

## **INTRODUCCIÓN SEMINARIO MEJORAMIENTO DE SUELOS Y FUNDACIONES ESPECIALES**

Buenos días estimados colegas, deseo antes que nada agradecer al CDT de la CChC y a los destacados expositores (socios de SOCHIGE en su mayoría) quienes hacen posible la realización de este importante evento. SOCHIGE tiene como propósito difundir el conocimiento de la Ingeniería Geotécnica en sus diversas áreas para el desarrollo sustentable y eficiente de nuestro país. Y por ello aprovecho de invitar a quienes aún no son socios a inscribirse en SOCHIGE.cl y a participar de las actividades programadas. Desde ya los invitamos a participar en el próximo X CChG en Valparaíso el próximo año 2018.

### **Técnicas de Mejoramiento de Suelos y Fundaciones Especiales**

Históricamente se ha tratado de mejorar las propiedades resistentes de suelos blandos y sueltos, saturados, licuables, muy compresibles (por ejemplo, aztecas en el lago de ciudad de México, humedales, esteros y lagunas de Concepción y terrenos ganados al mar para puertos y astilleros). Cabe hacer notar que durante las últimas décadas (siglo pasado), la Ingeniería Geotécnica ha tenido un gran avance en conocimientos teóricos y prácticos junto con el desarrollo de técnicas innovadoras que han posibilitado mejorar la calidad geotécnica de suelos que de otra forma no permitiría la construcción de estructuras cada vez más desafiantes (más grandes y en suelos menos resistentes). Dado que Chile se encuentra en una zona sísmica muy activa con sismos muy fuertes, resulta imperativo mejorar las propiedades del suelo de fundación para mitigar los peligros sísmicos. Condiciones inapropiadas para fundar sobre un suelo están generalmente asociadas con asentamientos diferenciales del suelo que pueden inducir grandes daños como agrietamientos o inclinación de las estructuras. Tales asentamientos pueden ocurrir de forma estática o sísmica y también pueden ocurrir grandes deslizamientos sísmicos o daños irreparables como colapsos de puentes y caminos (27F2010).

La implementación de técnicas de mejoramiento de suelos y de fundaciones especiales tiene la particularidad de ser generalmente impulsadas y desarrolladas por empresas de ingeniería en vez de surgir de instituciones de investigación o universidades. No es

casualidad entonces que los expositores sean ingenieros de empresas y no de universidades. Ha ocurrido que las investigaciones y teorías han surgido después de desarrollada la técnica o el método de mejoramiento. Es por lo tanto un área que está en constante estudio para reducir el empirismo (localidad) y por ello se requiere estar al tanto asistiendo a congresos y seminarios como el de hoy y consultar constantemente la literatura técnica por nuevos equipos y métodos.

Basándose en el mecanismo para mejorar las propiedades de un suelo, las técnicas de mejoramiento de suelos se pueden dividir grosso modo en cuatro categorías o técnicas: densificación, refuerzo, inyección (de lechada o grouting por ejemplo) y drenaje. Estas técnicas pueden ser combinadas para resolver uno o varios problemas simultáneamente. La tarea del ingeniero es buscar la solución óptima desde el punto de vista técnico y económico.

### **I Densificación y técnicas de reemplazo**

Muy común aquí en la zona en proyectos pequeños, y no tanto, donde es posible remover solo un espesor pequeño y volumen pequeño de suelo para luego colocar grava o arena Bío Bío por ejemplo compactada por capas con rodillos.

### **Compactación dinámica o de impacto**

La empresa francesa Ménard Soltraitement se adjudica haber inventado y desarrollado el método de compactación dinámica, el cual data del año 1969. Este método densifica el terreno debido a la creación de ondas de alta energía por medio de golpes repetitivos dado por una masa en caída libre desde una altura que varía de 10 a 40 m sobre una grilla determinada de puntos. La masa, por lo general construida de acero y/o de hormigón armado, puede variar desde 6 a 40 toneladas y se deja caer de tres hasta ocho veces en cada punto. La profundidad a densificar es función de la energía o la magnitud de impacto. Para evitar el desarrollo de una costra o zona superficial de alta densidad de suelo que podría inhibir la transmisión de energía a una mayor profundidad, el suelo más profundo se densifica primero con una serie de golpes de alta energía (aumento de peso o altura de caída). Después de cubrir los cráteres producidos en la primera etapa (de preferencia con suelo granular bien graduado), se compacta el suelo ubicado a una profundidad intermedia utilizando un mayor número de caídas desde una altura menor con un mayor espaciamiento en la grilla (a menudo la mitad del espaciamiento de la

grilla original). Finalmente, se compacta el estrato superficial dejando caer el peso desde una altura más baja.

