

Análisis experimental de la aislación sísmica de un estanque con líquido con interfaz de geosintéticos

Experimental analysis of the seismic isolation of a tank with liquid using a geosynthetics interface

Fecha de entrega: 4 de noviembre 2010

Fecha de aceptación: 20 de junio 2011

Rodrigo Betanzo¹, Fernando Cerda² y José Luis Almazán³

¹ Departamento Civil, Parés y Álvarez, Marco Polo 8939, Hualpén, Concepción, Chile, rodrigo.betanzo@pyaing.cl

² Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción, Chile, facerda@udec.cl

³ Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, P. Universidad Católica, Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile, jlalmaza@ing.puc.cl

Una interfaz compuesta por un geotextil no tejido de alta resistencia y un polímero de ultra alto peso molecular, colocados debajo de las fundaciones de una estructura, pueden proveer protección sísmica. Esto se logra disipando la energía que se transmite hacia la superestructura a través de un deslizamiento controlado entre estas dos superficies. Se prepararon ensayos dinámicos en una mesa vibradora y se ejecutaron en un estanque de almacenamiento con apoyo continuo, en condiciones con y sin líquido. Se utilizaron sollicitaciones armónicas y sísmicas en dos direcciones de análisis, para describir la respuesta dinámica del sistema. Los resultados mostraron que la interfaz de geosintéticos actúa reduciendo notoriamente la aceleración transmitida desde la mesa vibradora hacia el estanque, a la vez que un deslizamiento del mismo ocurrió a lo largo de la interfaz. Además, su implementación en las fundaciones del estanque permitió registrar menores presiones de líquido en la pared interior del estanque, respecto de la condición no aislada. Debido a esto se logra demostrar la factibilidad técnica de este método de aislación, perfilándolo como un sistema de protección sísmica de costo reducido y de fácil implementación para ser utilizado en la reducción de daños sísmicos.

Palabras clave: aislación, mesa vibradora, interfaz de geosintéticos, estanque con líquido

An interface composed of synthetic materials such as high-strength nonwoven geotextiles and Ultra High Molecular Weight PolyEthylenes (UHMWPE), placed underneath foundations of structures can provide seismic protection. This is achieved by dissipating energy to the superstructure through a controlled sliding between these two surfaces. Shaking table tests were performed to a storage tank with mat foundation and with and without water conditions. Harmonic and two directional seismic excitations were used for describing the dynamic response of the system. The results showed that the tank isolated with the geosynthetic interface suffered a remarkable reduction in the transmitted accelerations from the excitation. Accompanying these reductions slip deformations took place along the interface. In addition, lesser water pressures in the inner wall were measured in comparison with the tank without geosynthetic isolation. The experimental results demonstrate the technical feasibility of this isolation system, which allows its easy implementation and cost-effective relationship to be used in earthquake hazard mitigation.

Keywords: isolation, shaking table, geosynthetics interface, tank with liquid

Introducción

El terremoto del 27 de febrero 2010 dejó en evidencia la falla de varios sistemas de almacenaje de líquidos. Las pérdidas debido a la rotura de estanques en términos de costos de reparación y pérdidas del producto en sí, principalmente vinos y licores de exportación, exigen de soluciones ingenieriles que eviten o reduzcan estas pérdidas.

El presente estudio presenta los resultados del desempeño de una interfaz de aislamiento como sistema de protección sísmica para un estanque de almacenamiento de líquido, sistema de más grados de libertad que un bloque rígido. Estudios de este tipo permiten perfilar alternativas de aislación sísmica como un sistema técnicamente factible y evaluar la relación costo-efectividad.

La investigación contempla la ejecución de ensayos dinámicos a un estanque de almacenamiento con apoyo continuo sobre una mesa vibradora. Las aceleraciones transmitidas desde la mesa vibradora hacia el estanque y las presiones generadas en su manto interior debido a la excitación externa, son los parámetros utilizados para caracterizar la respuesta dinámica del sistema estanque-líquido. Dos condiciones base son analizadas: estanque vacío y estanque con líquido, ambos sometidos a excitaciones de tipo armónica unidireccionales y excitaciones sísmicas de tipo impulsiva y no impulsiva bidireccionales. La idea de esta investigación es evaluar los efectos de implementar la interfaz de aislación en la base del estanque en términos de producir o no una reducción significativa de la aceleración transmitida desde la mesa vibradora hacia el estanque, a la vez de evaluar los deslizamientos ocurridos a lo largo de la interfaz.

