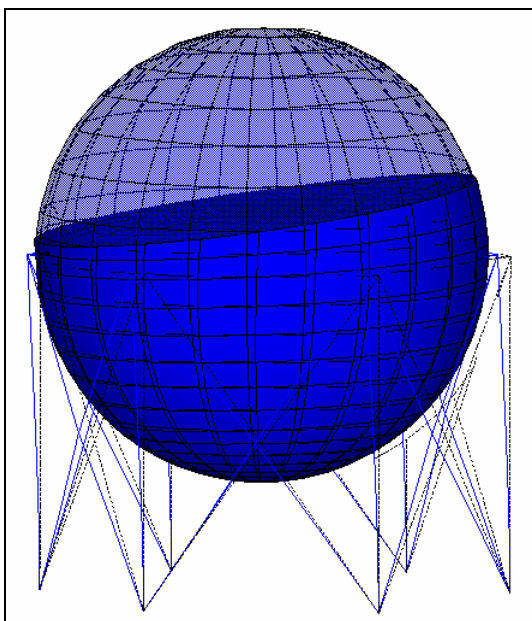


Figura 6 – Modelo de EF.

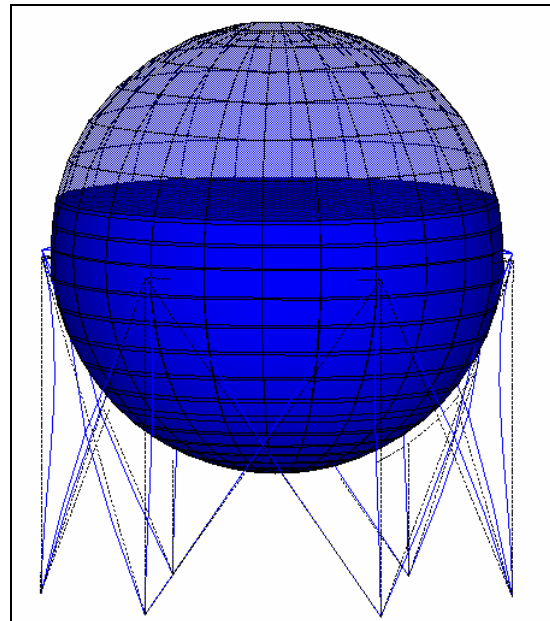
### 3.2 Modos de Vibración

Mediante un análisis modal se determinaron las frecuencias naturales y formas modales del sistema. Dicho análisis es lineal y considera efectos de pre-tensión de la estructura.

La figura 7 muestra los modos de vibración considerados importantes en el estudio de integridad estructural. Cabe destacar que las frecuencias determinadas con el modelo numérico difieren de las obtenidas en el ensayo de campo en menos del 5%.



a) Modo de flexión lateral, 6.52 Hz.



b) Modo axial, 13.5 Hz.

