



Mitigación de licuación empleando Pilas de Agregado Apisonado en la UMF-4 del IMSS, Ejido Durango, Mexicali, B.C.

Liquefaction mitigation using Rammed Aggregate Piers for the UMF-4 of the IMSS in the Ejido Durango, Mexicali, B.C.

Gabriel MARTÍNEZ¹, Aquiles MORALES², Jorge PARRA³ y Flavio SALGUERO⁴

¹Grupo Sandstorm-GAM S.A. de C.V., Guadalajara, Jalisco, México.

²Grupo Sandstorm-GAM S.A. de C.V., Guadalajara, Jalisco, México.

³Geopier Foundation Company, Mooresville, NC, E.U.A.

⁴Geopier Foundation Company, Guadalajara, Jalisco, México.

RESUMEN: El 04 de Abril del 2010 ocurrió un sismo, 60 km al sureste de la Ciudad de Mexicali, B.C. de 7.2 grados de magnitud en la escala de Richter. Como consecuencia de dicho evento se presentó licuación en arenas limpias en diferentes puntos del Valle de Mexicali provocando graves daños en la mayoría de las estructuras quedando gran parte de ellas inhabitables. Es por ello que para la reconstrucción de la UMF-4 del IMSS se emplearon Pilas de Agregado Apisonado para mitigar el fenómeno de licuación en futuros eventos sísmicos.

ABSTRACT: On April 4th 2010 an earthquake of 7.2 degrees Richter scale happened at 60 km to the southeast of Mexicali City. Because of the earthquake some clean sands in different spots in the Mexicali valley presented liquefaction making most of the structures to suffer severe damages. Thereby the IMSS decided to use Rammed Aggregate Piers for the reconstruction of the UMF-4 to mitigate liquefaction in future seismic events.

1 DESCRIPCIÓN GENERAL

1.1 Antecedentes

La Unidad de Medicina Familiar No. 4 (UMF-4) ubicada en el Ejido Durango en el Valle de Mexicali a 48 km al sureste de la Ciudad de Mexicali fue inaugurada en 1964 por el entonces Presidente de la Republica Adolfo Lopez Mateos.

A partir de su inauguración hasta Abril del 2010 la UMF-4 fue afectada por cuatro sismos de magnitud superior a 6 grados Richter: 1979 Mag. 7.0, 1980 Mag. 6.1, 1987 Mag. 6.5 y 2010 Mag. 7.2 (SSN, 2010). Siendo este último el causante de daños estructurales irreparables en la clínica (Rangel, 2010). En consecuencia, tras una serie de peritajes, se tomó la decisión de demolerla y construir una nueva clínica en el mismo predio.

1.2 Proyecto

La nueva construcción de la UMF-4 cuenta con un área de desplante de aproximadamente 1,400 m² y un solo nivel. Las cargas de servicio varían en un rango de 16 a 60 ton.

Debido a cuestiones administrativas se decidió reconstruir la clínica en el mismo predio, lo que

obligaba a mejorar el suelo del sitio para mitigar el fenómeno de licuación.

1.3 Condiciones del suelo

La estratigrafía reportada en el estudio de mecánica de suelos es la siguiente (Valverde, 2011):

Estrato 1, de 0 a 1.2 m de profundidad: Arcilla de color café con tonos rojizos, 4<N<8. (N=número de golpes para hincar los 30 cm centrales del muestreador en una prueba de penetración estándar).

Estrato 2, de 1.2 a 10.0 m de profundidad: Arena arcillosa de color café claro, 10<N<37.

Estrato 3, de 10.0 a 16.0 m de profundidad: Arcilla de color café con tonos rojizos, 0<N<9.

Estrato 4, de 16.0 a 18.5 m de profundidad: Arena gruesa con alto contenido de gravillas, N>50.

Estrato 5, de 18.5 a 30.0 m de profundidad: Arena arcillosa, 27<N<50.

El Nivel de Aguas Freáticas (NAF) se detectó a un promedio de 1.2 m de profundidad.

1.4 Evaluación del potencial de licuación

La evaluación del potencial de licuación de los estratos de arena se realizó empleando el procedimiento simplificado, establecido a partir de las investigaciones realizadas por Seed e Idriss (1971). El procedimiento simplificado considera las siguientes expresiones:

$$CSR = \left(\frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} \right) \approx 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma'_{vo}}{\sigma'_{vo}} r_d \quad (1)$$

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - N_{60}} + \frac{N_{60}}{135} + \frac{50}{(10N_{60} + 45)^2} - \frac{1}{200} \quad (2)$$

En base a una aceleración máxima de diseño de 0.36g, una magnitud de terremoto de 7.5, y la relación entre la razón de resistencia cíclica (CRR) y la razón de esfuerzos cíclicos (CSR) se determinó que las arenas arcillosas sueltas presentes debajo del nivel freático, eran potencialmente licuables hasta profundidades de 6.5 m aproximadamente. La Figura 1 muestra los resultados de los análisis de potencial de licuación.