En las últimas dos décadas se ha desarrollado una línea de investigación sobre aislación sísmica con geosintéticos. Hasta ahora se ha demostrado que una interfaz compuesta por un geotextil de alta resistencia, del tipo no tejido (*non woven*), colocado sobre un polímero de ultra alto peso molecular (Ultra High Molecular Weight PolyEthylenes UHMWPE), disipa energía a través de un deslizamiento relativo entre estos materiales (Yegian y Kadakal 2004). Resultados de ensayos en mesas vibradoras efectuados en bloques rígidos por Yegian y Kadakal (2004), han mostrado que el deslizamiento relativo en la interfaz produce una reducción notable en las aceleraciones transmitidas hacia el bloque (Figura 1).

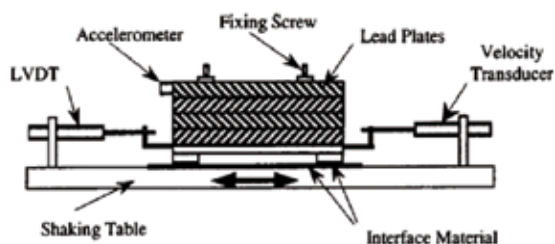


Figura 1: Interfaz de geosintéticos bajo un bloque rígido (tomado de Yegian y Kadakal 2004)

Composición de la interfaz

La superficie en la cual se produce el deslizamiento es una interfaz compuesta por dos materiales geosintéticos. El primero es un geotextil del tipo no tejido y el segundo es un polímero a base de polietileno de ultra alto peso

molecular (UHMWPE). El geotextil posee ciertas características de composición, fabricación y de resistencia mecánica, mientras que el polímero se destaca principalmente por no modificar sus propiedades físicas y mecánicas en presencia de ambientes con gran humedad ni tampoco a temperaturas menores a 80°C, además de su durabilidad y resistencia ante ataques químicos. Ambos materiales también destacan por sus variados usos y aplicaciones en ingeniería y su amplia presencia en el mercado de los geosintéticos. Como conjunto, la propiedad que más interesa conocer para desarrollar el sistema de protección sísmica es el coeficiente de roce entre estos materiales (coeficiente de roce de la interfaz).

A la fecha se han ensayado diferentes combinaciones Geotextil/Polímero y Polímero/Polímero encontrándose diferentes valores de coeficiente de roce (Tabla 1), algunos muy bajos, que propician el uso de esta aislación (Yegian y Lahlaf 1992).

Tabla 1: Coeficientes de roce para distintas interfaces de geosintéticos

INTERFAZ	Coefficiente de roce	Autor
HDPE/geotextil ^a	0.14	Williams y Houlihan (1986)
HDPE/geotextil ^b	0.18	Williams y Houlihan (1986)
HDPE/geotextil ^c	0.18	Williams y Houlihan (1986)
HDPE/geotextil ^d	0.16	Williams y Houlihan (1986)
HDPE/geotextil ^e	0.10-0.12	Negussey et al. (1989)
HDPE/HDPE	0.10-0.12	Negussey et al. (1989)
PTFE/PTFE	0.13	Yegian y Kadakal (2004)
UHMWPE/UHMWPE	0.10	Yegian y Kadakal (2004)
UHMWPE/geotextil ^f	0.15, 0.28	Betanzo (2007)
UHMWPE/geotextil ^g	0.06, 0.08	Yegian y Kadakal (2004)

^aNo tejido, ligado por punzonado, polipropileno

^bTejido, *slit-film*, polipropileno

^cNo tejido, ligado por punzonado, fibra de polyester

^dTejido, fibra de polyester tejido con fibras de polipropileno

^eNo tejido, ligado por agujado, polipropileno

^fNo tejido, ligado por punzonado, fibra de polyester

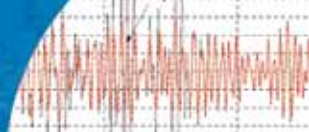
^gNo tejido, ligado por termofusión, polipropileno

HDPE polímero de alta densidad a base de polietileno

PTFE polímero a base de politetrafluoretileno

UHMWPE polímero de ultra alta densidad, a base de polietileno

La implementación de la interfaz geotextil/UHMWPE en la estructura real cumple la función de disipar la energía de entrada del sismo a través de un deslizamiento



controlado. Este deslizamiento se produce a lo largo de la superficie de contacto entre ambos geosintéticos, desconectando el movimiento del suelo del de la superestructura. El concepto de cómo funciona el deslizamiento a lo largo de la superficie de contacto se muestra de manera simplificada en la Figura 2. El geotextil bajo las fundaciones de la superestructura y el polímero UHMWPE en movimiento conjunto con el suelo, permiten que ante un evento sísmico se produzca menor amplitud de movimiento de las fundaciones y por ende de la superestructura, respecto del suelo de fundación. Esta condición de funcionamiento de la interfaz es la que se modeló en los ensayos efectuados, adosando el geotextil a la base del estanque y fijando el polímero UHMWPE a la mesa vibradora.