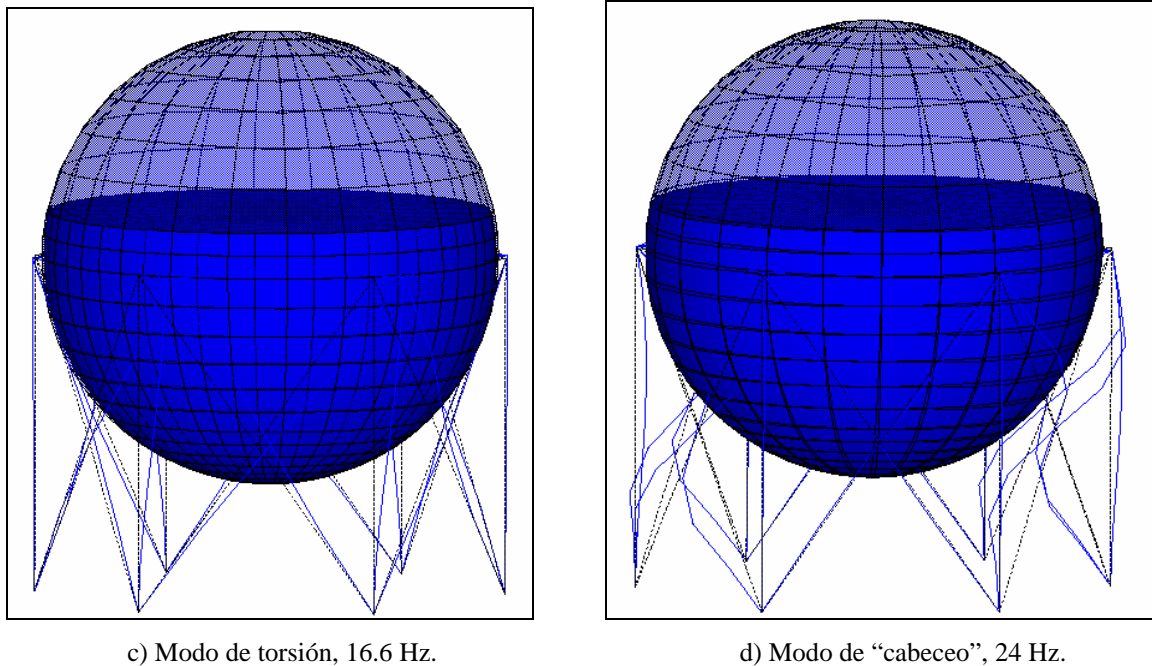


Figura 7 – Modos de Vibración.

### 3.3 Escenarios de Daño Estructural

Con el objetivo de evaluar el daño estructural mediante el cambio de las frecuencias naturales, se admitieron dos escenarios de daño. El escenario N°1 considera disminución de la rigidez a nivel de fundación de una de las patas y de las riostras que en ella convergen. El escenario N°2, admite que con el daño se reduce la rigidez a nivel de fundación de 2 (dos) patas adyacentes y las riostras correspondientes que en ellas convergen. Este tipo de daño admitido, corresponde al provocado por la corrosión de la estructura soporte a nivel de fundación. La figura 8 muestra la zona de la estructura soporte donde se admite el daño.

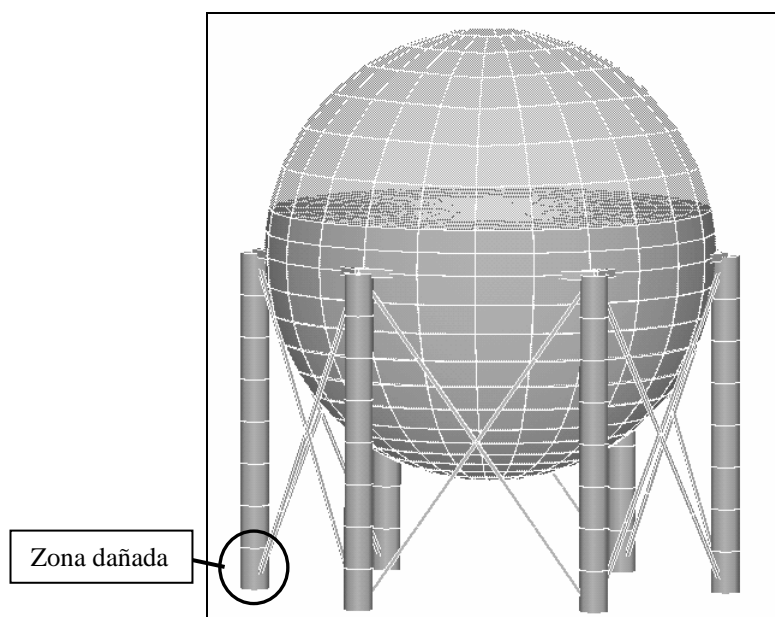


Figura 8 – Zona dañada de la estructura soporte.

### 3.4 Resultados

En la tabla 1 se muestran las frecuencias obtenidas en cada escenario de daño. Además, se indica la reducción porcentual de la frecuencia de cada modo, normalizado respecto al estado original de la estructura. Al admitir que una o dos patas se encuentran dañadas (escenario de daño N°1 y N°2, respectivamente) se produce una redistribución de la carga y para evidenciar la contribución de resistencia de la pata dañada se presenta el valor relativo de la reacción axial remanente de la misma. La disminución de rigidez causada por el daño se cuantifica mediante un factor de reducción de rigidez.

Modos y Frecuencias Naturales [Hz]										
Nivel de daño	Factor reduc. de rigidez	Lateral	reduc. [%]	Axial	reduc. [%]	Torsión	reduc. [%]	Cabeceo	reduc. [%]	Reacc. pata dañada [%]
sin daño	1	6.52	0.0	13.5	0.0	16.6	0.0	24.1	0.0	100
N°1	0.5	6.4	1.8	13.4	0.7	16.3	1.8	24	0.4	93
	0.1	6	8.0	13	3.7	15.5	6.6	23.5	2.5	62
	0.01	5.71	12.4	12.5	7.4	14.8	10.8	23.3	3.3	14
N°2	0.5	6.28	3.7	13.3	1.5	16	3.6	24	0.4	98
	0.1	5.34	18.1	12.37	8.4	14.13	14.9	22.78	5.5	83
	0.01	4.24	35.0	10.76	20.3	12.86	22.5	21.45	11.0	32

Tabla 1: Frecuencias Naturales para cada escenario de daño.

