



COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE INSTALACIONES SUBTERRÁNEAS EN EL INTERIOR DE CAVERNAS

P. Pineda⁽¹⁾

⁽¹⁾ Consultor en Ingeniería Sísmica, PPN Ingeniería y Consultoría, patricio.pineda@ppningenieria.com

Resumen

En este trabajo se indican las diferencias que existen entre los fenómenos dinámicos que ocurren en superficie respecto de los subterráneos, basado en un análisis teórico de propagación de ondas en suelos para luego incorporar registros sísmicos, identificando los fenómenos de superficie y así calibrarlos en profundidad.

Se analizó el efecto de las ondas Rayleigh en un registro de aceleraciones del terremoto de 1985, en particular la estación de la UTFSM (roca), midiendo sus efectos en las aceleraciones peak y espectros de respuesta. De los resultados se concluye que para este registro, los efectos de las ondas Rayleigh tienen baja influencia en este análisis. Luego se estudia la propagación de ondas de corte en un estrato semi-infinito para varios registros sísmicos y diferentes características del estrato. Analizando las aceleraciones en profundidad para estratos rocosos (1500 m/s velocidad onda de corte promedio), se observan atenuaciones del orden del 30% a los 60 metros de profundidad, manteniéndose constantes bajo este nivel. Los resultados obtenidos muestran el comportamiento de un perfil de aceleraciones en profundidad, esto de manera teórica en base a modelos simplificados para identificar un fenómeno a considerar en el diseño de cada proyecto. Por lo anterior, es recomendable disponer de los parámetros que caractericen el suelo y registros sísmicos de la zona en estudio. Este alcance de este trabajo está orientado a analizar, evaluar y aplicar sus resultados a diseños estructurales, haciendo uso de conceptos geofísicos y geotécnicos que no forman parte de este estudio.

1 Introducción

Las instalaciones subterráneas son parte importante de la actividad minera en cavernas y se encuentran en diferentes etapas del proceso de la producción, operaciones con equipos de gran magnitud y peso, áreas de almacenamiento, sectores habitacionales de personas, etc. En Chile las instalaciones subterráneas están frecuentemente sometidas a actividad sísmica, registrándose tasas de daños menores que en instalaciones superficiales, por lo que es necesario determinar y comparar el comportamiento de las estructuras subterráneas respecto de las superficiales, con el fin de desarrollar los diseños acorde a las sollicitaciones sísmicas en niveles inferiores del terreno. Este trabajo está orientado a determinar las diferencias que existen entre los fenómenos dinámicos que ocurren en superficie respecto de los subterráneos, haciendo un análisis teórico de propagación de ondas en suelos para luego incorporar registros sísmicos, identificando los efectos superficie y así reducirlos en profundidad. Para tal efecto, solo se considera la infraestructura subterránea como estructuras metálicas, de hormigón, fundaciones de equipos principales (molinos), correas transportadoras, etc. No así obras tales como túneles o cavernas, ya que si bien su análisis es de gran importancia, no forman parte de este trabajo. En función de las profundidades, es posible agrupar las estructuras subterráneas en tres clases: las superficiales, las cuales están a una profundidad no mayor a 3 veces su diámetro (Hoek; Carranza; Corkum, 2002); las profundas, que están a profundidades mayores a los 100 metros (Sharma & Judd, 1991) y las intermedias. En Chile existen obras importantes en cavernas en la gran minería y actualmente en operación, tales como; Andina Fases I y II, Mina Chuquicamata Subterránea, Nuevo Nivel Mina (El Teniente), todas propiedad de Codelco Chile. Dentro de estas cavernas operan equipos importantes dentro del proceso minero, tales como Molinos, Chancadores y otros. Un proyecto emblemático de obras subterráneas es la Mina Chuquicamata Subterránea. Las principales características de este proyecto son: extracción hasta los 787 metros de profundidad, 60.000m² de construcción de barrios cívicos que incluyen oficinas, comedores, salas de control, plantas de hormigón, bombas de bencina, etc.; 7km de correas transportadoras y un refugio a 600m de profundidad. En Chile, actualmente no existe una norma que aborde el comportamiento de infraestructuras subterráneas, es por esto que frecuentemente los diseños estructurales se realizan con la norma NCh2369.Of2003. Esta norma entrega espectros de diseño que están calibrados en base a registros sísmicos de superficie, por lo tanto consideran efectos dinámicos de superficie y efectos locales de sitio.

2 Marco Teórico para el Análisis

Para este análisis se considera un medio en donde la onda se puede propagar infinitamente en todas direcciones. Usando la compatibilidad de deformaciones, ecuaciones de equilibrio y la relación tensión-deformación es posible resolver la ecuación de la onda. Para el estudio de las ondas sísmicas es necesario hacer un análisis tridimensional del fenómeno de propagación de ondas para determinar al comportamiento dinámico del suelo.

Se indican algunos términos que serán utilizados en análisis posteriores:

Onda P (primaria): desplazamiento de las partículas es paralelo a la dirección de propagación de la onda:

$$\frac{\partial^2 \bar{\varepsilon}}{\partial t^2} = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \nabla^2 \bar{\varepsilon} \quad (1)$$

Su velocidad de propagación es:

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{2G(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)}} \quad (2)$$

Onda S (u onda de corte): desplazamiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación de la onda.