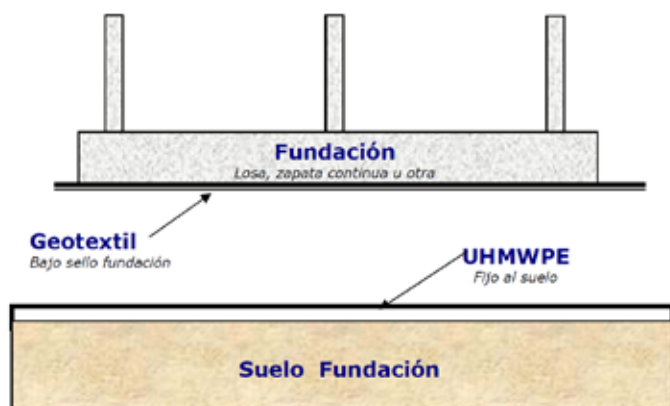


Figura 2: Esquema general de la implementación y funcionamiento de la interfaz

Montaje experimental

Se prepararon ensayos dinámicos en que la interfaz geotextil/UHMWPE fue colocada bajo la base circular de un estanque a escala (Figura 3a). Para estos ensayos se utilizó un geotextil no tejido en base a fibra de poliéster, fabricado con método de punzonado, y una membrana o placa de polímero UHMWPE, de dimensiones 1.2 m x 1.6 m, y de 6 mm de espesor. Los ensayos fueron realizados disponiendo de una mesa vibradora de 6 grados de libertad, lo que permite generar casi cualquier tipo de sollicitación sísmica, a la vez de registrar completamente su movimiento (desplazamientos y aceleraciones). Para registrar la respuesta del estanque éste fue instrumentado con acelerómetros en su placa base (fundación), fondo y techo (Figura 3a); sensores de presión en su pared interna a 15 cm del fondo del estanque (Figura 3b) y transductores de desplazamiento para medir desplazamientos absolutos y relativos a la mesa. Además fue necesario un sistema

de adquisición de datos (*data logger*), con tal de registrar los parámetros de interés. Dos condiciones fueron consideradas para describir el comportamiento dinámico del estanque: estanque vacío y estanque con aproximadamente 600 litros de agua. Para cada caso se registraron datos de aceleraciones transmitidas hacia el estanque, presiones de agua generadas en el manto y los desplazamientos de la mesa y de la base del estanque a lo largo de la interfaz ante diferentes excitaciones dinámicas.

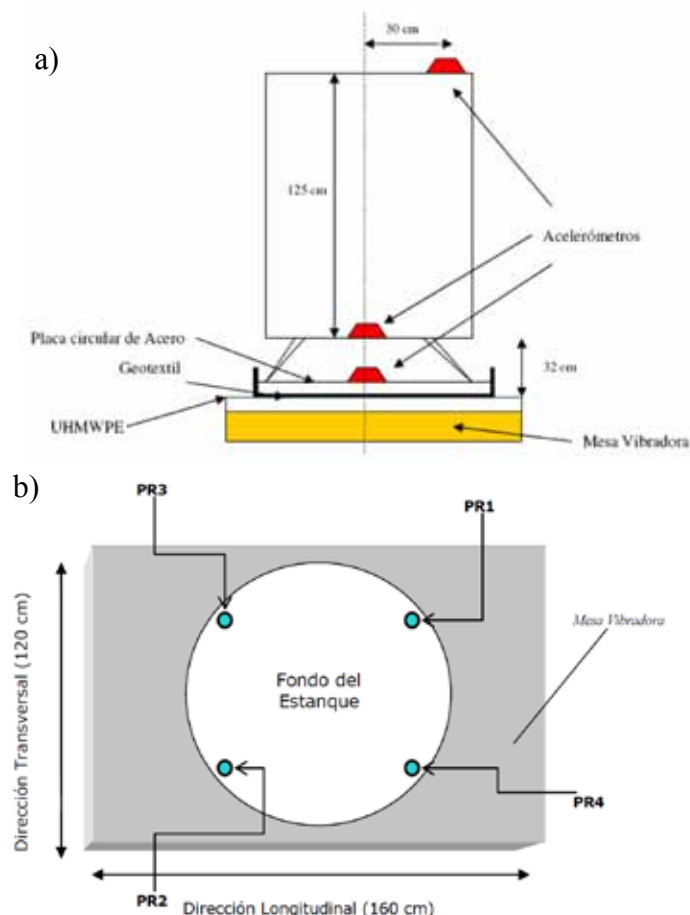


Figura 3: a) Esquema general del estanque utilizado y posición de los acelerómetros, corte en elevación y b) direcciones de análisis en mesa vibradora mostrando posición de sensores de presión, vista en planta