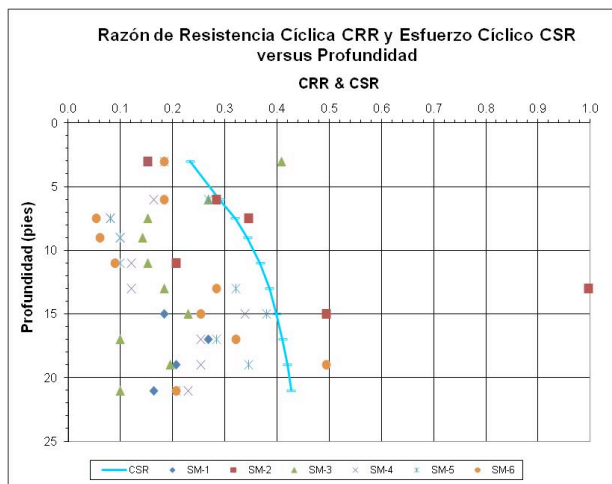


Figura 1. Resultados de Análisis de Potencial de Licuación.

De acuerdo a los resultados obtenidos de la evaluación del potencial de licuación se recomendó emplear pilas de agregado apisonado para la mitigación del fenómeno de licuación.

2 PILAS DE AGREGADO APISONADO

2.1 Descripción del proceso constructivo

El primer paso consiste en realizar una perforación de 76 cm de diámetro hasta la profundidad de diseño. En caso de ser necesario se empleará ademe metálico para garantizar la estabilidad de la perforación.

Posteriormente se introduce en la perforación grava limpia con tamaño de partícula de 5 a 10 cm para generar el bulbo de fondo cuyo fin es la

estabilización y el mejoramiento del fondo de la perforación para desplantar sobre él las siguientes capas de grava. El bulbo de fondo tiene un espesor apisonado de aproximadamente 76 cm.

Enseguida se colocan capas de agregado tipo base de carretera (cuando la aplicación sea mitigar licuación o acelerar asentamientos en arcilla se usa grava limpia) con un espesor suelto aproximado de 40 cm, que tras el apisonado dejan una capa de 30 cm de espesor final. Este procedimiento se repite hasta llegar al nivel de diseño de la cabeza de los elementos (Figura 2).

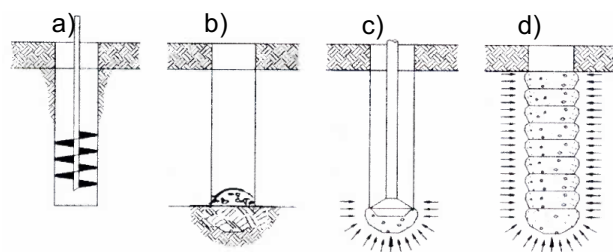


Figura 2. Procedimiento constructivo: a) Perforación, b) Colocación de grava, c) apisonado, d) esquema final de un elemento.

El apisonado del bulbo de fondo y las capas de agregado se realiza introduciendo un martillo y placa biselada que se encuentran montados en una excavadora, dentro de la perforación, tras haber depositado el volumen de grava necesario en cada capa.

Finalmente se prepara la superficie para el desplante de la cimentación superficial. En caso de haber realizado alguna excavación se debe compactar la superficie con equipo de compactación portátil.

2.2 Diseño de pilas de agregado apisonado para reducir el potencial de licuación

Los elementos de agregado apisonado ayudan a mitigar licuación en tres formas (Wissman, 1999):

Incremento de esfuerzos horizontales en la masa del suelo debido al desplazamiento horizontal de la grava durante el proceso de apisonado. Los esfuerzos horizontales aumentan de dos a tres veces respecto al esfuerzo horizontal previo a la instalación de los elementos. Dicho incremento de esfuerzos provoca que el eje horizontal sea en el cual se encuentra el esfuerzo principal mayor y por lo tanto se tenga una mayor capacidad de carga y resistencia a esfuerzos cíclicos.