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial^2 \Omega_x}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \Omega_x \quad (3)$$

Donde:

$$\Omega_x = \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{dy} - \frac{dv}{dz} \right) \quad (4)$$

Velocidad de ondas de corte:

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (5)$$

Las ondas S se descomponen en SH, que generan el movimiento de las partículas en sentido horizontal y SV, que generan el desplazamiento de las partículas en sentido vertical. Las ondas P no involucran rotación, y las S no involucran cambio de volumen. Las velocidades de las ondas dependen de la rigidez del material respecto a las deformaciones que produzcan las ondas. Comparando las velocidades:

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\frac{2-2\nu}{1-2\nu}} \quad (6)$$

Se definen dos funciones potenciales, Φ y Ψ , para describir el desplazamiento de la onda plana, en función de la frecuencia ω y un número de onda k_r , de manera que se propaga con velocidad $v_r = \omega/k_r$:

$$\Phi = A_1 e^{-qz+i(\omega t-k_r x)} \quad (7)$$

$$\Psi = A_2 e^{-sz+i(\omega t-k_r x)} \quad (8)$$

Donde:

$$q^2 = k_r^2 - \frac{\omega^2}{v_p^2} \quad (9)$$

Luego:

$$s^2 = k_r^2 - \frac{\omega^2}{v_s^2} \quad (10)$$

$$u = A_1 \left(-ik_r e^{-qz} + \frac{2iqsk_r}{s^2 + k_r^2} e^{-sz} \right) e^{i(\omega t - k_r x)} \quad (11)$$

$$w = A_1 \left(\frac{2qk_r}{s^2 + k_r^2} e^{-sz} + -qe^{-qz} \right) e^{i(\omega t - k_r x)} \tag{12}$$

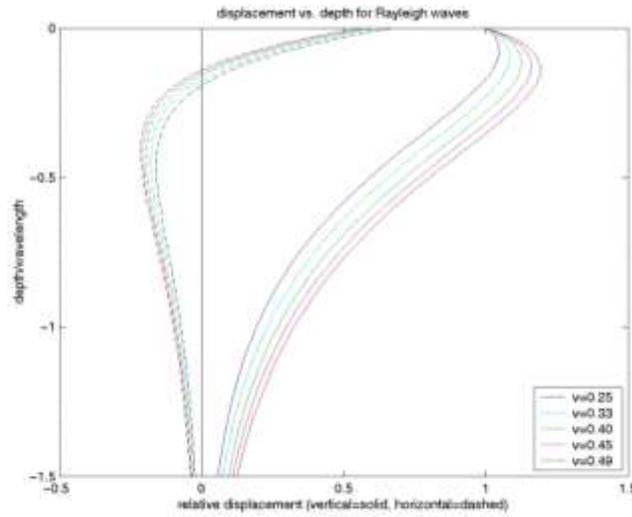


Fig. 1 – Desplazamientos Horizontales y Verticales Producidos por una Onda Rayleigh

Se indica la expresión para la amplificación de la amplitud de onda en un estrato de suelo:

$$u = -\frac{a_b}{\Omega^2} \cos(pz) - \frac{c}{\Omega^2} \tan(pH) \text{sen}(pz) + \frac{a_b}{\Omega^2} \tag{13}$$

Dónde:

$$p^2 = \frac{\rho \Omega^2}{G + i\Omega c} \tag{14}$$

Luego, la expresión que define el Factor de Amplificación de onda es el siguiente:

$$A_1 = \frac{u_{sup}}{u_{base}} \tag{15}$$

Es posible obtener el factor de Amplificación mediante la siguiente expresión:

$$A_1(\Omega) = \frac{1}{\cos(\alpha) \cosh(\beta) - i \text{sen}(\alpha) \text{senh}(\beta)} \tag{16}$$

A partir de la cual, el módulo del Factor de Amplificación es:

$$\|A_1(\Omega)\| = \frac{1}{\sqrt{\cos^2(\alpha) \cosh^2(\beta) + \text{sen}^2(\alpha) \text{senh}^2(\beta)}} \tag{17}$$

3 Comportamiento en Cavernas

Para el diseño sísmico es necesario determinar las sollicitaciones a las cuales estarán sometidas las estructuras y equipos. Debido a que los registros sísmicos están generados en superficie y que las normas están calibradas en base a estos registros, es necesario proyectar estas demandas en el interior de las cavernas en donde se emplazan las estructuras. Para lograr lo anterior, se analiza la amplificación dinámica del suelo y las ondas de superficie en los registros.

La mayor parte de los registros sísmicos considerados se han obtenido en superficie. Dado que las ondas de cuerpo al viajar a través de un estrato de suelo, están sujetas al fenómeno de amplificación dinámica, el cual dependiendo de la velocidad de propagación y altura del estrato, modifica los parámetros del movimiento. Este fenómeno está siempre presente en la propagación de ondas de corte, por lo tanto, en los registros generados en superficie existe un grado de amplificación de los parámetros debido a este fenómeno. Respecto de las ondas superficiales, estas decaen rápidamente en profundidad, lo que implica que los espacios subterráneos serán afectados solamente por las ondas de cuerpo (Marchant and Weir, 2002). Es necesario el conocer las influencias de estos fenómenos en los registros de superficie para estimar las demandas dinámicas hacia los espacios subterráneos.