Respuesta estanque vacío

La primera excitación dinámica considerada en el análisis fue una señal aleatoria unidimensional con diferentes contenidos de frecuencia, comúnmente conocida como “ruido blanco” de aceleración máxima promedio de 0.4g (Figura 4). Cuando se inicia la excitación externa se aprecia que el estanque y la mesa se mueven de manera conjunta. En el momento en que la excitación sobrepasa aproximadamente los 0.23g, se produce el primer deslizamiento del estanque

a lo largo de la interfaz (en tiempo igual a 3.5 s). A medida que transcurre el tiempo de la excitación se aprecia que los máximos de aceleraciones mayores a esta aceleración umbral, no se transmiten al estanque siendo “absorbidos” por el deslizamiento que tiene lugar a lo largo de la interfaz. Para visualizar de mejor forma esta reducción en las aceleraciones, la Figura 5 muestra una comparación cuantitativa de los valores de la aceleración máxima de la excitación y su correspondiente aceleración máxima que se registra en el acelerómetro justo por sobre de la interfaz (placa base del estanque). Cuando la aceleración de la excitación es menor que 0.23g, la mesa y el estanque se mueven en conjunto. Por el contrario, cuando la aceleración sobrepasa aproximadamente los 0.23g comienza un deslizamiento del estanque a lo largo de la interfaz y como consecuencia un desacople del movimiento del estanque respecto de la mesa. La consecuencia más inmediata es que la aceleración que se transmite a la placa base del estanque es menor que la aceleración de la excitación.

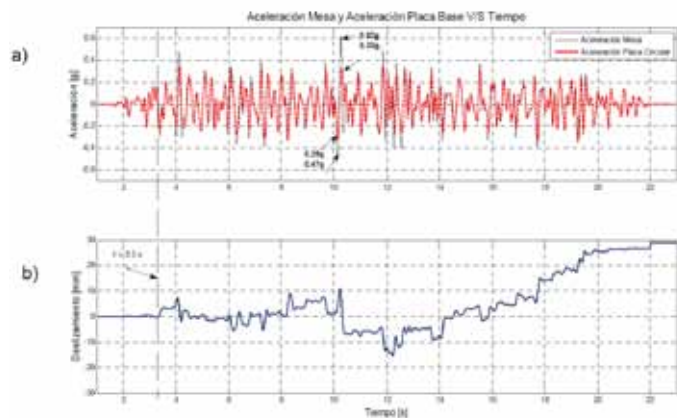


Figura 4: a) Aceleraciones de la mesa y la placa base del estanque y b) desplazamiento relativo del estanque

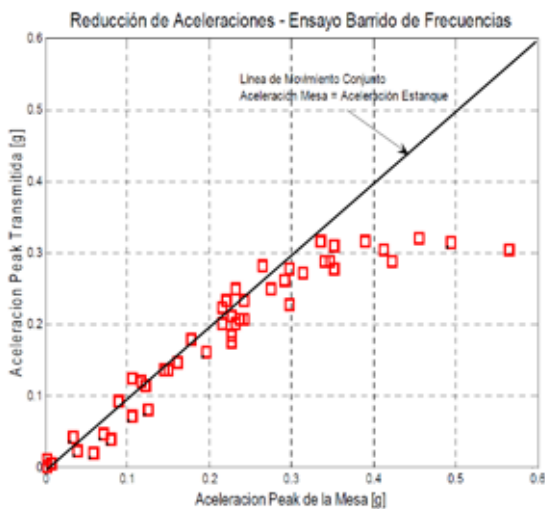


Figura 5: Aceleración de la mesa y aceleración registrada en la placa base del estanque

Estanque vacío bajo excitación armónica

Se realizaron ensayos dinámicos de tipo armónico al estanque vacío y se registraron las aceleraciones transmitidas hacia el estanque y su desplazamiento relativo a la mesa. La Figura 6 muestra la excitación utilizada y las aceleraciones registradas en el acelerómetro de la placa base del estanque para un ensayo tipo, en el cual las amplitudes de aceleración de la mesa vibradora van sucediendo en tres etapas, 0.17g, 0.29g y 0.48g. En la primera etapa, 0.17g, se aprecia una leve reducción de las aceleraciones transmitidas hacia la placa base del estanque. En la segunda etapa puede apreciarse la diferencia entre la aceleración de la excitación y la aceleración transmitida hacia el estanque, siendo más apreciable esta diferencia en la tercera etapa del ensayo, 0.48g, donde la independencia de movimientos de la mesa y del estanque es manifiesta.