Las pilas de agregado apisonado son considerablemente más rígidos que el suelo que los rodea, por lo tanto, ante un sismo dichos elementos tomarán un mayor porcentaje de los esfuerzos de corte (Figura 3). Asumiendo que los esfuerzos de corte en la masa del suelo y los elementos son proporcionales a la rigidez, la relación de los

esfuerzos de corte resistidos por la masa de suelo no reforzada (τ_s) y los esfuerzos de corte inducidos por el sismo (τ) puede ser expresada de la siguiente manera (Wissman, 1999):

$$\frac{\tau_s}{\tau} = \frac{CRR}{CSR} = \frac{1}{(1-R_a + R_a R_s)} \quad (3)$$

Donde R_a es el porcentaje de área de reemplazo y R_s es la relación de rigideces del elemento de agregado apisonado y el suelo nativo que lo rodea.

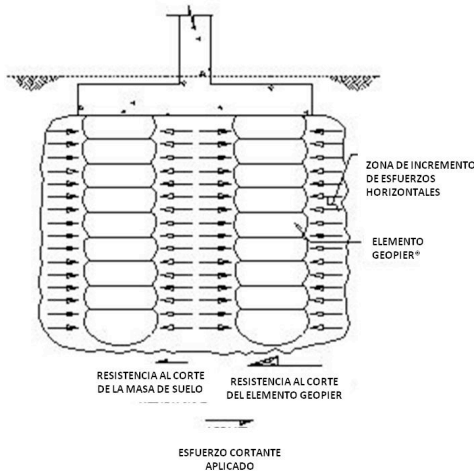


Figura 3. Reducción del potencial de licuación.

La razón de rigidez de los elementos de grava apisonada y la rigidez del suelo fue del orden de 6 para este proyecto. Las Pilas de Agregado Compactado se instalan con suficiente energía para crear un material altamente densificado. El elemento de grava y el suelo alrededor presentarán un comportamiento dilatante, y no son susceptibles a licuación. Por esta razón, se produce una reducción de los esfuerzos de corte aplicados a la matriz de suelo por el evento sísmico.

Las pilas de agregado pueden cumplir con la función de drenes de grava, ayudando a disipar la presión de poro en exceso provocada por un sismo.

La distribución propuesta para mitigar susceptibilidad de licuación en este proyecto consistió de 454 elementos distribuidos en un arreglo cuadrangular que cubre la totalidad del desplante de la estructura. Adicionalmente se instaló un anillo exterior de elementos alrededor de la estructura para crear una zona de mitigación y confinamiento exterior.

Por otro lado, se instalaron elementos adicionales para el apoyo de las zapatas de la estructura tomando en cuenta las cargas aplicadas.

2.3 Apoyo de Cimentaciones usando Pilas de Agregado Apisonado

Las Pilas de Agregado se diseñan para controlar asentamientos para satisfacer los criterios específicos del proyecto. Los asentamientos totales (S) bajo la cimentación se estiman sumando el asentamiento en la zona del suelo reforzado (zona superior, S_{uz}) y el asentamiento de la zona bajo la punta de los elementos (zona inferior, S_{lz}) (Figura 4).

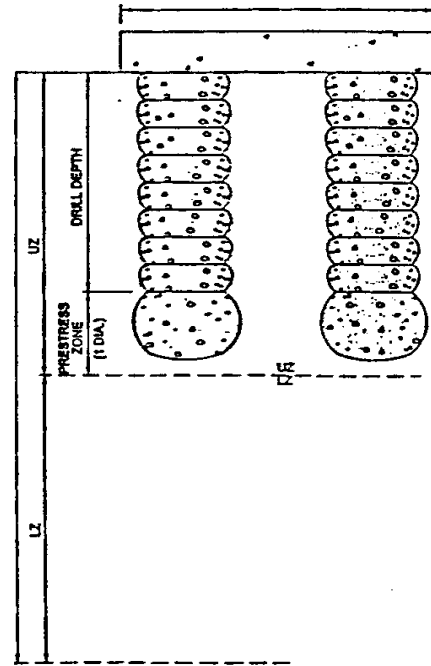


Figura 4. Modelo de 2 Capas

2.4 Zona Superior

El procedimiento para calcular los asentamientos en la zona superior se basa en una analogía de resortes (Lawton y Fox 1994, Wissmann y Fox 2000) como se muestra en la Figura 5.

Los elementos actúan como resortes rígidos, mientras que la matriz de suelo entre ellos actúa como resortes blandos. Los esfuerzos aplicados a los suelos reforzados se distribuyen de acuerdo a la rigidez relativa entre el elemento de grava y el suelo (R_s) y la razón de área de reemplazo o área de cobertura de las pilas de agregado (R_a).