En un trabajo realizado por D.W. Sykora y Y. Moriwaki (1996), en donde midieron las aceleraciones y velocidades peak en profundidad para diferentes sitios y eventos sísmicos, se obtuvieron los siguientes resultados:

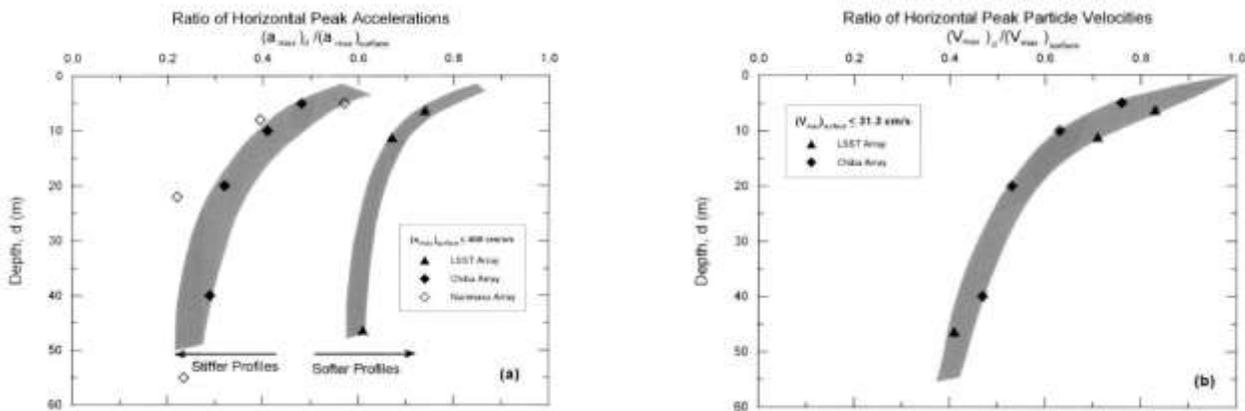


Fig. 2 – Decaimiento de Aceleraciones en Profundidad Fig. 3 – Decaimiento de Velocidades en Profundidad

En el siguiente grafico se muestran las velocidades de corte de los diferentes estratos de cada estación:

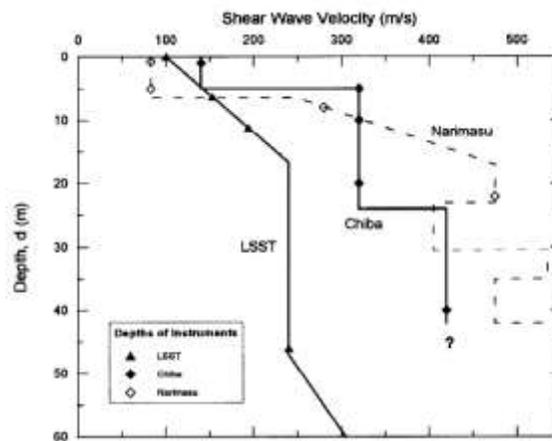


Fig. 4 – Perfil de Velocidades en Sitios Instrumentados

Se observa que las velocidades y aceleraciones peak decaen rápidamente con la profundidad, especialmente en los primeros 10 metros. Si bien en ese trabajo no se analizan las causas que producen este efecto, existe una disminución en las exigencias dinámicas a medida que aumenta la profundidad. Se debe tener presente que los suelos en donde se realizan las mediciones tienen velocidades de propagación de ondas de corte relativamente bajas, lo que aumenta el fenómeno de amplificación dinámica. Para lograr un diseño sísmico adecuado de las estructuras emplazadas en las cavernas, es necesario conocer de qué manera influye la transmisión de las ondas superficiales y amplificación dinámica en los registros sísmicos generados en superficie, ya que las normas de diseño (y metodologías) para calcular las demandas sísmicas de las estructuras están preparadas y/o calibradas para estos registros; luego es necesario estimar estas demandas sísmicas a las estructuras en cavernas.

Para este trabajo, se considera 1 de las 31 estaciones que registraron el sismo del 3 de marzo de 1985. La estación considerada es la de Valparaíso (UTFSM), debido al tipo de suelo en donde está emplazada. Usando la clasificación de suelos hecha por Ruiz (2002), que basándose en la norma UBC y comparándola con clasificaciones hechas por otros autores, concluye que el suelo de la estación de Valparaíso (UTFSM) es roca dura (Hard Rock [$V_s > 1500$ m/s]). La norma chilena NCh433Of.96 establece un mínimo de 10 m de prospección del terreno para establecer su clasificación. Sin embargo, lo anterior no proporciona un perfil adecuado del suelo. Araneda y Saragoni (1994) presentan estratigrafías para las estaciones, la correspondiente a Valparaíso (UTFSM) es la siguiente:

Estación	1 ^{ra} Capa		2 ^{da} Capa		Tipo de Edificio	Localización del instrumento
	Espesor [m]	V_s [m/s]	Espesor [m]	V_s [m/s]		
Valparaíso (UTFSM)	1.4	312	18	1720	1 Piso	Nivel Piso

