GEOTECNIA ESTRUCTURAL, SEGURIDAD Y RIESGO SÍSMICO DE LA INFRAESTRUCTURA EN LATINOAMERICA

Rómulo Sebastián Vidal Martínez

Ingeniero Civil UACH
MSc. MBA UChile

Resumen

En el desarrollo de la Geofísica y Geotécnia- Estructural, existen algunos aspectos que queremos evidenciar y tratar. Primero desde el estado del arte, mostrar un compendio y muestra de eventos en el desarrollo de la actividad para luego, mostrar algunos alcances que debiéramos considerar, el evaluar técnica y previamente la factibilidad del terreno dado el impacto de los resultados que pueden decantar en errores y otras en fallas que revierten impacto en la economía de países y de las personas.

Abstract

In the development of Geophysics and Geotechnical-Structural, there are some aspects that we want to highlight and treat. First from the state of the art, show a compendium and show of events in the development of the activity to later, show some scopes that we should consider, the technical evaluation and previously the feasibility of the land given the impact of the results that can decant into errors and others in failures that revert impact on the economy of countries and people.

1 Introducción

La Geotecnia Estructural y los fenómenos del suelo ligado al diseño de infraestructura de un país, afectan directamente la inversión Latinoamericana. Considerando los requerimientos de equipos multidisciplinarios de ingeniería, así como también la actualización o adquisición de la normativa adecuada para los nuevos desafíos en torno a riesgos de eventos naturales de gran magnitud que destruyen parte de un país afectando directamente al PIB.

Más allá de la constante actualización y rigurosidad con la que vemos la ingeniería estructural y la sísmica, existen factores que son determinantes en la aplicación y el análisis preliminar de la problemática en la inversión en materia de infraestructura, como lo son, las variables geográficas, condiciones propias del subsuelo, conocimiento geológico y geotécnico, sin afectar aun las condiciones requeridas con la arquitectura y el diseño mismo de la aplicación, en solución a la infraestructura existente. Así un pequeño o gran desafío, puede tener más de una variable al momento de tomar decisiones de inversión, donde dominan la seguridad y la rentabilidad del mismo, adicionales a la cuestión estética.

Por eso en este enfoque, es de vital importancia la definición de seguridad y la rentabilidad del mismo, donde el suelo posee una relación directa con la estructura. Esto es comparable a tener una segunda edificación bajo las fundaciones del actual proyecto, por lo tanto el diseño no solo se ve limitado a una normativa adecuada u estudio superficial, sino al entendimiento de este comportamiento por medio de las condiciones de diseño sísmico local, condiciones y factores del comportamiento, su relación con el contexto sísmico y de riesgo, interacción con mapeos sísmicos y conocimiento geotécnico – geofísico válidos.

Pocos en Latinoamérica tienen la experiencia y habilidades para poder identificar condiciones locales que vulneran la factibilidad, seguridad y rentabilidad del proyecto. Inversiones de velocidad, situaciones de riesgo, potencialidad de grietas, incluso cavernas bajo la superficie son determinantes para la adquisición de un punto geográfico adecuado, lo cual es fundamental para la decisión de inversión.

Casos como los del 27F y 16A son eventos que unen a ambos países en términos de querer actualizar, considerar aunar criterios que sirvan de base para la constitución de mejoras y criterios de diseño a aplicar en los buenos proyectos de desarrollo en infraestructura, Minería, Industrial, Habitación y de edificación relevantes para el desarrollo seguro de un País.

El manuscrito debe tener, como contenido mínimo, una sección de introducción con una breve fundamentación teórica, una sección destinada a la metodología empleada o desarrolllo de un modelo, una sección de resultados y análisis, conclusiones y referencias.

2 Geotecnia Estructural para la Inversión Latinoamericana.

Latinoamérica, por lo general, se encuentra en una de las zonas de más alta complejidad tectónica del mundo, presentando una permanente actividad sísmica, la cual es detonante de vulnerabilidad en materia de infraestructura en países tales como Chile, Ecuador y México. La combinación de eventos sísmicos muy superficiales y de estructuras que no cumplen con estándares de diseño sismorresistentes implica mayor probabilidad de daño.

