

INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN MEDICIONES OBTENIDAS POR EL ENSAYO GEOFISICO MASW EN PAVIMENTO

F. Zúñiga Saez¹, A. Muñoz Jensen², R. King St-Onge³

RESUMEN:

Se decidió investigar influencia de la temperatura sobre el comportamiento del ensayo geofísico MASW, en específico, en el caso de los ensayos ejecutados sobre asfalto. Se realizaron un total de 245 registros sísmicos sobre un pavimento y se midió un rango de temperatura de ejecución de los ensayos entre los 30°C a 52°C. Desde datos procesados se encuentra una correlación entre la velocidad de la onda S medidas en el estrato superior correspondiente al pavimento con el aumento de la temperatura. También se encontró una anomalía, un estrato “fantasma” que cambia de velocidad del estrato aunque conserva su forma. Pese a que el espaciamiento de los geófonos es lo suficientemente amplio para llegar a los 40 metros de profundidad, no es lo suficientemente sensible para detectar estratos centimétricos como el asfalto, dado a que al estar compuesto por diferentes capas lo resume en un gran estrato con una velocidad uniforme que coincide con los resultados sísmicos que cabría esperar según otro tipo de ensayos. Adicionalmente los resultados para la velocidad promedio ponderado de la onda (V_{s30}) fueron inalterados por la temperatura superficial del pavimento. Utilizando los mismos registros sísmicos se contaba con hacer refracción como ensayo complementario, pero los resultados no fueron coherentes con los obtenidos con MASW ni el primer metro con el perfil tipo de pavimento, esto debido a que los geófonos utilizados son de menor frecuencia y además la página web del fabricante de los geófonos no recomienda el uso del ensayo de refracción sobre pavimento por ser difícil. Se recomienda que los ensayos MASW ejecutados parcial o totalmente sobre asfalto sean ejecutados a temperatura ambiente.

PALABRAS CLAVES: Asfalto, MASW, Temperatura

ABSTRACT:

It was decided to investigate the influence of temperature on the behavior of the geophysical test MASW, specifically, in the case of tests performed on asphalt. A total of 245 seismic records were made on a pavement and a temperature range of execution of the tests was measured between 30 ° C to 52 ° C. From processed data was found a correlation between the speed of the S wave measured in the upper layer corresponding to the pavement with the increase of the temperature. An anomaly was also found, a "phantom" stratum that changes stratum speed although it retains its shape. Although the spacing of the geophones is wide enough to reach 40 meters deep, it is not sensitive enough to detect centimetric strata such as asphalt, given that being composed of different layers sums it up in a large stratum with a uniform speed that coincides with the seismic results that could be expected according to other types of tests. Additionally, the results for the weighted average speed of the wave (V_{s30}) were unaltered by the surface temperature of the pavement. Using the same seismic records, we considered refraction as a complementary test, but the results were not consistent with those obtained with MASW or the pavement type profile, this is due to the fact that the geophones used are less frequency and also the website of the manufacturer of the geophones does not recommend the use of the refraction test on pavement because it is difficult. It is recommended that MASW tests performed partially or totally on asphalt be performed at room temperature.

KEYWORDS: MASW, Temperature, Asphalt.

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, fzunigas@ing.ucsc.cl

² Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, terradata.chile@gmail.com

³ Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, rking@ucsc.cl

1 INTRODUCCIÓN

El ensayo geofísico Análisis Multicanal de Ondas de Superficie (abreviado en inglés MASW) es un ensayo que en esencia, entrega como resultado las velocidades promedio de las ondas de corte u ondas secundarias para una determinada profundidad. Las principales ventajas son que es un método no destructivo, de rápida ejecución, con resultados fiables y de un costo relativamente bajo. Además, en base a los algoritmos propios del ensayo, se pueden realizar modelos en una, dos y hasta tres dimensiones de los perfiles de velocidades de las ondas de corte del terreno. Es posible determinar la estratigrafía en términos de velocidades de la onda S, la distribución de algún estrato específico en dos o tres dimensiones así como también, en base a su interpretación la identificación de estratos peligrosos o beneficiosos para el proyecto a evaluar.