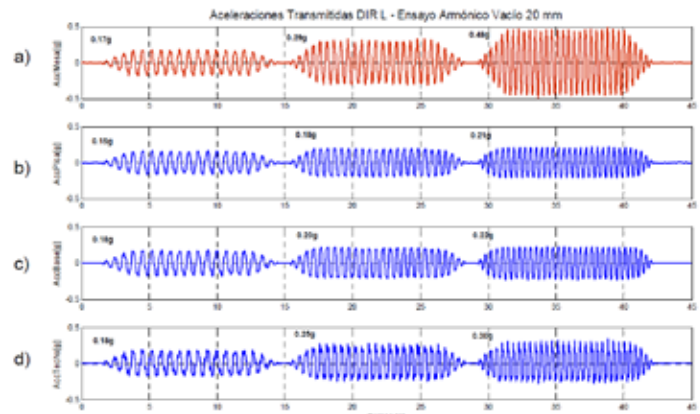


Figura 6: Aceleraciones en ensayo armónico sin líquido: (a) mesa vibradora, (b) placa base, (c) fondo estanque y (d) techo

Estanque con líquido bajo excitación armónica

De forma similar a los ensayos armónicos sin líquido, se realizaron los mismos ensayos al estanque con 600 litros de agua en su interior. En la primera etapa de la excitación la reducción en las aceleraciones transmitidas hacia el estanque es casi imperceptible, similar al caso del estanque vacío (ver Figura 7). Para la segunda y tercera etapas la reducción es más evidente, sin embargo, al comparar con el caso vacío la aceleración para la cual el estanque comienza su deslizamiento fue levemente mayor. Otro aspecto a destacar en la respuesta dinámica respecto de la condición de estanque vacío, es que en el registro de la aceleración en la placa base del estanque (Figura 7b), el valor de amplitud no es constante para la segunda y tercera etapas de la excitación. Esto puede deberse a que

algún modo del oleaje está participando en la respuesta del sistema. Según Cerda (2006), los modos de oleaje en un estanque se excitan con frecuencias bajas y contribuyen con aproximadamente un 20% de la masa modal efectiva del agua.

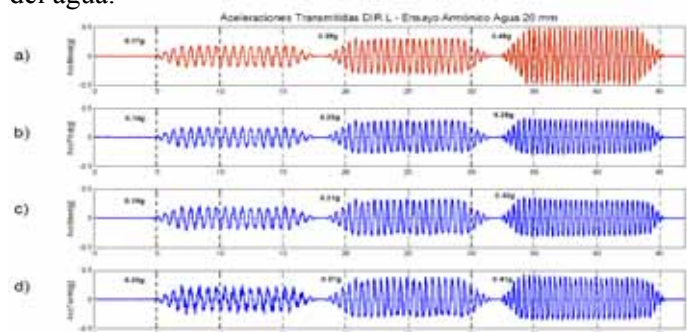


Figura 7: Aceleraciones en ensayos con excitación armónica con líquido: (a) mesa vibradora, (b) placa base, (c) fondo estanque y (d) techo.

Estanque con líquido ante excitación sísmica no impulsiva en 2D

La sollicitación utilizada en esta parte del estudio correspondió a un registro bidireccional del sismo de Melipilla, Chile 1985. Las Figuras 8 y 9 muestran los registros de aceleraciones de la mesa vibradora y del acelerómetro de la placa base del estanque, en ambas direcciones de análisis simultáneas, para un ensayo tipo utilizando esta excitación sísmica. Las diferencias en el movimiento del estanque y de la mesa vibradora se producen cuando la aceleración de la excitación es mayor que el valor umbral de la aceleración, asociada al coeficiente de roce estático de la interfaz. Cada vez que la aceleración de la excitación sobrepasa este valor umbral, existe deslizamiento y por lo tanto el desacople del movimiento del estanque respecto de la mesa. Por otra parte, la Figura 10 muestra una comparación entre las presiones de agua al interior del estanque para las condiciones con aislación y sin aislación. En ella puede apreciarse el efecto de aislación de la interfaz directamente en el registro de las presiones hidrodinámicas en el manto del estanque.