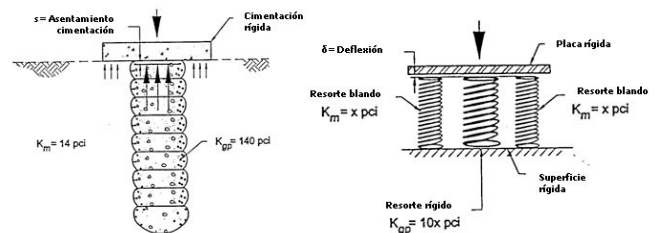


Figura 5. Modelo reológico de zona reforzada

El procedimiento incluye la hipótesis de que la cimentación es rígida en relación con el suelo de apoyo, de modo que el asentamiento de las pilas de agregado apisonado será igual al asentamiento de la matriz de suelo.

El esfuerzo aplicado en la cabeza de las Pilas de Agregado Compactado (q_g) depende del esfuerzo de contacto promedio de la cimentación (q), la relación de rigidez entre las pilas de agregado y la rigidez del suelo (R_s), y la relación entre el área seccional de las pilas de grava y el área de las zapatas (R_a).

El módulo de rigidez (k_g) se define como la razón del esfuerzo aplicado en la cabeza del elemento y la deformación vertical resultante.

El asentamiento en la zona superior (S_{uz}), es la razón entre el esfuerzo aplicado en la cabeza de la Pila de Agregado Compactado y el módulo de rigidez del elemento, ecuación 4.

$$S_{uz} = \frac{q_g}{k_g} \quad (4)$$

El asentamiento total de las cimentaciones apoyadas en el suelo reforzado se obtiene con la siguiente expresión:

$$S = S_{uz} + S_{lz} \quad (5)$$

Siendo S_{lz} el asentamiento en la zona inferior.

2.5 Zona Inferior

Los asentamientos en la zona inferior bajo la zona reforzada con elementos de agregado se calculan usando las teorías convencionales de elasticidad (Terzaghi y Peck, 1967), con valores de módulo de elasticidad interpretados de pruebas de laboratorio o pruebas in-situ, o bien, mediante ensayos de consolidación. El método supone que los esfuerzos inducidos en la zona inferior se pueden estimar usando soluciones para una cimentación apoyada en un medio elástico semi-infinito. Esta suposición se considera conservadora.

2.6 Proceso constructivo UMF-4, Ejido Durango

El objetivo principal del mejoramiento de suelos para el proyecto de la UMF-4 era la mitigación del fenómeno de licuación. Debido a que en el sitio se encontraron arenas sueltas con presencia de nivel freático se requirió la colocación de ademe metálico para conservar las perforaciones abiertas.

Por ello, para la colocación y retiro gradual de los ademes fue necesario agregar una grúa mecánica y un vibrohincador (Figura 6) a la cuadrilla típica que consiste en una excavadora, una perforadora y un minicargador.



El proceso consistió en instalar un ademe de longitud total de 5.4 m empleando un vibrohincador marca ICE modelo 44-25. Posteriormente se retiraba el suelo del interior del ademe metálico con una perforadora Soilmec SR-210. Finalmente se deposita el volumen necesario de agregado para cada capa del elemento con el minicargador y se apisona cada capa con un martillo que aplica una alta energía y frecuencia de compactación (Figura 7). Cabe mencionar que una vez que la grava se encontraba dentro de la perforación, el ademe se levantaba aproximadamente 30 cm para garantizar que la grava se desplazara libremente hacia los costados durante el proceso de apisonado.

Figura 7. Apisonado de grava en el interior del ademe.



3 PRUEBA DE MÓDULO

Con el objetivo de comprobar el comportamiento de los elementos in situ y verificar que los parámetros de diseño se cumplen en campo, se realiza una prueba de módulo en un elemento construido explícitamente para este fin.

La carga aplicada al elemento se irá incrementando gradualmente hasta alcanzar el 150% del esfuerzo de diseño registrando las deformaciones presentadas en cabeza y punta. Las deformaciones en punta se miden por medio de dos testigos colocados sobre el bulbo de fondo. Las deformaciones registradas en la punta deberán de ser mínimas, lo cual nos permite comprobar que la carga se disipa por fricción.

Figura 6. Vibrohincador alzando gradualmente el ademe.

A partir de la curva esfuerzo-deformación obtenida (Figura 8), se determina el módulo de rigidez del elemento como la razón del esfuerzo aplicado en la cabeza y la deformación vertical medida. Verificando así, que los criterios de diseño se cumplen en campo.