Desde su concepción por Park, Miller, y Xia (1999) se han realizado numerosos estudios para buscar aplicaciones del ensayo, como por ejemplo el de Park, Ivanov, Miller, Xia, y Ryden (2001) donde realizan una investigación sobre la aplicabilidad del ensayo MASW para pavimentos, utilizando una metodología derivada de Park et al. (1999), pero adicionalmente, usando geófonos tanto horizontales como verticales. En esta publicación de Park, Ivanov, et al. (2001) comentan sobre las dificultades de las mediciones en pavimento, como por ejemplo, la gran diferencia entre las velocidades de las ondas P y S en la capa superior de asfalto y las capas inferiores, y también el contraste de velocidades entre las diferentes capas que componen el pavimento.

Posteriormente Alzate-Díaz y Popovics (2009) evalúan nuevamente la aplicabilidad del ensayo en pavimento, donde uno de los puntos a analizar es la influencia de la temperatura al momento de la ejecución de los ensayos, en donde se concluye que la temperatura del pavimento al momento del ensayo afecta los resultados.

Es necesario considerar que los resultados de Alzate-Díaz y Popovics (2009) fueron obtenidos en condiciones de laboratorio, con probetas de 1 metro cuadrado de área y con tres grosores que van desde los 15 cm hasta los 25 cm sobre una base granular la cual no está especificada. El espaciamiento contrasta a los utilizados por Park, Ivanov, et al. (2001) y Park et al. (1999) donde la escala utilizada por los últimos es de metros mientras que en Alzate-Díaz y Popovics (2009) es de centímetros, adicionalmente Alzate-Díaz y Popovics (2009) no entrega información sobre lo que ocurre con la base granular debajo del pavimento.

En vista de la creciente popularidad del ensayo por las ventajas mencionadas, considerando además que el cambio de escala puede acentuar o disminuir el efecto de la temperatura demostrado por Alzate-Díaz y Popovics (2009) se ha decidido investigar el comportamiento del ensayo MASW en pavimentos con una variación de temperatura en las mediciones en condiciones de espaciamientos comunes para un ensayo MASW, los cuales rondan entre los 3 a 5 metros. Se realizaron un total de 245 registros sísmicos, los cuales contienen los registros activos y pasivos de MASW, los cuales fueron analizados, filtrados e interpretados.

En Chile, a contar del 2011 se requiere el ensayo MASW para evaluar las ondas de corte en edificaciones, específicamente se exige la V_{s30} (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2011), que corresponde a la velocidad promedio ponderada de la velocidad de la onda S con respecto a los estratos a los 30 metros de profundidad según el nivel del terreno.

La aplicabilidad de los resultados está dada para ensayos realizados o que se van a realizar en zonas urbanas, para proyectos sometidos al decreto 61 de Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2011) que cuenten con el área preliminar pavimentada o parcialmente pavimentada al momento del ensayo, lo que incluye por ejemplo, estacionamientos y galpones entre otros.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra en la Región de Ñuble, comuna de Chillán, en las coordenadas UTM 18H 761974.00 m E, 5947430.00 m S. En la Figura 1 se muestra la ubicación del área de estudio con respecto a las comunas de la región de Ñuble. La extensión de la zona de estudio es del margen de 100 metros lineales producto de la configuración de la línea de los geófonos y por el ancho del pavimento en el cual se realizaron los ensayos (Figura 2).