Esta estación posee las tres componentes en el registro, las direcciones horizontales son N70E y S20E, las cuales se indican a continuación:

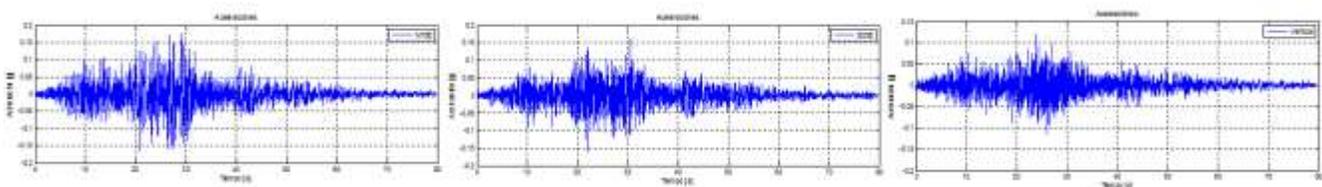


Fig. 5 – Registros de Aceleraciones: N70E – S20E – Verticales

4 Efectos de la Amplificación Sísmica

Como resultado de este proceso, la rigidez (V_a) y el espesor del estrato influyen en el número y frecuencia en la cual se producen los peak de la función de transferencia; mientras mayor rigidez, los peak se producen en frecuencias más altas. Del mismo modo, un estrato de menor espesor produce peaks de frecuencias más altas. Se debe notar que el número de peaks registrados depende de la rigidez y espesor del estrato. En los suelos menos rígidos y de mayor espesor, se da una mayor cantidad de peaks. Esto implica que es más probable que un registro sísmico contenga alguna de esas frecuencias predominantes. Los análisis que se realizan en este trabajo están modelados en roca, es por esto que no se consideró la degradación del material, generando así modelos de amortiguamiento (D) y rigidez (G) constantes para las diferentes deformaciones producidas por el sismo. El amortiguamiento utilizado para todos los modelos es del 2%. El valor de G depende de la profundidad, ya que se utiliza una relación entre la velocidad V_s y la presión de confinamiento: $V_s \propto$

σ_3 . A los diferentes modelos desarrollados se impone que el registro en superficie siempre sea el mismo, esto con el fin de hacer comparables los resultados en profundidad de los modelos en base a una constante en superficie. Para definir una geometría representativa, se construye un modelo con 2 alturas como se muestra en la siguiente figura:

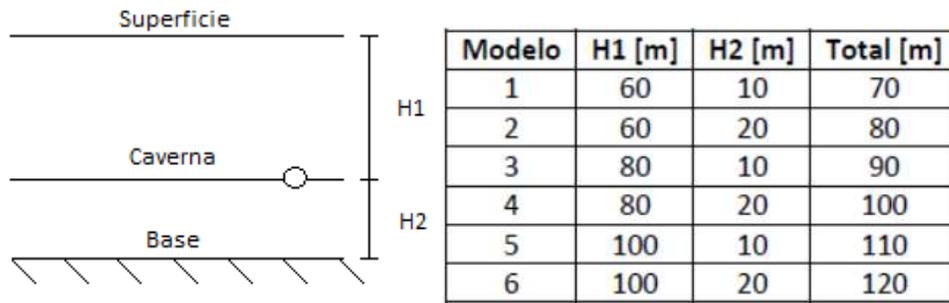


Fig. 6 – Esquema y Datos de Modelos en EERA

El objetivo de realizar estos seis modelos es poder determinar cuál es el más representativo de los efectos que produce la propagación de las ondas en el estrato y poder cuantificar los resultados de manera comparativa entre varios registros. De los seis modelos, el que resulta ser más representativo es el modelo N°6, el cual posee un espesor de 120 metros, con la caverna a una profundidad de 100 metros. En el desarrollo de los modelos se trabaja con los registros del terremoto de Marzo de 1985, en particular las estaciones de: Quintay, Rapel, Las Tórtolas y Valparaíso (UTFSM). En la siguiente tabla es posible ver los detalles de las estaciones acelerográficas:

Tabla 1 – Características de las Estaciones con Registros Considerados

Estación	1 ^{ra} Capa		2 ^{da} Capa		Tipo de Edificio	Localización del instrumento
	Espesor [m]	V _c [m/s]	Espesor [m]	V _c [m/s]		
Valparaíso (UTFSM)	1.4	312	18	1720	1 Piso	Nivel Piso
Quintay	4.5	155	31	1190	----	Campo Libre
Las Tórtolas	1	520	13	1865	1 Piso	Sótano
Rapel	3	2130	9.5	3155	Túnel	Nivel Piso