Esta vulnerabilidad sísmica genera un gran impacto en el costo de vidas humanas, daños materiales y afectación de servicios básicos, afectando directamente el PIB de un país, tal cual se vio reflejado en el terremoto 27F de Chile de magnitud 8.8, en donde se estima más de 800.000 damnificados, 580 personas fallecidas, 370.000 viviendas que resultaron destruidas o con importantes daños, costo estimado 18% del PIB, daños de 30.000mil US$[1]. Un caso emblemático corresponde al colapso del edificio Don Tristán, detectándose fallas en los pilares y muros de corte, producto de que los muros interiores y el 50% de las fachadas se descontinuaban en el piso zócalo, cayendo sobre pilares de pequeña dimensión, derivando en que el edificio tuviera un sistema de cargas laterales inadecuado e insuficiente, siendo el origen principal del colapso. Por lo cual, presumiblemente y materia de un proceso, no se cumplió con la filosofía de diseño sísmico chileno ni con los requerimientos de armadura. Por otra parte y en misma condición de procesos civiles y penales, el colapso emblemático del edificio Alto Rio de Concepción, nos indica la importancia de la clasificación sísmica del suelo, ya que el cálculo estructural se realizó en base a un suelo firme (tipo II) y no suelo blando arenoso (tipo III) como debiese ser. Esto debido a que la empresa optó por lo más riesgoso, lo cual significaba construir con un menor estándar o menor exigencia técnica, por lo cual los parámetros fijados para el espesor de muros y los fierros de la armadura estuvieron por debajo de la normativa sísmica, provocando dicho colapso[2]

Como así también se ha visto en otros países con resultados más devastadores.

Últimamente, en el terremoto 19S de México de magnitud 7.1 en Oaxaca y Chiapas, se estima más de 40 edificios, de mediana altura, destruidos, 430 personas fallecidas, costo estimado 0,1% del PIB, daño de 2.000millones US$. Por otra parte, en el terremoto 16A, 2016 de Ecuador de magnitud 7.8 se estiman 480 personas fallecidas, costo estimado 3% del PIB, daño de 3.000millones US$; y en el terremoto de Italia de magnitud 6.2 en el centro de Italia, se estima 120 personas fallecidas.

[1] Fuente: EM-DAT 2012

[2] https://repositorio.uc.cl/bitstream/handle/11534/2892/590853.pdf?sequence=1

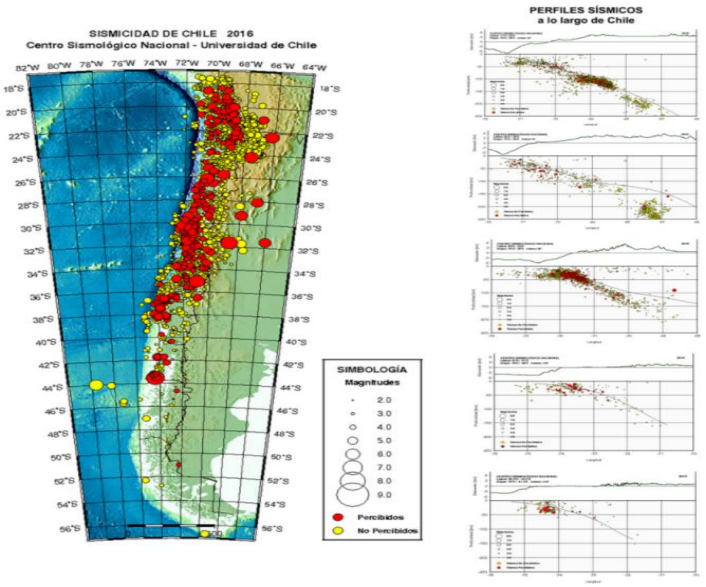

Figura 1. Sismicidad de Chile, Fuente: Centro sismológico Nacional Universidad de Chile

Para el caso de Chile, además del costo de reconstrucción post-desastre, cuya Inversión fue de 428.441 millones de pesos para infraestructura en el período 2010-2014 recuperando el 90% de la infraestructura crítica del primer año de la reconstrucción[3], es importante considerar la necesidad de fortalecer los planes de acción preventiva ante un posible evento sísmico a nivel de infraestructura. Es ahí donde la **geotecnia estructural** toma importancia en la inversión latinoamericana, ya que para los nuevos desafíos en torno a los riesgos eventuales de naturaleza sísmica, se hace imperativo estudiar los fenómenos del suelo ligado al diseño de infraestructura de un país y los requerimientos que involucra, tanto en la **revisión de normativa antisísmica**, la fiscalización sobre su cumplimiento e integración de consideraciones para asegurar la resiliencia de las construcciones, como en la **Ingeniería multidisciplinaria** que requiere.