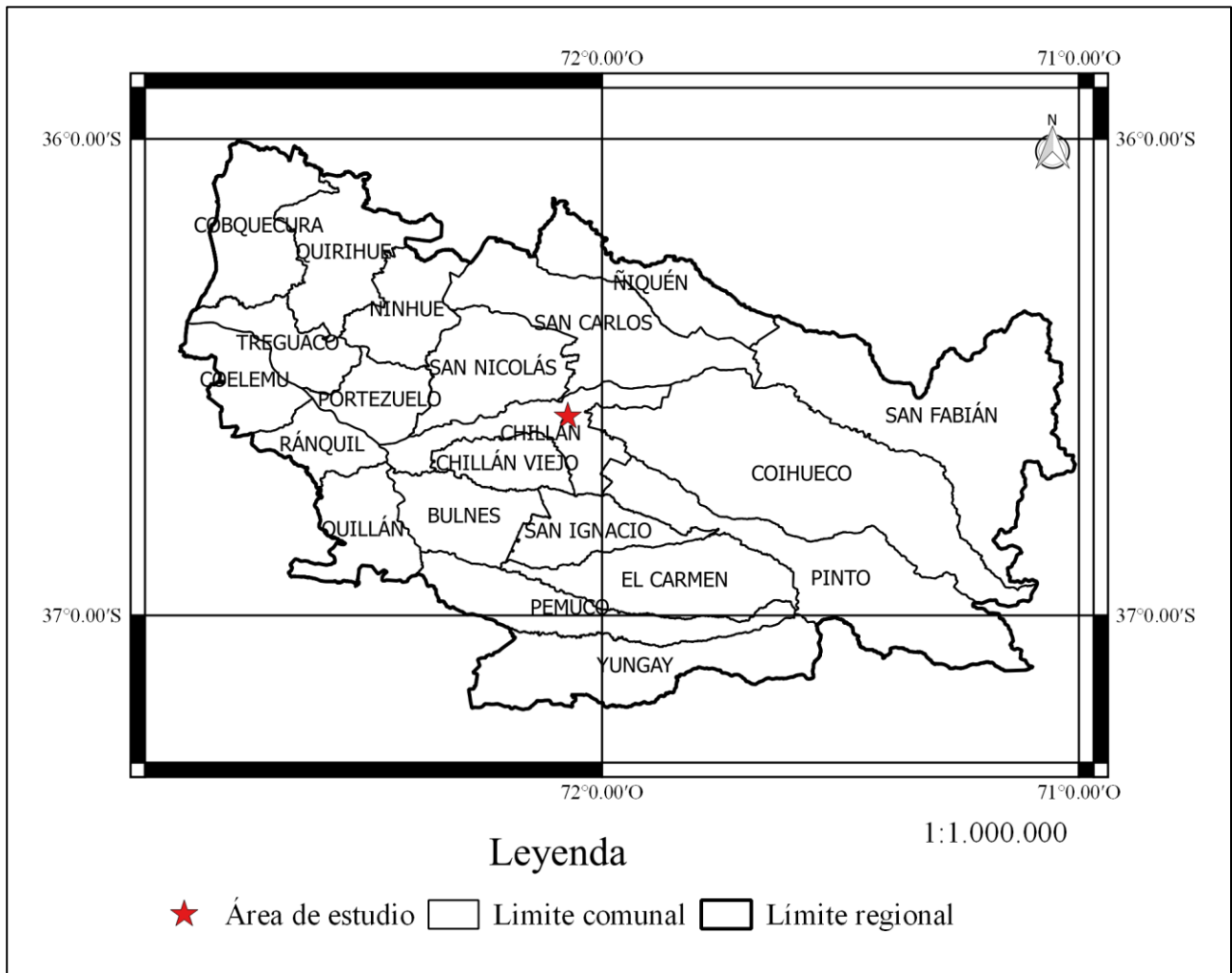


Figura 1: Ubicación zona de estudio con respecto a la Región de Ñuble y las comunas. Elaboración Propia

La zona de estudio se encuentra en un entorno urbano, no se encuentran en los alrededores indicios tanto de afloramientos como del suelo en su estado natural. Paralelo a la zona de estudio, se encuentra un canal de regadío, el cual está a unos 4 a 5 metros de la calle, el cual es responsable de la vegetación que se puede encontrar en la zona norte. En la zona suroeste se encuentra un condominio habitacional.



Figura 2: Distribución de la línea de geófonos dentro del pavimento de la zona de estudio. Vista noreste-norte. Ubicado en UTM 18H 761974.00 m E, 5947430.00

2.1.1 Geología

Debido a la escala de la zona de estudio, la geología de la zona de estudio es acotada a los alrededores de Chillán, descrita en el Avance Geológico Hoja Concepción-Chillán por Gajardo (1980).

Se reconocen en base a la Carta geológica 4 Formaciones (Figura 3), las cuales son:

Sedimentos de Terrazas Fluviales (Hstf)

Unidad informal, corresponde a los depósitos sedimentarios que se distribuyen en los valles de los principales ríos del área, constituyendo amplios niveles terrazados (Gajardo, 1980).

Están compuestos por gravas y ripios, con clastos redondeados a sub-redondeados de andesitas y granitos de diámetro promedio entre 8 y 30 centímetros, con fracciones variables de arenas y limos. Sus espesores máximos alcanzan los 20 metros (Gajardo, 1980).

Formación La Montaña (PIHm) (nueva denominación por Gajardo (1980))

Descrita originalmente por (Muñoz-Cristi, 1960) como Formación Morrenas de Montaña. Corresponde a un grupo de sedimentos principalmente glaciares y glaci-lacustres, formando una serranía baja, de lomajes redondeados, que desde la región de Talca al sur se conoce con el nombre de La Montaña (Fuenzalida, 1965).