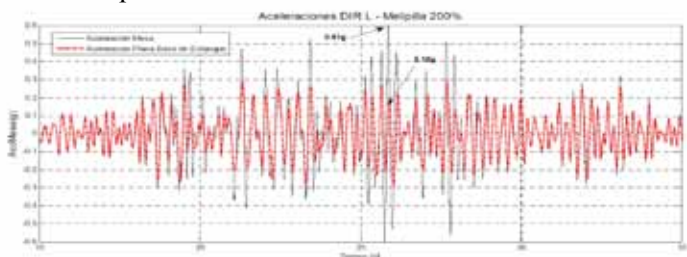


Figura 8: Reducción de aceleraciones experimentada en la placa base del estanque. Registro de Melipilla al 200% dirección longitudinal de la mesa.

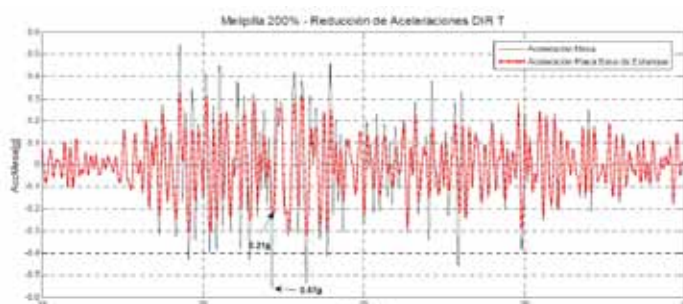


Figura 9: Reducción de aceleraciones experimentada en la placa base del estanque. Registro de Melipilla 200% dirección transversal de la mesa.

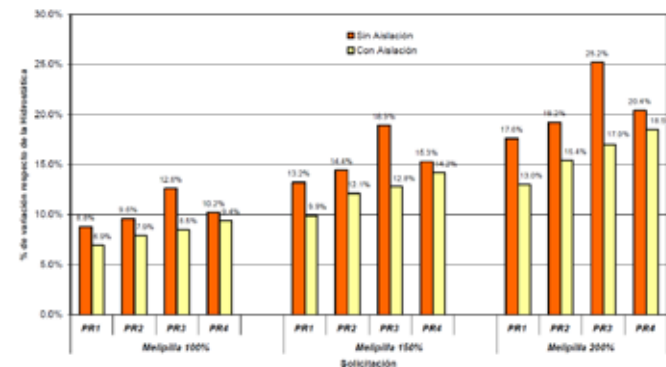


Figura 10: Comparación de las presiones registradas en la pared del estanque para las condiciones con y sin aislación usando el sismo de Melipilla.

Estanque con líquido ante excitación sísmica impulsiva en 2D

La excitación utilizada como sollicitación sísmica impulsiva fue una señal bidireccional basada en el registro de la estación Corralitos, sismo de Loma Prieta EE.UU., 1989. Nuevamente, se realizaron comparaciones entre la aceleración de la mesa vibradora y la aceleración medida en la placa base del estanque encontrándose idéntico comportamiento de la interfaz, es decir, menores aceleraciones transmitidas hacia el estanque y menores presiones medidas en el manto. En los resultados mostrados en las Figuras 11 y 12 puede verse que existió una reducción cuantitativa de aceleraciones muy similar al caso no impulsivo. Sin embargo, en la medición de las presiones de agua al interior del estanque se apreciaron reducciones menos notorias en comparación con el caso de la excitación no impulsiva (Figura 13). La disipación de energía de la interfaz, definida por la relación constitutiva de su coeficiente de roce, es distinta para una carga aplicada gradualmente que para una carga aplicada en un intervalo de tiempo pequeño, como tiende a ser en el caso de excitaciones impulsivas. En general, esta relación constitutiva es función tanto del esfuerzo normal en el área de contacto como de la velocidad de aplicación de la

carga. Para la interfaz del análisis y para excitaciones de tipo impulsivas, la respuesta de presiones hidrodinámicas registrada en el estanque se ve muy influenciada por la variación del coeficiente de roce con la velocidad de aplicación de la carga. Por este motivo, para implementar un sistema de aislación más efectivo se debe procurar elegir interfaces con coeficientes de roce que sean poco sensibles a la velocidad de aplicación de la carga (Yegian y Kadakal 2004).