[3] Información y detalles disponibles en MOP, actualmente considerado para los mapas de inundación que elabora el SHOA, en consenso con la ONEMI

Figura 2. Imagen 1: Colapso Edificio Don Tristán en la ciudad de Santiago, Foto: emol.cl. Imagen 2: Rescatistas trabajan en la ciudad de Pedernales, Foto: Reuters.

Figura 3. Colapso Edificio Alto Río en la ciudad de Concepción, Foto: emol.cl.

Inversión en materia de infraestructura

Como análisis previo de la problemática de inversión en materia de infraestructura, es importante considerar dos aspectos fundamentales: **la seguridad y la rentabilidad** del mismo. Estos dos aspectos deben siempre considerarse al realizar una gestión de riesgos para una oportuna respuesta de la infraestructura en situaciones de desastres, ya que el suelo posee una relación directa con la estructura; por lo tanto su comportamiento afecta en el cálculo y seguridad de la estructura y además en su rentabilidad principalmente en obra gruesa.

Chile, posee grandes avances a nivel latinoamericano, al incluir cada vez más estos conceptos en sus estudios de infraestructura en el contexto de la reducción de riesgos, desarrollando contenidos de diseño sísmico en base a las deficiencias observadas en el terremoto 27F. El 13 de Diciembre del 2011 se estableció el Decreto Supremo MINVU N°61: "Diseño sísmico de edificios[4]", el cual modificó la norma de diseño sísmico NCh. 433 of. 1996 modificada en 2009, mejorando la tipificación de suelos ya que existía una categoría muy amplia para clasificar los suelos blandos, es decir, se elaboró una nueva **clasificación para los tipos de suelos** en base a criterios más adecuados; reconociéndose suelos

[4] Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

tipo A, B, C, D y E que remplazan a los tipo I, II, II y IV de la normativa anterior. Un ejemplo de lo ocurrido es en la comuna de Macul, en donde se indicaron que edificios cercanos con distintas clasificación de suelos, uno resistió bien el sismo (tipo suelo II), pero el primero quedó con daños severos (tipo suelo III)[5]. Esto no se debía necesariamente a la negligencia en los estudios de mecánicas de suelos, sino a los escasos parámetros que les fija una ordenanza no actualizada.

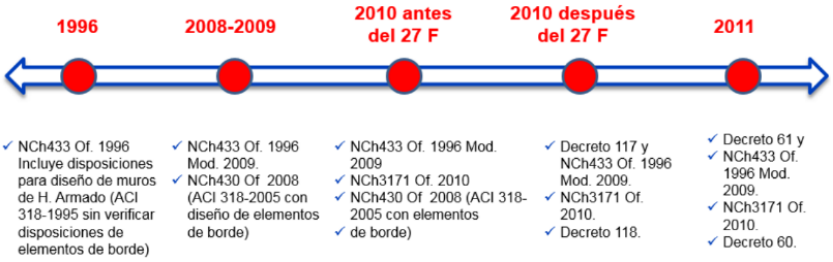

Figura 4. Evolución en los últimos años de la normativa Chilena relacionada con edificios de hormigón armado., Fuente: Revista de Ingeniería Innova. Vol. 8 (2014)

Por tanto, uno de los puntos importantes de la actualización de la norma sísmica, ahonda en el estudio superficial de suelos, implicando la obtención de parámetros más relevantes, cuyo principal factor de clasificación para ellos es la velocidad de onda de corte Vs30, en donde inicialmente se obtiene un único valor promedio de velocidad de ondas de corte, en los primeros 30 metros, proporcionando una correcta u precisa caracterización del suelo (seguridad) con un método simple y rápido (rentabilidad). Sin embargo debemos aceptar que existen falencias en el alcance y riesgo. Que necesitamos mencionar y comentaremos adelante.

En cuanto al espectro de diseño, en este decreto, se vio afectado por el factor S, el cual depende del tipo de suelo. Donde el espectro elástico de diseño se ve más restringido para una mayor variedad de tipos de suelos.