La Formación La Montaña está compuesta por depósitos morrénicos de escasa compactación, que contienen en forma caótica fragmentos de rocas volcánicas, basálticas y graníticas, en distintos grados de redondez y estados de meteorización. El tamaño de los clastos varía entre 7 y 40 centímetros de diámetro promedio, existiendo algunos sectores de clastos de hasta 5 metros. (Gajardo, 1980).

La edad asignada por Muñoz-Cristi (1960) es del cuaternario.

Formación Mininco (PPIIm)

Definida por Muñoz-Cristi (1960). Se distribuye a lo largo de la Depresión Central y sus afloramientos se observan principalmente en los valles de ríos, esteros y también en taludes.

La formación se compone por sedimentitas lagunares y fluviales, representadas por areniscas tobáceas, limonitas y conglomerados, con intercalaciones de arcillolitas y tobas. Compuesta principalmente por material andesítico y también se encuentra ceniza en la matriz.

Con respecto a la edad de la unidad, Muñoz-Cristi (1960) la asigno al Cuaternario, sin embargo, reconoce que el periodo de sedimentación pudo empezar en el Plioceno.

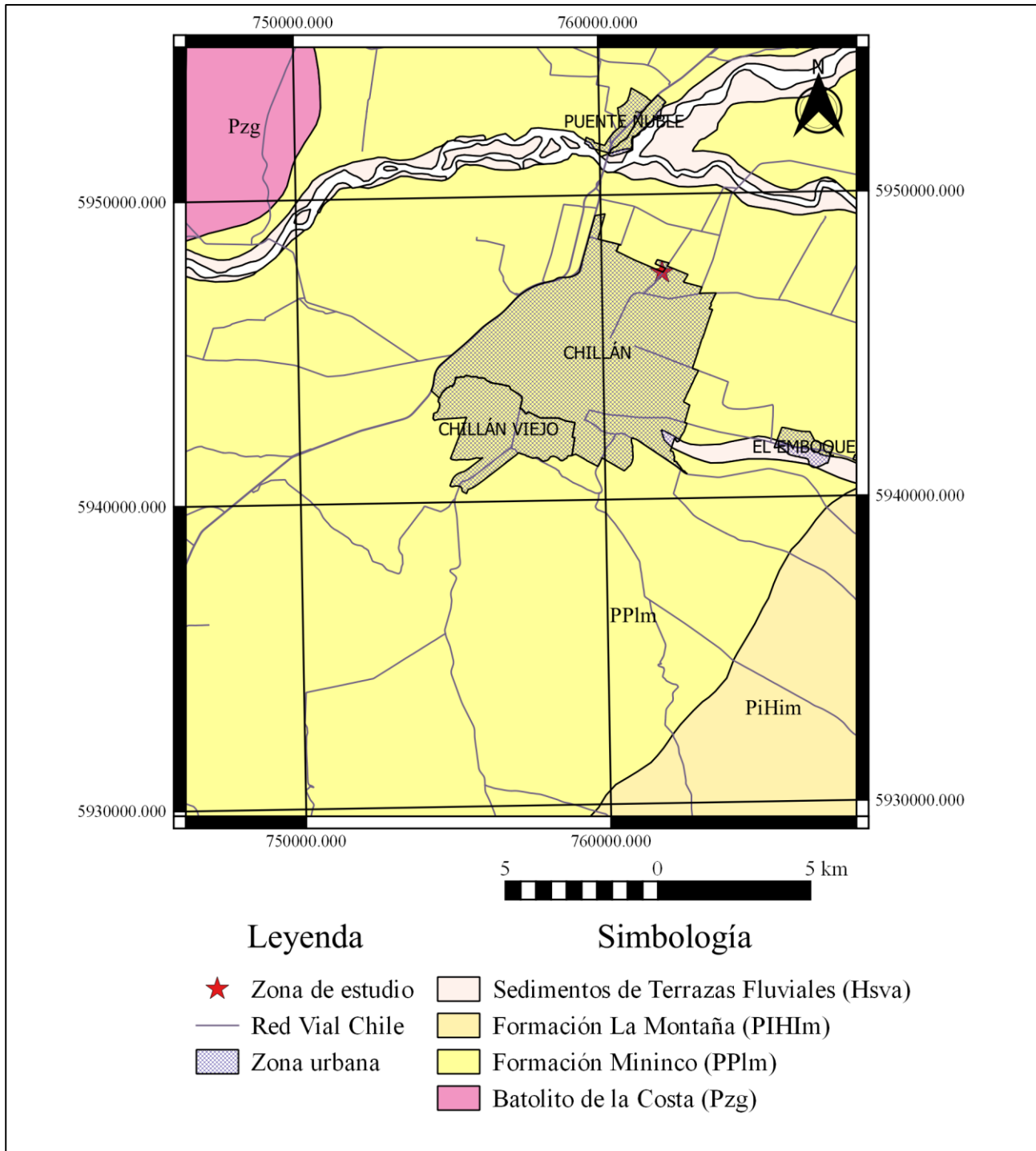


Figura 3: Modificado de Gajardo (1980), colores en base a la Tabla Cronoestratigráfica internacional por Cohen, Harper, and Gibbard (2018), Zona urbana y red vial por Instituto Nacional de Estadísticas (2019).

Batolito de la Costa (Pzg)

Unidad informal, se distribuye como una franja continua en dirección general NNE-SSO, al oeste de las rocas metamórficas, conformando gran parte de la Cordillera de la Costa.

Está integrada por un complejo plutónico cuyas rocas varían entre tonalitas y granodioritas, con sectores menos extensos de diorita cuarcífera y granito. (Gonzales-Bonorino (1970); Hervé, Godoy, Del Campo, and Ojeda (1976)).

El batolito de la costa tiene una relación de contacto intrusivo con las rocas del basamento Metamórfico e infrayace con discordancia de erosión a las series sedimentarias y sedimentológicas del Triásico. Relaciones estratigráficas permiten asignarle una edad entre Paleozoico superior y Triásico inferior.