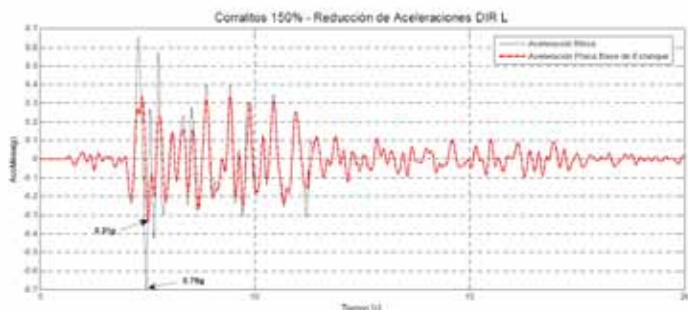


Figura 11: Reducción de aceleraciones experimentada en la placa base del estanque. Registro de Corralitos 150% dirección longitudinal de la mesa.



Figura 12: Reducción de aceleraciones experimentada en la placa base del estanque. Registro de Corralitos 150% dirección transversal de la mesa.

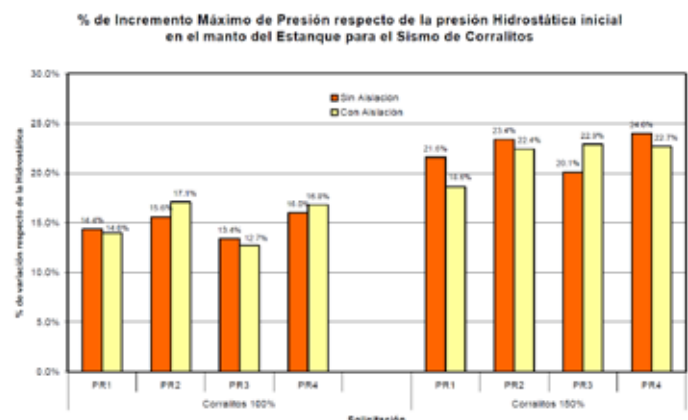


Figura 13: Presiones de agua en la pared del estanque con y sin aislación para el sismo de Corralitos

Finalmente, la construcción del diagrama de transmisión de aceleraciones de la interfaz permite visualizar claramente la efectividad del sistema de aislación y por ende el desempeño de la interfaz. Esta gráfica permite identificar

el valor umbral de aceleración que diferencia el movimiento conjunto mesa-estanque del movimiento desacoplado. La Figura 14 muestra resultados provenientes de todos los ensayos ejecutados. Cada punto representa un par de respuesta máxima de aceleración medida en la placa base del estanque versus el valor máximo de la aceleración de la excitación. Como puede apreciarse, estos puntos generan líneas de tendencia separadas por un punto de quiebre el cual define el valor umbral de aceleración de la interfaz analizada (punto de desacople de movimiento). Los puntos graficados corresponden al valor de la respuesta de aceleración máxima registrada en cada ensayo con una excitación sísmica determinada. La información que entrega este gráfico indica la capacidad de disipación de energía que posee la interfaz analizada en términos de la reducción de la aceleración transmitida al estanque.

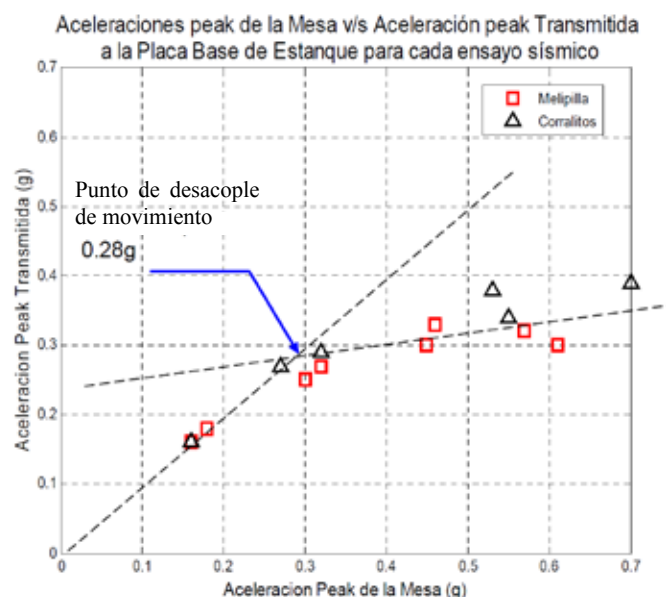
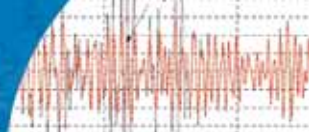