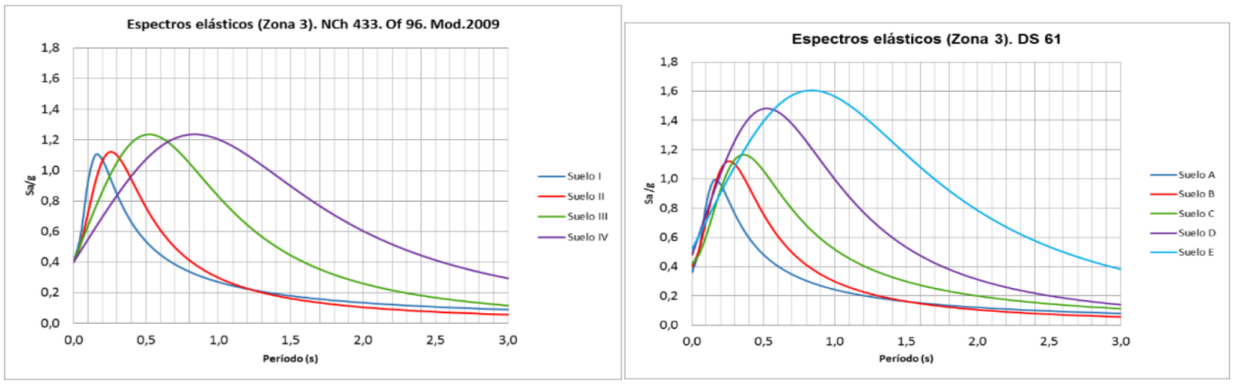

Figura 5. Imagen 1: Espectros elásticos (Zona 3) Nch433 Of.96 Mod.2009 / Imagen 2: Espectros elásticos (Zona 3) DS.61. Fuente[6]

[5] http://ciperchile.cl/2010/08/26/a-seis-meses-del-terremoto-los-cambios-a-las-normas-de-la-construccion-que-impulsa-la-ministra-matte/

[6] Implicancia de normas NCh 433 – Decreto 61 y NCh 430 – Decreto 60 en el diseño de muros, en edificio de hormigón armado (Revista Ingeniería Innova,2014)

Es importante, además, considerar que el diseño no solo se ve limitado a una normativa adecuada o a un estudio superficial, ya que los edificios igualmente sufren daños colaterales producto de una clasificación poco competente, sino al entendimiento de este comportamiento por medio del contexto sísmico y de riesgo. Por lo cual es imperativo considerar **otras variables** que deben interactuar de manera multidisciplinaria con lo establecido por el diseño sísmico.

Materia de este informe y lentamente en materias de estudios, nos hemos dado cuenta que es primordial tener el **conocimiento geológico y geotécnico** de las zonas sísmicas, ya que inicialmente y por ejemplo, se pudo observar que el terremoto 27F generó grandes deslizamientos de rocas a lo largo de la cordillera de la Costa, entre las ciudades de Valparaíso y Valdivia, afectando el acceso de caminos, por lo cual se realizó un inventario de estos eventos basado en imágenes satelitales y trabajo en terreno, logrando detectar 288 remociones en masa, que incluyen deslizamiento y caídas de rocas, ocurriendo generalmente en rocas sedimentarias poco competentes (arcillas, limos, areniscas). Análogamente, Ecuador posee muchas ciudades construidas cerca de conos volcánicos activos donde la materia de riesgo geológico geotécnico para fines de infraestructura aún estamos al debe como latinoamericanos.

Este punto, implica el desarrollo necesario de mapeos sísmicos y la interacción con mapas geológicos y cartográficos existentes. A modo de ejemplo, En Chile estamos acostumbrados a los terremotos de subducción (choque de placas) ya que lo comprendemos mejor y somos eficaces en generar medidas de mitigación. En contraste sismos producidos en **fallas geológicas**, sismos corticales, son una rareza en Chile, por tanto sus efectos no están incorporados en la norma sísmica chilena, es decir *los requisitos de diseño sísmico no distingue la naturaleza del mecanismo de liberación de energía que producen las ondas sísmicas en la superficie.* Además la calibración de la norma de diseño se efectúa sobre la base de registros de aceleración, obtenidos de los sismos de mayor magnitud los cuales, en términos de frecuencia e intensidad, han sido mayormente del tipo interplaca: Valdivia (1960), Valparaíso (1985) y Maule (2010). Por lo cual, aunque el riesgo en fallas geológicas sea muy pequeño, el parámetro Vs30 es determinístico en la evaluación de riesgo y elaboración de mapeos sísmicos en dichas zonas.