Desde el punto de vista geológico se encuentra que la macro área de estudio está compuesta por la Formación Mininco. Gajardo (1980) reconoce dentro de los perfiles geológicos que esta formación se encuentra bajo la comuna de Chillán y su estratificación es horizontal. Alrededor de la zona de estudio, producto de la urbanización, no se encontraron afloramientos de roca.

2.2 Ondas Sísmicas

Esta investigación usa como base las ondas sísmicas, las cuales son ondas mecánicas que en medios homogéneos se comportan como ondas elásticas. De forma general se pueden clasificar en tres grupos los tipos de ondas sísmicas que son ondas de cuerpo, ondas superficiales y vibraciones libres.

2.2.1 Ondas de Cuerpo

Las ondas de cuerpo son las ondas que desde su fuente se propagan por el centro de la tierra o parcialmente. Si bien las ondas de cuerpo son ondas esféricas, ondas cuyo sentido de propagación es esférico, a medida que se alejan de la fuente se transforman en ondas planas. Para representar la dirección de las ondas se utilizan rayos sísmicos (Raypath) debido a que es mucho más fácil de representar que superficies esféricas.

Las ondas de cuerpo se pueden clasificar en dos tipos: Ondas P y Ondas S.

Ondas P

Las Ondas P u ondas primarias, llamadas así por ser las primeras en ser registradas en un sismógrafo, son ondas cuya dirección de propagación es paralela al movimiento que esta produce en las partículas. La Figura 4 muestra la consideración de los ejes coordenados.

La velocidad de la onda y está definida por la ecuación (1)

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{3}{4}\mu}{\rho}} \quad (1)$$

La onda P u onda longitudinal, es la más rápida de todas las ondas sísmicas. Cómo se expone en la ecuación la onda P puede atravesar tanto sólidos, líquidos y gases puesto que son compresibles ($K \neq 0$). Los líquidos y gases no permiten los esfuerzos de corte. En consecuencia $\mu = 0$, donde la velocidad de la onda en líquido o gas está dada por la ecuación (2)