Aunque la compactación dinámica se ha utilizado con éxito en suelos cohesivos, su uso más común en Chile es para la mitigación de riesgos sísmicos en suelos arenosos potencialmente licuables. En Concepción, Talcahuano y Lirquen se ha empleado esta técnica.

Los edificios de departamentos entre el cerro Chepe y el puente Llacolén frente al río Bío Bío en el sector de Pedro del Río Zañartu, Concepción, fueron construidos como parte del proyecto de Mejoramiento de la Rivera Norte del río Bío Bío. Estos edificios fueron fundados exitosamente sobre suelos mejorados por compactación dinámica (Poblete, 1997; Bard et al., 2016). No se reportaron daños debido al sismo 27F2010. El galpón que hoy ocupa SODIMAC al lado de Plaza del Trébol en Talcahuano (originalmente para Home Depot) también consideró el mejoramiento del suelo de fundación por medio de compactación dinámica (Verdugo, 2001). Lo mismo la ampliación de puerto Lirquen.

### **Explosiones**

A pesar de que este método de densificación es muy económico, su uso se ve limitado porque produce fuertes vibraciones que pueden dañar estructuras aledañas o producir grandes movimientos del terreno (más que en compactación dinámica?).

Se requiere el uso de explosivos potencialmente peligrosos, cuyo uso y almacenamiento requiere de la aplicación de estrictas normas y regulaciones.

Su eficacia es difícil de predecir. No muy usado.

### **Técnicas de vibración, vibrocompactación, columnas de grava**

Consiste en el llenado de una perforación (columna) con grava bajo vibración en seco *Dry top feed system*.

Lo mismo se puede hacer, pero bajo agua y con la grava también bajo el agua sobre la columna. *Wet top feed method or blanket feed method*

También hay técnicas de impacto para densificar el material de relleno en las columnas. Esta técnica ha sido usada últimamente para edificios de departamentos de hasta 15 pisos en Concepción.

El éxito de la densificación por vibración de un suelo depende de varios factores, de los cuales el más importante es la granulometría del suelo y también la naturaleza del relleno usado para rellenar las columnas durante el periodo de retiro del vibrador. Los suelos que contienen cantidades excesivas de arena fina y partículas fina de limo son difíciles de compactar; para estos suelos se requiere un esfuerzo considerable para alcanzar la densidad relativa adecuada de compactación. A largo plazo la compactación por vibración resulta antieconómica en depósitos de suelo cuya granulometría contiene cantidades apreciables de grava y en general cuando la tasa de penetración de la sonda vibradora es pequeña.

## **II Técnicas de refuerzo del suelo**

El uso de geosintéticos o cualquier elemento introducido en el suelo para mejorar la resistencia como pernos de anclaje por ejemplo en taludes o cortes (soil nailing o suelo apernado) da nombre a lo que se conoce como suelo reforzado. El uso de suelo reforzado con geosintéticos como geomallas por ejemplo (o mallas metálicas o tiras de otros materiales) se usa cada vez más para la construcción de muros y reforzar taludes, los cuales demostraron ser buenas soluciones después del terremoto del 27 de febrero del 2010, especialmente en muros de estribos de puentes.

Las columnas de grava también pueden ser consideradas como refuerzo o las inclusiones rígidas de hormigón armado y por lo tanto también los pilotes hincados o de desplazamiento de madera u otro material que empujan el suelo lateralmente y lo densifican y a la vez sirven de apoyo para las estructuras.

## **III Técnicas de mezclado *soil mixing* e inyecciones**

El *Soil Mixing* es una mezcla mecánica que crea columnas de suelo mejoradas con cemento principalmente o cal.

Las inyecciones introducen en los poros del suelo o fisuras de rocas a tratar un producto líquido que por lo general es un mortero o lechada de inyección, el cual se solidifica aumentando la resistencia a través del tiempo. El objetivo básico de este tratamiento es el de impermeabilizar o fortificar los suelos porosos tales como suelos granulares (gravas y arena), rocas fisuradas o fundaciones defectuosas, incrementando de este

modo las propiedades resistentes y geohidráulicas (impermeabilidad). Es importante saber identificar en qué medios se pueden utilizar para remediar las condiciones naturales de los terrenos y también determinar cuales son los factores que intervienen para fijar las condiciones de empleo de las inyecciones.

Una inyección no se hace simplemente bombeando mortero, el comportamiento del terreno puede ser a veces impredecible debido a su heterogeneidad; por ello es necesario ver lo que ocurre al comienzo de la inyección para adoptar el método correspondiente.

Como el cemento ayuda a incrementar la resistencia de los suelos y la resistencia crece con el tiempo de curado, los suelos granulares y arcillosos con baja plasticidad son los más adecuados para la estabilización con cemento. Algunas arcillas (calcáreas por ejemplo) son más fácilmente estabilizadas por la adición de cemento, mientras que otras arcillas (sódicas e hidrogenadas), de naturaleza expansiva, responden mejor a la estabilización con cal. Por estas razones debe ponerse atención a la selección del material estabilizador. Por otro lado se debe decidir si la cantidad apropiada de cemento se va a mezclar con suelo en el terreno o en una planta mezcladora para luego llevar y colocar en terreno.