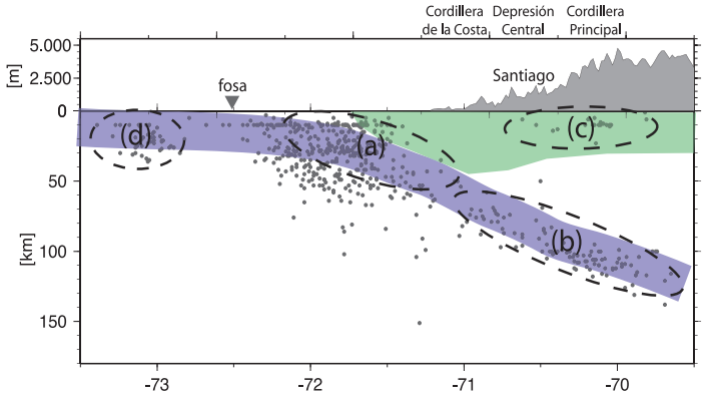

Figura 6. Perfil Esquemático con la sismicidad del catálogo NEIC, registrada entre 1973 y 2007 de la zona la latitud 33,5´S. Cada punto representa la posición esquemática. El color violeta representa la posición esquemática de la placa de Nazca y verde, la placa Sudamericana. Las líneas punteadas

indican la posición de las principales fuentes sismogénicas: a. interplaca; b. interplaca de profundidad intermedia; c. corticales y d. outer-rise[7]

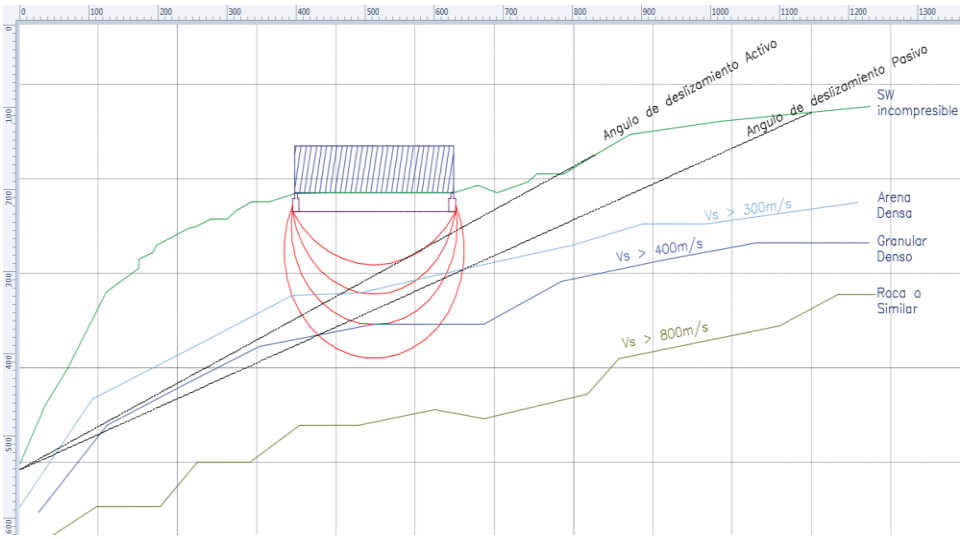

Figura 7. Esquema de comportamiento teórico de bulbo global. Informe Mecánica de suelos Localidad Santo Domingo.

La forma de explorar el suelo para su clasificación sísmica también sufrió mejoras, complementando la NCh 1508 Of. 2014 – Geotecnia, Estudio de mecánica de suelos. Esto debido principalmente a que según lo estipulado en el Art. 5° del Decreto Supremo N°61, la respuesta sísmica de un depósito de suelo y la solicitación sísmica que se desarrolla sobre la estructura (interacción suelo - estructura) depende de:

- La rigidez a bajas deformaciones de los estratos superiores
- Período fundamental del depósito de suelos
- Nivel de amortiguamiento
- Excitación sísmica propiamente tal

De esta forma, la clasificación de suelos se ha optado por centrarla en el parámetro que se estima más relevante en una primera aproximación, correspondiente a la **rigidez a bajas deformaciones** de los estratos superiores, la cual se determina a través de la velocidad de las ondas de corte Vs30, obteniendo ondas superficiales y ondas P y S; además se conoce de forma indirecta el Módulo Cortante promedio del suelo, por ende en principio construimos obras más seguras, pero sin el conocimiento y comportamiento detalle de la edificación sobre el contexto profundo y de materia geológica geotécnica. Existen vacíos a considerar.