$$V_p = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (2)$$

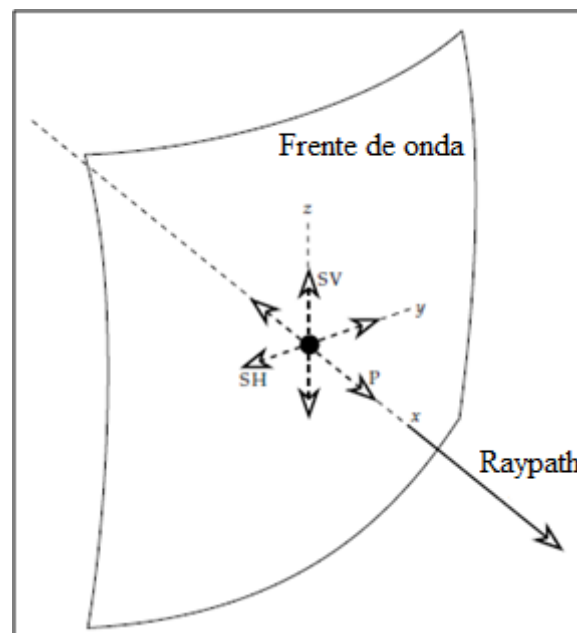


Figura 4: Representación de un frente de onda, se muestra un sistema cartesiano referencial en conjunto con los nombres de cada desplazamiento de las partículas según los ejes, las ondas *P* coinciden con la propagación de la onda, mientras que las ondas *S* van perpendiculares (en los ejes *y*, *z*. Modificado de Lowrie (2007).

Ondas S

Las Ondas S, son aquellas cuya vibración es en dirección SV o SH (Figura 4). Son perpendiculares al sentido de propagación de la onda, similar al agitar una cuerda.

Donde V_s es la velocidad de la onda de corte, dada por la ecuación (3)

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (3)$$

La única propiedad elástica que determina la velocidad de la onda de corte es la rigidez o el módulo de corte μ . En líquidos y gases $\mu = 0$ y las ondas de corte no pueden propagarse. En los sólidos, en forma de comparación de la ecuación 1 y la ecuación 3 se obtiene la ecuación (4)

$$V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2 = \frac{K}{\rho} \quad (4)$$

Por definición, el módulo de compresibilidad K es positivo (por que en el caso negativo un aumento en la presión de confinamiento causaría un aumento de volumen) y por lo tanto, V_p es siempre mayor que V_s .

En cuanto a la descripción de las ondas longitudinales, este análisis es simplificado. El paso de una onda de corte implica rotaciones de elemento de volumen dentro del plano normal a la trayectoria del rayo, sin cambiar su volumen.

2.2.2 Ondas superficiales

Las ondas que viajan en las superficies libres de un medio son llamadas ondas superficiales. Al igual que las ondas de cuerpo pueden ser clasificadas en 2 categorías las cuales son ondas Rayleigh (L_R) y ondas Love (L_Q), las cuales se diferencian por el tipo de movimiento que producen en las partículas.

Ondas Rayleigh

Las partículas en el frente de una onda Rayleigh están polarizadas para vibrar en el plano vertical, lo que produce un movimiento de partícula de combinación de vibraciones P y SV, referenciados en la Figura 4. La Figura 5 es un ejemplo ilustrativo del movimiento de la onda Rayleigh. El desplazamiento de las partículas

no se limita solo a la superficie del medio, las partículas debajo de la superficie también se ven afectadas por el paso de la onda Rayleigh como se muestra en la Figura 5. La profundidad de penetración se toma aproximadamente de forma empírica como 0.4λ donde λ es la longitud de onda.

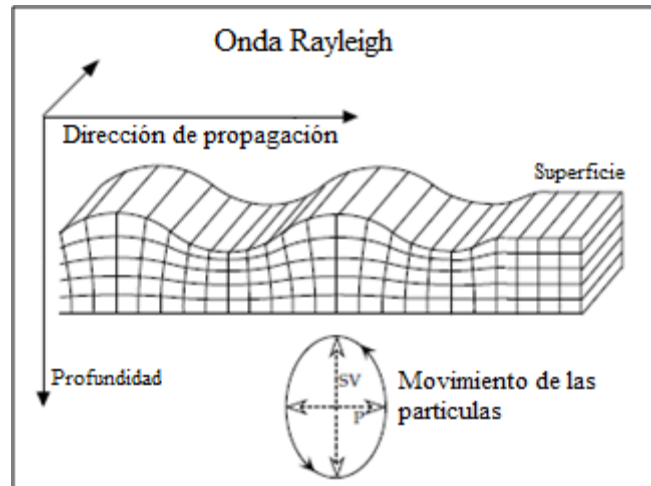


Figura 5: Representación del movimiento de la onda Rayleigh, como se ve en la figura, el movimiento producido es similar a las olas del mar. Modificado de Reynolds (2011).