### 3.5 Criterios de Evaluación de la Integridad Estructural

A partir de los resultados obtenidos en cada escenario de daño simulado es posible definir estados que caracterizan la integridad de la estructura soporte. En este trabajo, a modo de ejemplo, se definieron 3 (tres) estados:

a) Admisible: la estructura puede continuar en operación sin intervención. La caída en la frecuencia de cualquiera de sus modos analizados debe ser menor al 10% (color verde en tabla 1).

b) Alerta: se debe sacar de operación a la estructura, realizar un estudio detallado para localizar y cuantificar el daño estructural a fin de tomar medidas correctivas de manera de reestablecer las condiciones de originales de operación. La caída en la frecuencia de cualquiera de sus modos analizados debe estar comprendida entre el 10% y 20% (color amarillo en tabla 1).

c) Intervención inmediata: se debe sacar de operación a la estructura inmediatamente debido al riesgo de colapso. La caída en la frecuencia de cualquiera de sus modos analizados debe ser mayor al 20% (color naranja en tabla 1).

En la figura 9 se muestran los tres estados de la integridad de la estructura analizada.



<b>Admisible</b>	<b>Alerta</b>	<b>Intervención</b>
<b>&lt;10%</b>	<b>&lt; 20%</b>	<b>&gt;20%</b>
[-----Reducción de la frecuencia [%]-----]		

Figura 9 – Estados de Integridad Estructural.

#### 4 CONCLUSIONES

En el trabajo se presenta una evaluación de la integridad de la estructura soporte de contenedores esféricos de componentes químicos licuados basada en la reducción de las frecuencias naturales del sistema provocada por el daño estructural.

A partir de los resultados obtenidos mediante la metodología empleada, es posible definir estados de integridad de la estructura soporte con el objetivo de tomar las medidas correctivas que el caso requiera. Se reconoce que, como se trata de un método de identificación global, con la sensibilidad del mismo, sólo se pueden inferir estados de funcionalidad (“integridad”) de la estructura y no una definición detallada de la localización y cuantificación del daño.

Está previsto el estudio de la sensibilidad del método para diferentes niveles del contenido de líquido y tipos de daño.

#### REFERENCIAS

- Ambrosini D., Mirasso A., Curadelli O., Amani M. y Bajuk M. Características dinámicas de contenedores esféricos de componentes químicos licuados, *XXXIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*, Santiago, Chile, en CD, 2008.
- Bergamo G., M.G.Castellano, F. Gatti, A. Poggianti, P. Summers. Seismic isolation of spheres at petrochemical facilities, *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva, Switzerland, 3-8 September 2006. Paper Number: 1009. pp. 1-9.
- Castellano M.G., A. Poggianti, y P. Summers. Seismic retrofit of spheres using energy-dissipating braces, *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva, Switzerland, 3-8 September 2006. Paper Number: 1001. pp. 1-8.
- Drosos J.C., S.V. Tsinopoulos and D.L. Karabalis. Seismic response of spherical liquid storage tanks with a dissipative bracing system, *5th GRACM International Congress on Computational Mechanics*, Limassol, 29 June – 1 July, 2005, pp. 1-7.
- Dutta, S., Laha, M.K, Analysis of the small amplitude sloshing of a liquid in a rigid container of arbitrary shape using a low-order boundary element method, *Int. J. Numer. Meth. Engng*, 47, 2000, pp. 1633-1648.
- Ewins D., *Modal Testing - Theory, practice and application*. Second Edition - Reserch Studies Press Ltd. 2000.
- Papaspyrou, S., Valougeorgis, D. Karamanos, S.A. Refined solutions of externally induced sloshing in half-full spherical containers, *J. Engng Mech.*, 129, 2003, pp. 1369-1379.
- Peeters, B., *System identification and damage detection in civil engineering*. PhD thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium. 2000.
- Ramaneyulu, K., Husain, A., Sehgal, D.K. Ahmad, S. Finite element analysis and reliability assessment of spherical LPG storage tank, *IE (I) Journal-MC*, 84, pp. 98-103. 2003.
- Summers P., P. Jacob, J. Marti, G. Bergamo, L. Dorfmann, G. Castellano, A. Poggianti, D. Karabalis, H. Silbe, S. Triantafillou. Development of new base isolation devices for

application at refineries and petrochemical facilities, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada August 1-6, 2004. Paper Number: 1036. pp. 1-15.