Por lo tanto, otro aspecto importante corresponde a las **condiciones del subsuelo**, ya que los efectos de las ondas sísmicas se ve afectada por los cambios en las propiedades del suelo, tal como, cambios volumétricos, suelos licuefactables, presencia de agua, presencia de cavernas, entre otros.

Un caso ocurrido en Latinoamérica, de estudio de riesgo geotécnico de una planta industrial, en donde se identificó derrame y filtración de líquidos no se conocía donde iban a parar. La Industria se ubicó morfológicamente en la rivera de un cauce fluvial que transporta sedimentos finos, por lo cual la obtención de un perfil estratigráfico sísmico por medio de la obtención de la velocidad de onda de corte a través del Ensayo, se determinó geométricamente la presencia de cavernas de agua subterránea que serviría de ductos naturales pero de alto riesgo para la edificación superficial. Esto además de ser un hallazgo en términos geológicos, de comportamiento del tiempo, de lavados de finos y la aparición de cavernas, constituye un cambio radical en los supuestos de diseño Estructural de la misma.

Se describe a continuación le integración de los cortes para identificar los sectores mencionados. Prueba de lo mismo, en terreno se identifican descensos en la superficie no antes relacionados a estas cavidades a media profundidad.

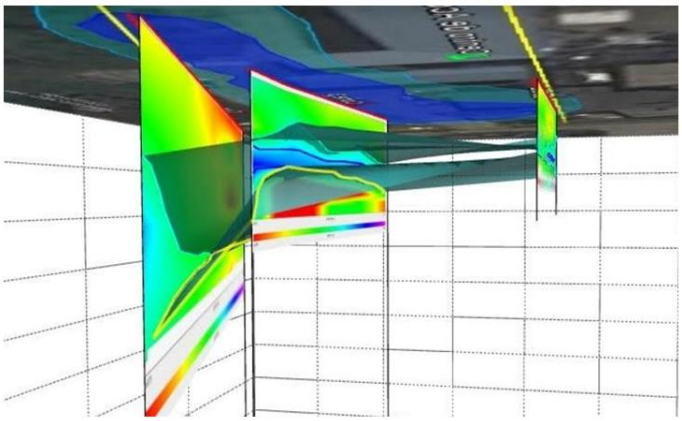

Figura 8. Perfil de velocidad Vs30 y VsP de tres cortes de perfiles estratigráficos y Modelo 3D simplificado. Estudio Acopio de Refinería.

Figura 9. Imagen en planta de las áreas que presentan una baja densidad y velocidad en la composición de sus capas.

Por otra parte, un caso ocurrido en Latinoamérica, de estudio de riesgo geotécnico para una estructura tipo Puente y es materia de conectividad país, en donde se presentaron desplazamiento de

5cm a nivel de estructura en varios sectores, se diagnosticaron inversiones de velocidad entre los 32m – 40m de profundidad, indicando la presencia de cavernas con posible presencia de material fino.

Figura 10. Fotografía Puente en estudio de riesgo geotécnico, Fuente: Elaboración propia.

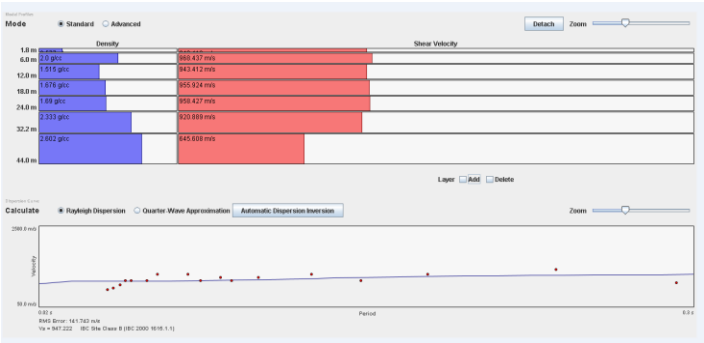

Figura 11. Fotografía Pick general de Velocidad de corte en estudio de riesgo geotécnico, Fuente: Elaboración propia.