### **Inyección por reemplazo jet grouting**

Esta técnica mejora las características mecánicas y el comportamiento hidráulico del suelo (impermeabiliza). Consiste en la inyección de un material consolidante, a muy alta velocidad (chorro) a través de una o más boquillas de diámetro muy pequeño, lo cual permite obtener un tratamiento homogéneo y continuo del suelo, destruyendo su estructura original y creando un verdadero elemento estructural con características determinadas en función del suelo de origen. El método es utilizable para tratar una amplia gama de suelos desde gravas hasta arcillas.

Esta es una técnica donde se aplica una alta presión, consistente en el llenado de espacios y discontinuidades. Básicamente consiste en obtener chorros de lechada de cemento expulsado a través de toberas a velocidades muy altas, logrando así la rotura del terreno y su íntima mezcla con el mismo. La inyección se aplica a una cierta profundidad y en forma radial u horizontal creando así un mejoramiento cilíndrico. Luego se continúa hacia la superficie. La idea es superponer estas columnas antes de

que el cemento endurezca. El diámetro de estas columnas depende de las proporciones de aire, agua y cemento aplicadas. La inyección puede ser sólo de cemento o con aire, agua y cemento. Técnicas usadas para el colector de aguas servidas en Valparaíso y en estaciones del metro en Santiago en el casco histórico línea 5.

#### **IV Técnica de drenaje**

Cualquier técnica que haga bajar o deprimir el nivel freático puede conducir a la consolidación del suelo y por ende al aumento de su resistencia al corte y rigidez (canalizaciones UdeC, drenes verticales o mechas drenantes, vacuum consolidation o consolidación por vacío, precarga). Por otro lado contar con sistemas de drenaje que funcionen ayuda a disipar el exceso de presiones de poros cuando se aumenta el nivel freático por eventos de lluvia o aumenta el exceso de presiones de poros debido a eventos sísmicos fuertes.

Columnas de gravas, o sistemas de drenes.

#### **Nuevas técnicas de mejoramiento de suelos**

De las cuales tal vez no se hablará en el seminario.

Nuevas técnicas de mejoramiento de suelo han surgido principalmente para mitigar el potencial de licuación y están en investigación: introducción de burbujas de aire, bentonita, saponita, bacterias (microbios que reducen la permeabilidad y aumentan la rigidez del suelo), y otros elementos químicos que actúan a nivel molecular.

Inyección de resinas URETEK y mezcla de suelo con fibras plásticas de alta resistencia,

#### **Fundaciones especiales** (listado, no hay tiempo para detallarlas)

Pilas de socalzado ancladas, muy usadas en Santiago. Pilotes anclados, muros anclados (muy usados en Lima, Perú), muros pantalla anclados (algo usados en la zona, deberían usarse más), muros Berlins anclados (muy usados en Concepción y alrededores), barrettes anclados, soil nailing (muy usados en la zona), mallas ancladas verdes con vegetación (poco usadas acá), micropilotes, jet grouting, top down con pantalla de pilotes o muro pantalla, etc. Las fundaciones especiales son una gran área por si sola.

### **Finalizando**

Las técnicas de mejoramiento de suelo son diversas y requieren de una correcta evaluación para su aplicación eficaz. Se debe evitar realizar un empeoramiento del suelo (situación que a veces ocurre). De Concepción al sur existe una gran necesidad de aplicación de técnicas de mejoramiento de suelo y fundaciones especiales para resolver principalmente las fundaciones de estructuras sobre suelos blandos, sueltos, saturados, licuables, compresibles, etc.

### **Temas pendientes directamente asociados con el éxito de las técnicas de mejoramiento y fundaciones especiales adoptadas**

Exploración geotécnica y ensayos de laboratorio adecuados previos, durante y después del mejoramiento y para fundaciones especiales óptimas (CPT, DMT, PMT, SPT automático con medición de energía, veleta de corte, compresión no confinada, triaxiales, etc.).

Técnicas de monitoreo geotécnico en el tiempo que validen el diseño, es decir, que demuestre si el diseño es o no adecuado u óptimo (subdimensionado o sobredimensionado), lo cual permita optimizar diseños y evitar daños (ahorrar dinero a todo evento sub o sobredimensionado).

Finalmente reiterar la invitación a ser socio de SOCHIGE especialmente cuando SOCHIGE cumple 50 años y realizará el décimo CChG en Valparaíso el próximo año.

Felipe Villalobos

Vicepresidente SOCHIGE

Miércoles 17 de mayo 2017, Radisson Petra, Hualpén, Concepción