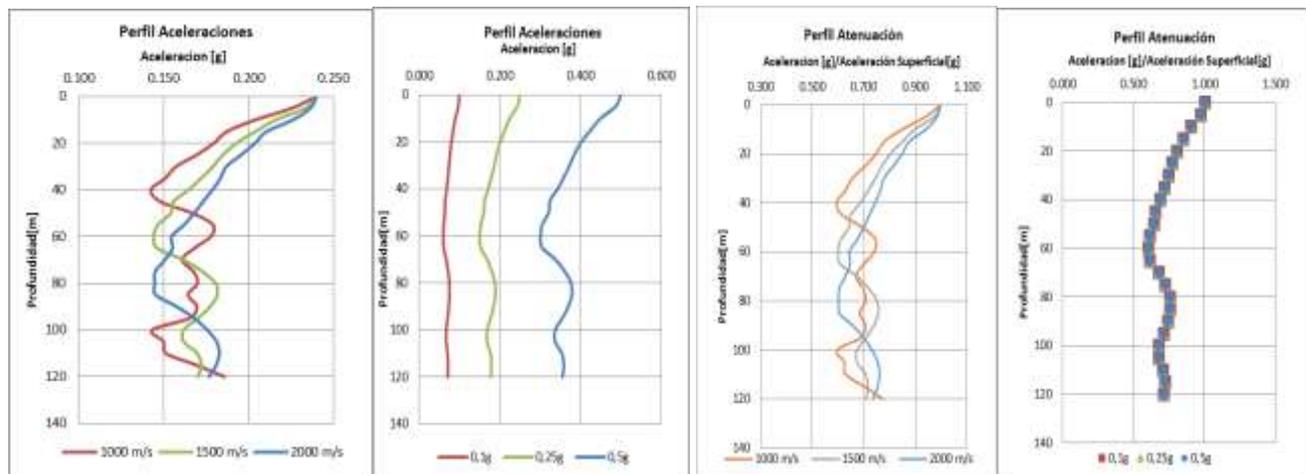


Fig. 7– Resultados del Registro de Quintay

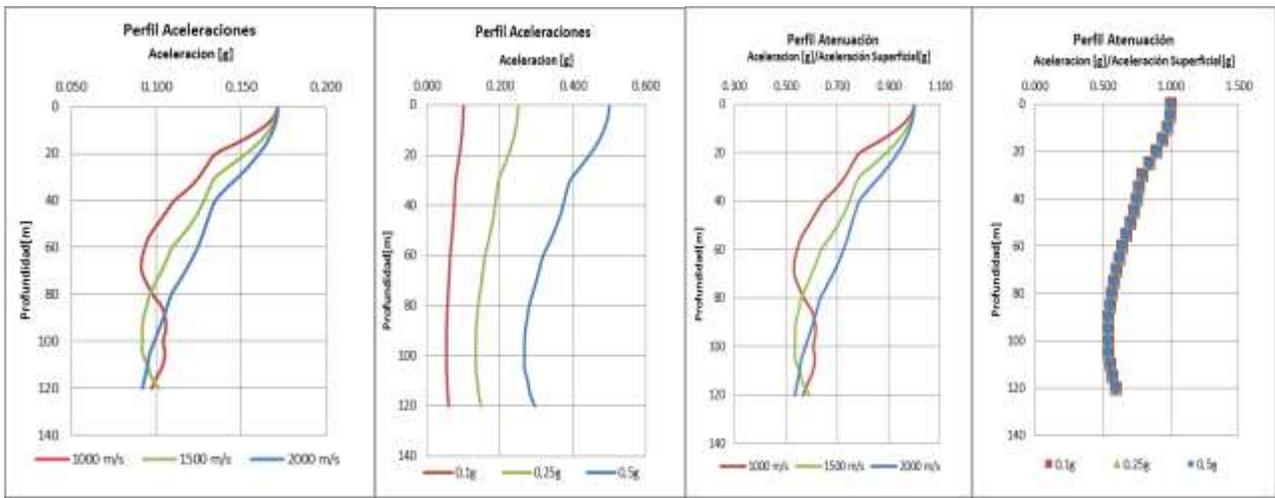


Fig. 8– Resultados del Registro de las Tórtolas

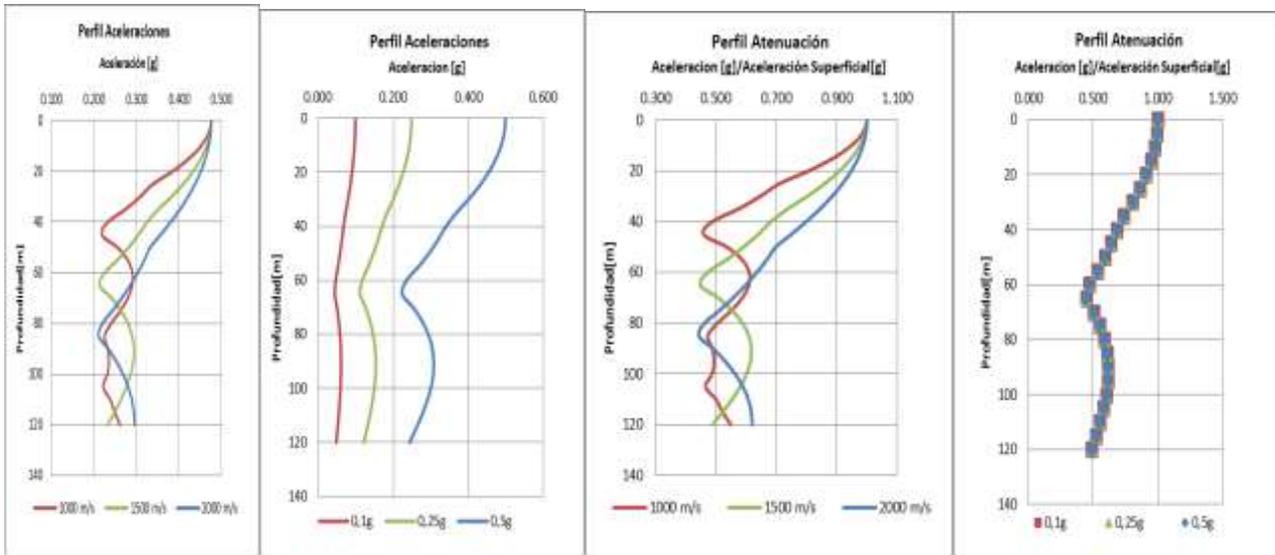


Fig. 9– Resultados del Registro de Rapel

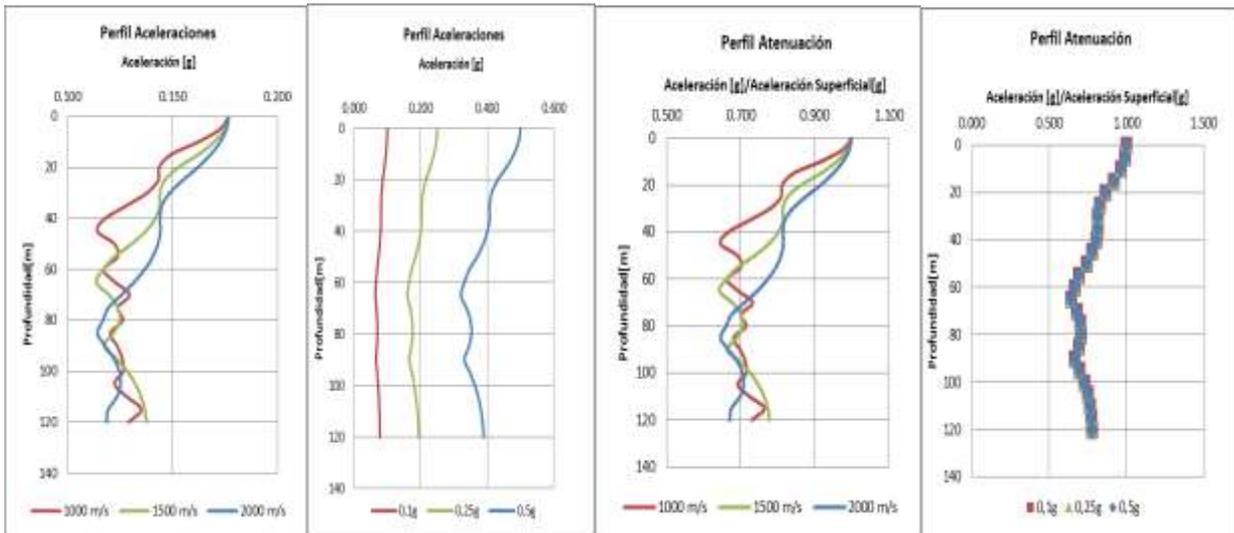


Fig. 10 – Resultados del Registro de UTFSM

Se concluye que para los diferentes registros de aceleraciones se obtienen resultados distintos, pero se observa un comportamiento similar entre ellos. En todos los casos la tendencia es a reducir las aceleraciones máximas en profundidad. Con respecto a la variación de la velocidad V_s de los estratos, el comportamiento es similar, pero a medida que se aumenta la velocidad V_s del estrato, el decaimiento de las aceleraciones se hace de manera menos pronunciada, llegando a la misma reducción a mayor profundidad. Al variar las aceleraciones peak del registro, el comportamiento del estrato es similar en todos los casos, ya que la variación porcentual de los modelos es básicamente la misma. Esta reducción en cuanto a las aceleraciones peak, es cercana al 30%, como se ve en la siguiente figura que muestra el perfil de decaimiento promedio de todos los modelos realizados en EERA:

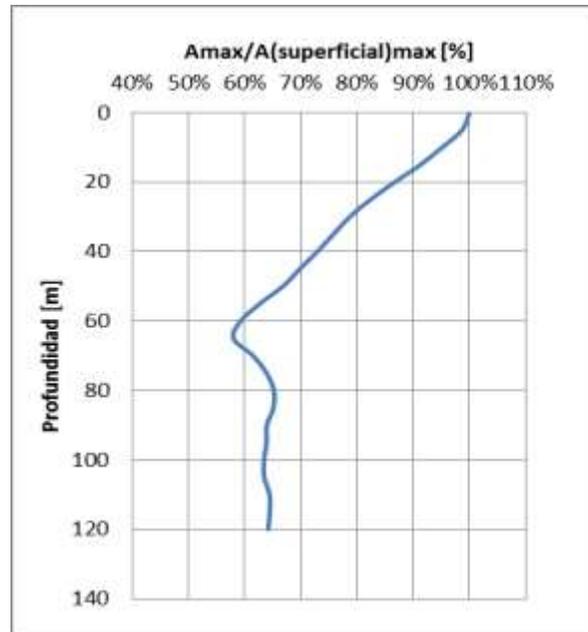


Fig. 11 – Promedio de Atenuaciones

Con estos resultados es posible concluir que la tendencia a reducir las aceleraciones peak es un fenómeno que está presente en todos los casos modelados y no es solo un comportamiento particular. Este fenómeno se atribuye a la condición de superficie libre del estrato, en donde la condición de borde implica que el esfuerzo de corte es cero en la superficie, además de considerar que la onda que llega a la superficie se refleja, lo que implica un aumento de las aceleraciones respecto de las obtenidas en un espacio confinado. En uno de los trabajos de R. Saragoni (2005), se analizan modelos de amplificación dinámica en conjunto con registros sísmicos, encontrándose con discrepancias. Estas diferencias se atribuyen a que la teoría de amplificación solo considera las ondas de corte, dejando de lados las ondas de superficie. Es por esto que al proyectar los parámetros de movimiento con amplificación dinámica, se llega a valores menores que los registrados por los instrumentos.

Un método discutido por Schnabel (1972), aplica un procedimiento de deconvolución para un movimiento en superficie y así evaluar el movimiento en profundidad. Un segundo método involucra la aplicación de movimiento a varias profundidades y así lograr una escala para el movimiento introducido.

Estos métodos están reproducidos para varios tipos de suelos y profundidades (St. John and Zahrah, 1987). Además métodos lineales y no lineales de propagación de ondas de una dimensión son comúnmente usados para el análisis en suelos blandos.

El movimiento del suelo decrece en profundidad (Chang, 1986). Es recomendable desarrollar un análisis de propagación de ondas para entender como el periodo y amplitud del movimiento cambian a medida que las ondas de corte viajan a través del suelo. Debido a la ausencia de métodos exactos o disponibilidad de datos, Power (1996) propone el uso de factores de atenuación en profundidad que se entregan en la Tabla 2. Donde " Z_t " es la profundidad del túnel y " R_t " es la relación entre el movimiento del suelo a la profundidad del túnel y la superficie.

Tabla 2 – Atenuación en Profundidad

Z_t (m)	R_t (m)
≤ 6	1.0
6 – 15	0.9
15 – 30	0.8
> 30	0.7

5 Recomendaciones

Para lograr un diseño sísmico adecuado de la infraestructura subterránea es necesario caracterizar correctamente el estrato de suelo y/o roca que se encuentra sobre la caverna, además de la sismicidad de la zona.

Los parámetros necesarios para desarrollar el modelo de propagación de ondas del estrato de suelo y/o roca son el amortiguamiento, el peso específico y rigidez del terreno, la cual debe ser expresada en función de la velocidad de onda de corte V_s o el módulo de corte G . Hay que notar que estos parámetros varían en función de la profundidad, por lo que se requieren valores que caractericen el perfil del sitio.

Se deben identificar las fallas geológicas o alteraciones en el macizo rocoso para evaluar los efectos que estos producen en la respuesta del estrato, para aplicar un modelo adecuado de propagación de ondas.

Se debe realizar el estudio de peligro sísmico del lugar en donde se ubica el proyecto, para obtener la aceleración superficial máxima, la cual debe escalarse con las aceleraciones en profundidades obtenidas según las atenuaciones correspondientes. Se recomienda desarrollar varios modelos con diferentes registros de la zona para obtener resultados más representativos. Estos registros deben ser obtenidos en roca para eliminar los efectos locales.

6 Conclusiones

En este trabajo se identificaron factores que influyen en la reducción de las aceleraciones en profundidad, para ello se filtraron las ondas Rayleigh de alta frecuencia y se hizo un análisis de la propagación de ondas en un estrato rocoso.

De ambos fenómenos estudiados, el que produjo reducciones más considerables fue el análisis de la propagación de ondas en un medio semi-infinito, pudiendo llegar a reducciones del orden del 30% del total registrado en superficie. Las ondas se reflejan en la superficie, lo que genera mayores

aceleraciones respecto de los puntos que tienen mayor confinamiento en profundidad (Richart & Woods, 1970).

Los valores de las aceleraciones en profundidad varían según el registro estudiado pero el comportamiento es el mismo, además que en términos de atenuación de aceleraciones. Bajo los 60 metros de profundidad las aceleraciones se mantienen con variaciones menores, por lo que se considera como un fenómeno general y no particular de un registro o característica de un estrato.

Se concluye que en promedio, esta reducción de las aceleraciones es cercana al 30% respecto de la aceleración superficial. Luego, con el comportamiento observado de la propagación de las ondas, es posible señalar que las demandas sísmicas decaen en profundidad por efecto del confinamiento. Por lo tanto, el diseño sísmico de las estructuras en el interior de cavernas puede ser menos exigente que el efectuado en superficie. Este análisis de propagación de ondas en un estrato de superficie libre, es ampliamente utilizado en el diseño en interior de cavernas para la determinación de las atenuaciones del movimiento en profundidad (C.M.St John and T.F. Zahrah, 1987).