Importante señalar, que existen actualmente descensos y desplazamientos laterales sin supuesto origen, sin embargo las irregularidades bajo la superficie de este puente a nivel geotécnico – estructural, son las que afectan de manera profunda la viabilidad de dicho proyecto, pero más aún en la seguridad de la región y conectividad de la misma. Si bien, la revisión y el diseño se realizaron acorde a normas y códigos estándares, la verdad que el alcance en la revisión en materia profunda dada la naturaleza de la inversión hoy cambia las condiciones base del diseño. Considerando además obras de mayor gasto social, proyectadas con una vida útil de 100 años. Mas en materia de revisión del proceso total de estas importantes, medianas y grandes obras, la estructura probablemente tendrá muy reducida su rentabilidad social y capacidad, probablemente 20 a 25 años de utilidad bajando el TIR, considerar diseños de puentes, represas, industrias, centrales, autopistas etc.

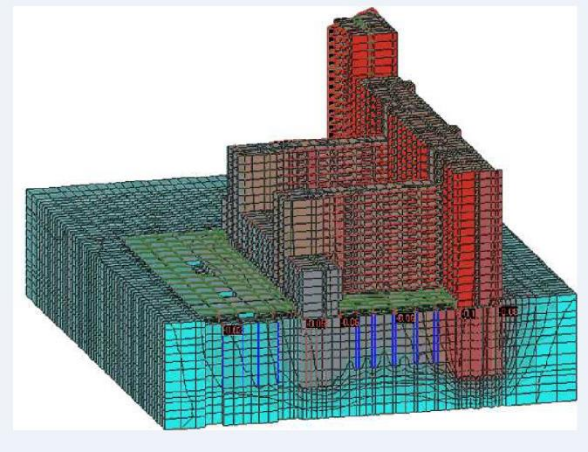

Figura 12. Esquema Bulbo de presiones para edificio de H.A. (fuente externa)

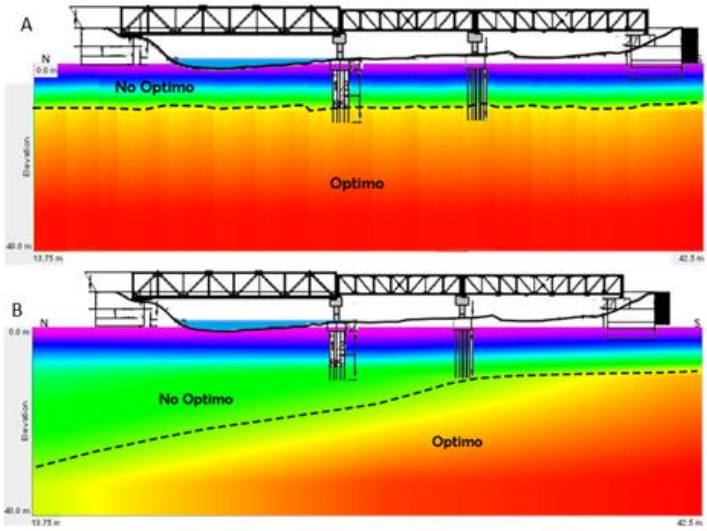

Figura 13. Perfiles Geofísicos con superposición de plano puente. A. Perfil con consideraciones de medición homogénea profundidad de fundación óptima. B. Perfil REMI con consideración geológica, profundidad de fundación no óptima

Hoy en día, pocos países en Latinoamérica tienen la experiencia y habilidad para poder identificar **condiciones de vulnerabilidad** en el comportamiento del suelo para incluirlos de manera multidisciplinaria en planes de riesgo sísmico para tener en cuenta en la infraestructura de un país y en su **decisión de inversión**.

En términos comparativos, Latinoamérica presenta un buen nivel de resiliencia en materia de eventos sísmicos, nos levantamos con el corazón. En materia Técnica debido a la conciencia de autoridades en la rigurosidad de aplicación de normas y recomendaciones y además el conocimiento real y factico de hechos como los mencionados, históricos y hallazgos. La Integración de la geotecnia estructural y sus

consideraciones, en todas las etapas de estudios de un proyecto son fundamentales, así la experiencia.