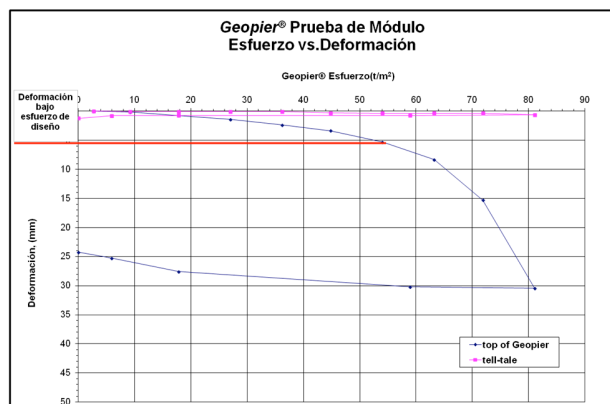


Figura 8. Curva esfuerzo-deformación de prueba de módulo.

Tras la ejecución de la prueba de módulo se pudo verificar que la rigidez del elemento de agregado excedió la rigidez considerada para el diseño. Así mismo, se obtuvo una deformación de aproximadamente 5 mm bajo el 100% del esfuerzo de diseño.

De esta forma se prevé, que ante un evento sísmico, los elementos, considerablemente más rígidos que el suelo que los rodea, tomaran un porcentaje mayor de los esfuerzos de corte, reduciendo así la carga al suelo. Adicionalmente, debido a que la grava empleada no contiene finos, las pilas de agregado podrán proporcionar drenaje radial, actuando como drenes de grava, para disipar la presión de poro en exceso que se pudiese generar durante un sismo.

4 CONCLUSIONES

La Unidad de Medicina Familiar No. 4 ubicada en el Ejido Durango del Valle de Mexicali, B.C. sufrió graves daños producto del fenómeno de licuación tras el sismo de magnitud de 7.2 grados Richter ocurrido el 04 de Abril del 2010. Una serie de peritajes estructurales concluyeron que los daños eran irreparables y por lo tanto la estructura debería de ser demolida y reconstruida.

Con el fin de mitigar el fenómeno de licuación se instalaron 454 elementos de agregado apisonado en un arreglo geométrico cuadrangular cubriendo el desplante de la estructura y un anillo exterior de confinamiento. Para su construcción fue necesario el uso de ademes metálicos instalados por medio de

un vibrohincador para soportar las paredes de las perforaciones.

Adicionalmente, se realizó una prueba de módulo para determinar la rigidez del elemento en campo, la cual excedió la rigidez considerada en el diseño. La deformación obtenida del elemento en la prueba ante el 100% del esfuerzo de diseño fue de 5 mm.

Ante un futuro evento sísmico las pilas de grava tomaran un mayor porcentaje de los esfuerzos de corte, debido a que son considerablemente más rígidos que el suelo que los rodea. Complementariamente, los elementos ayudarán a drenar radialmente las presiones de poro en exceso. Las pilas de grava apisonada son un método efectivo para mitigar licuación y controlar asentamientos.

REFERENCIAS

- Lawton E. C. y N. S. Fox (1994). "Settlement of structures supported on marginal or inadequate soils stiffened with short aggregate piers." Geotechnical Specialty Publication No. 40: Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, ASCE, 2, 962-974.
- Rangel J. L. (2010). Efectos geotécnicos y estructurales observados en el valle y ciudad de Mexicali, provocados por el sismo El mayor-Cucupah del 4 de Abril del 2010, XXV RNMSIG, SMIG.
- Seed B. H. e I. M. Idriss (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, Journal of the soil mechanics and foundation division, Vol. 97 No. 9, Sept., pp 1249-1273.
- Servicio Sismológico Nacional, (2010). Sismo de Mexicali, BC. Del 4 de abril de 2010, Mag. 7.2.
- Terzaghi K. y R. B. Peck (1967). "Soil Mechanics in Engineering Practice", John Wiley and Sons, New York, New York.
- Valverde H. y Barrera C. (2011). Estudio De Mecánica De Suelos Para El Proyecto "Unidad Medico Familiar 4" Del Instituto Mexicano Del Seguro Social, Ejido Durango, Valle de Mexicali, B.C.
- Wissmann K.J., Lawton E.C. y Farrell, T.M. (1999). "Behavior of Geopier-supported foundation systems during seismic events", Geopier Foundation Company, Inc., technical bulletin no. 1.
- Wissmann K.J. y N.S. Fox (2000). "Design and Analysis of Short Aggregate Piers Used to Reinforce Soils for Foundation Support." Proceedings, Geotechnical Colloquium. Technical University Darmstadt. Darmstadt, Germany. March, 2000.