Figura 14: Diagrama de transmisión de aceleraciones de la interfaz geotextil/UHMWPE

Conclusiones

Los análisis de los resultados mostraron que se verificaron importantes reducciones en las aceleraciones transmitidas desde la mesa vibradora hacia el estanque cuando éste fue implementado con el sistema de aislación sísmica compuesto por la interfaz de geosintéticos. Cada vez que la aceleración de la excitación superó un cierto valor umbral, se produjo un desacople entre el movimiento de la mesa (excitación) y el movimiento del estanque lo que se tradujo en menores aceleraciones medidas en la placa base del estanque. Esta reducción de aceleraciones se verificó tanto en los casos de estanque vacío como estanque con agua. Para el caso de una excitación sísmica bidireccional de



tipo no impulsiva, se registraron reducciones de aceleraciones en ambas direcciones de análisis simultáneamente por lo que la interfaz disipa la energía de entrada en ambas direcciones del movimiento registrado. Sumado a lo anterior, las presiones de agua registradas en el manto del estanque aislado con la interfaz fueron en promedio 20% menores que las presiones registradas en el estanque sin la aislación. Para el caso de una excitación sísmica bidireccional de tipo impulsiva también se verificaron reducciones de aceleraciones en ambas direcciones de análisis. Sin embargo, las reducciones en las presiones registradas en el manto del estanque aislado fueron menos notorias que para una sollicitación no impulsiva y muy similar a las registradas en la condición sin aislación.

De lo anterior se puede afirmar que las propiedades y las condiciones de contacto en la zona del deslizamiento así como la velocidad de aplicación de la carga, determinan la efectividad en la reducción de aceleraciones y presiones. El coeficiente de roce de la interfaz y su relación constitutiva tienen directa relación con las características disipadoras de la interfaz por lo que se deben utilizar materiales geosintéticos cuyas propiedades de contacto entre ambos no estén demasiado influenciadas por el esfuerzo normal de contacto ni por la velocidad de aplicación de la carga. Por todo lo anterior y de los resultados obtenidos la interfaz geotextil/UHMWPE se perfila como un método de protección sísmica efectivo. Adicionalmente, la simplicidad de adquisición e implementación en terreno de los materiales involucrados aportan beneficios adicionales para que este sistema de aislación sea considerado como alternativa técnico-económica factible para proyectos de menor presupuesto.

Agradecimientos

La realización de estos ensayos fue posible gracias al excelente equipo humano de trabajo, existente en el Laboratorio de Ensayos Dinámicos y Control de Vibraciones del Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

Referencias

Betanzo, R. (2007). *Sistema de protección sísmica utilizando interfaz de geosintéticos. Aplicación experimental a estanque de almacenamiento con apoyo continuo*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Concepción, Chile

Cerda, F. (2006). *Protección sísmica para estanques de acero inoxidable, pared delgada y apoyos*. Tesis de Magister, Pontificia Universidad Católica, Chile

Negussey D., Wijewickreme W.K.D. and Vaid Y.P. (1989). Geomembrane interface friction. *Canadian Geotechnical Journal* 26:165-169

Yegian, M.K. and Kadakal, U. (2004). Foundation Isolation for Seismic Protection using a smooth Synthetic Liner. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130, No 11:1121-1130

Yegian, M.K. and Lahlaf A.M. (1992). Dynamic interface shear strength properties of geomembranes and geotextiles. *Journal of Geotechnical Engineering* 118, No 5:760-779

Williams, N.D. and Houlihan, M. (1986). Evaluation of friction coefficients between geomembranes, geotextiles and related products. *Proceedings Third International Conference on Geotextiles*, Vienna, Austria, Vol. 3, 891-896

Academic position in Engineering Geology



UNIVERSIDAD CATOLICA
DE LA SANTISIMA CONCEPCION



We are looking for academics to fortify our recently implemented Engineering Geology program in the Department of Civil Engineering (www.civil.ucsc.cl) of the Catholic University of Concepción (www.ucsc.cl). We are interested in candidates with a knowledge of Rock Mechanics (underground excavations, slope stability, laboratory testing), Hydrogeology, Geophysics (in situ testing), Seismology, Structural Geology and Natural Hazards. Candidates can be Geologists, Geophysicists, Civil Engineers, Engineering Geologists or other related professional with a doctorate in a relevant topic. As an academic you will lecture undergraduate and graduate students, develop a line of research as well as carry out laboratory and field work.

Further questions please contact Dr. King (rking@ucsc.cl) or Dr. Villalobos (avillalobos@ucsc.cl).