La factibilidad, seguridad y rentabilidad de un proyecto, en etapa de diseño, debe saber responder desde la infraestructura, pero también desde la geotecnia, en donde la interacción entre sismo – estructura, está dado por el conocimiento de suelo y su contexto de comportamiento. Por lo tanto, la implementación de ensayos que definan perfiles sísmicos, es fundamental para situaciones en donde hay que descartar presencia de:

- Inversión de velocidad
- Potencialidad de grietas
- Presencia de cavernas
- Situaciones de riesgo

En definitiva, Latinoamérica debiese incorporar en su cultura sísmica, a nivel de inversión, las nuevas metodologías de exploración de subsuelo, que permiten obtener parámetros más precisos, más seguros tanto para la caracterización de suelos como la presencia de fenómenos geológicos-geotécnicos-geofísicos.

Aun así, la tarea pendiente, es articular los diversos requerimientos a través de la Ingeniería multidisciplinaria, para obtener mayor información, ya sea en la elaboración de mapeos de peligros y vulnerabilidad sísmica, como en la aplicación de normativas de diseño y exploración.

Particularmente los casos 27F y 16A son eventos que unen además de la historia a ambos países en términos técnicos de querer actualizar, considerar aunar criterios que sirvan de base para la constitución de mejoras y criterios de diseño a aplicar en los buenos proyectos de desarrollo en infraestructura, Minería, Industrial, Habitación y de edificación relevantes para el desarrollo seguro de un País, lo cual se logra con el fortalecimiento e integración de la geotecnia estructural, en relación a la seguridad sísmica y rentabilidad del mismo.

Conclusión y Discusión

Según los antecedentes de inversión y rentabilidad de infraestructura, lo histórico de los terremotos y daño sobre las inversiones, se funda principalmente en antecedentes no conocidos sobre materias de estudio, geotécnico – geológico y comportamiento.

Según lo observado en LA los pesos propios de los edificios son muy distintos, cuando en ese sentido F= m x a donde la aceleración es la misma, la masa debe ser resguardada, sino no existe ni aislador y disipador que resista, estamos forzando un fenómeno fácilmente solucionable al menos previsto.

Edificios sobre el suelo deben incluso cambiarse de materialidad para ser más eficientes y eficaces al momento de evaluarse económicamente, crucial es el conocimiento geológico-geotécnico profundo y contexto. La materialidad y localización debiera primero basarse en la cuestión de viabilidad y factibilidad mas allá de la decisión estética, frente a un terremoto.

El riesgo y la rentabilidad de la infraestructura, tiene relación directa con los estudios y evaluación por grupos competentes de experiencia, no solo localmente sino experiencias compartidas en LA.

En este sentido la propuesta de una normativa latinoamericana y de conocimiento aumentado y de conjunto puede ser una realidad.

Según nuestra experiencia recomendamos hacer estudios hasta 40m de profundidad al menos, ya que eventos recurrentes se han encontrado a ese nivel, incluso mas, han cambiado la resolución de la infraestructura dado el cambio de supuestos iniciales

Existe una deuda histórica con los edificios construidos o los en proceso de construcción inmediatamente luego de terremotos, ya que han recibido energía y su estado ya no es incólume, sino más bien debe confirmarse el diseño y teoría con la revisión practica de su comportamiento real y su capacidad disminuida en la capacidad de tolerar mas energía.

Deberían existir programas de inspección instituido por organismos estatales, que teniendo en cuenta la tecnología actual, manden verificar edificios relevantes en su comportamiento si coincide con lo propuesto en los modelos. Sensores, mediciones, están disponibles a modo de garantizar para seguros y de la inversión del cliente.

Abiertos al conocimiento y al respeto de la educación en Latinoamérica, haremos un continente fuerte, seguro y permanente, para nuestras familias y seres queridos.

(1)

4 Agradecimentos

Mis personales agradecimientos siempre primero a Dios, a mis Padres y amigos, a mi cuna universitaria y a cada casa de estudio nacional e internacional, la fortuna de haber merecido tal cariño y cuidado como alumno becario de 6 becas de excelencia en esta región. Siempre agradecido de toda buena palabra y de toda crítica que nos permite mejorar personalmente y hacer desde nuestra esfera una mejor nación.