Se debe tener presente que la norma chilena NCh2369Of.2003 en el párrafo 5.8.1 permite realizar un análisis espectral para el diseño sísmico, en donde este resultado no puede ser menor que un 75% del estipulado por los espectros de diseño de la misma norma, los cuales fueron presentados previamente. Es por esto que en el estudio de peligro sísmico, incluida la atenuación de las aceleraciones en profundidad, podrá reducir como máximo un 25% del espectro de diseño propuesto por la norma. Hay que destacar que estas estructuras están sometidas a otros efectos dinámicos, como por ejemplo vibraciones de operación y detonaciones, solicitaciones que pueden ser más demandantes que un sismo; por lo tanto, el sismo puede ser un factor que no controle el diseño de la estructura. Estos efectos quedan fuera del alcance de este trabajo, el cual está enfocado en el comportamiento de las estructuras en el interior de cavernas y no de las obras subterráneas, como lo son túneles o cavernas, ya que el diseño de estas estructuras requiere conocer factores geotécnicos más complejos, en donde el diseño está caracterizado por las deformaciones y esfuerzos que impone el suelo que rodea a la estructura, considerar fallas existentes, inestabilidad del suelo u otros factores geotécnicos.

7 Agradecimientos

Parte de este trabajo se realizó gracias a los análisis del Ingeniero Sebastián Raggi en su trabajo de Título desarrollado en la Universidad de Chile, además del apoyo del consultor sísmico Ramón Montecinos.

8 Referencias

- [1] Araneda M. y Saragoni R.,1994, Project of geological survey of strong-motion site in central Chile, Sección de Ingeniería Estructural, departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, report for Kajima Institute of Construction Technology of Tokio, Santiago, Chile.
- [2] Aravena D., 1997, Estudio de la localización de eventos sísmicos y determinación de la velocidad de propagación de las ondas sísmicas de compresión y corte en la mina El Teniente, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- [3] Bardet J.P., Ichii K. and Lin C.H., 2000, EERA: A Computer Program for Equivalent-linear Earthquake Response Analyses of Layered Soil Deposits, Department of Civil Engineering, University of Southern California.
- [4] Barrientos S. y Kausel E., 1993, Principales características sísmicas del terremoto del 3 de marzo de 1985, Capítulo 3 del libro "Ingeniería sísmica. El caso del sismo del 3 de marzo de 1985" Flores R. (editor), Hachette, Santiago.
- [5] Beck D.A., Brady B.H.G., 2002, Evaluation and application of controlling parameters for seismic events in hard-rock mines, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 39 633-642.

- [6] Blas O., 2003, Estudio de amplificación de suelos superficiales y su correlación con registros de acelerogramas del sismo de marzo de 1985 en las zonas de: Illapel, Los Vilos, Iloca, Talca, Cauquenes y Chillan, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- [7] Bolton Seed H., Idriss I.M., 1970, Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses, College of Engineering, University of California, Berkeley, California.
- [8] Chang C.Y., Power M.S., Idriss I.M., Somerville P.G., Silva W., Chen P.C., 1986, Engineering characterization of ground motion – task II: observational data on spatial variations of earthquake ground motion, Report no.NUREG/CR-3805, US Nuclear Regulatory Commission, vol 3.
- [9] Comte D., Lorca E., Eisenberg A., Pardo M., Ponce L., Saragoni R., Singh S.K. and Suarez G., The central Chile earthquake of 3 march 1985; A repeat of the the great Valparaiso earthquake of 1906, Science, Vol.233, pp 449-483.
- [10] Crisafulli F., Villafañe E., 2002, Espectros de respuesta y de diseño, Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ingeniería.
- [11] Hashash, Y.M.A. and Hook, J.J. and Schmith, B. and Yao, J.I., 2001, Seismic design and analysis of underground structures, Tunn.Undergr. Sp. Tech., 16, pp 247-293.
- [12] Lanzano G., Bilotta E., Russo G. 2002, Tunnels under seismic loadings: a review of damage case histories and protection methods, Department of Hydraulic, Geotechnical and Environmental Engineering (DIGA) University of Naples Federico II, Italy.
- [13] Lobos C., 1999, Efecto del mecanismo de las ondas superficiales y del suelo en los acelerogramas del terremoto de Chile del 3 de marzo de 1985, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- [14] Luppichini N., 2004, Interpretación de los acelerogramas del terremoto de Chile central del 3 de marzo de 1985 considerando ondas sísmicas de alta frecuencia, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- [15] Nasser-Moghaddam A. et al, 2007, Effects of underground cavities on Rayleigh waves – Field and numerical experiments, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 27 pp. 300-313.
- [16] Reiter L., 1990, Earthquake Hazard Analysis – Issues and Insights, Columbia University Press, New York.
- [17] Ruiz S., 2002, Formulas de atenuación para la subducción de Chile considerando los dos mecanismos principales de sismogénesis y efectos del suelo y las asperezas, Memoria de Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- [18] Sharma S.W.R., Judd, 1991, Underground opening damage from earthquakes, Engineering Geology, vol. 30, pp. 263-276.
- [19] St. John C.M. and Zahrah T.F., 1987, Aseismic Design of Underground Structures. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.2, N°2, pp. 165-197.
- [20] Stiros S.C., Kontogianni V.A., 2009, Coulomb stress changes: From earthquakes to underground excavation failures, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 46, pp. 182-187.