Las ondas Rayleigh cuando se propagan en un medio uniforme no son dispersivas. Sin embargo, las capas horizontales con variación de velocidad son habituales en el suelo. Las ondas Rayleigh de baja frecuencia penetran más profundamente en el suelo que aquellas de alta frecuencia. La velocidad de la onda Rayleigh es proporcional a la velocidad de la onda de corte, la cual de forma general aumenta con la profundidad. Por lo tanto, a medida que cambia la velocidad horizontal y aumenta la velocidad con respecto a la profundidad es por lo que las ondas Rayleigh son dispersivas.

Ondas Love

En las ondas Love las condiciones de contorno que gobiernan el esfuerzo en la superficie libre de un semi-espacio elástico semi-infinito prohíben la propagación de ondas SH a lo largo de su superficie. Sin embargo, Love (1911) demostró que si una capa horizontal se encuentra entre la superficie libre y el semi-espacio infinito, las ondas SH dentro de la capa se reflejan en ángulos supercríticos. Desde la parte superior e inferior de la capa se pueden interferir de forma constructiva para dar origen a una onda de superficie con movimientos de partículas horizontales como se muestra en la Figura 6.

La velocidad β_1 de las ondas S en la capa cercana a la superficie debe ser menor que la capa subyacente β_2 . La velocidad de las ondas Love se encuentra entre los valores $\beta_1 < V_{LQ} < \beta_2$.

La teoría expone que la velocidad de las ondas Love con longitudes de onda muy corta son cercanas a la velocidad más lenta β_1 de la capa superior, mientras que las longitudes de onda más largas viajan a una velocidad cercana a la velocidad más rápida β_2 de la capa inferior. Esta dependencia de la velocidad con la longitud de onda se denomina dispersión. Las ondas Love siempre son dispersivas, porque solo pueden propagarse en un medio con capas de distinta velocidad.

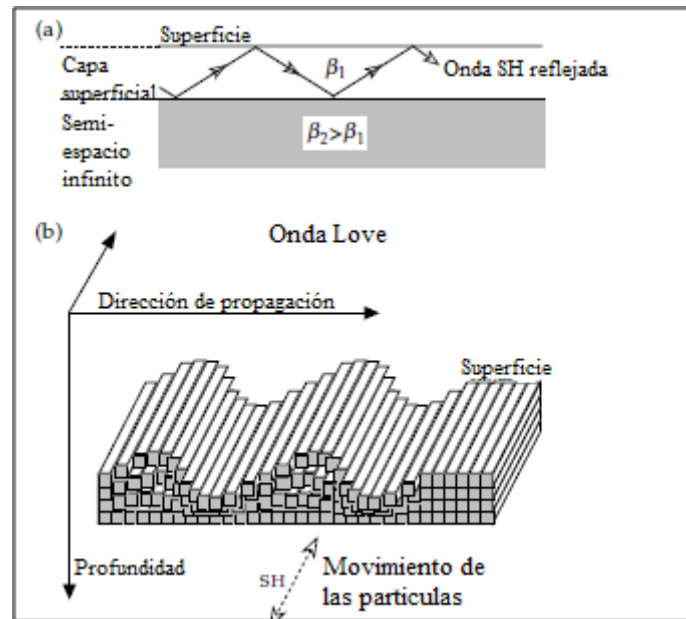


Figura 6: (a) Representación de una capa superficial donde los rayos sísmicos representan los ángulos supercríticos, así como las velocidades β de cada capa. (b) representación 3D del movimiento de las ondas Love, Reynolds (2011).

2.2.3 Vibraciones libres

Cuando se golpea una campana con un martillo esta vibra libremente en un número de frecuencias naturales. La combinación de oscilaciones naturales que se excitan le da a cada campana su particular sonido. De manera análoga, la liberación repentina de energía de un terremoto muy grande puede poner en vibración a toda la Tierra, con frecuencias naturales de oscilación que están determinadas por las propiedades elásticas y la estructura del interior de la tierra. Las oscilaciones libres implican una deformación tridimensional de la forma esférica de la Tierra y pueden ser bastante complejas.

Algunos tipos de oscilaciones libres son las oscilaciones radiales, esferoidales, toroidales, entre otros.

2.3 Dispersión de las ondas superficiales

La dispersión de las ondas superficiales proporciona una herramienta para determinar la estructura de velocidad vertical de la corteza interior y manto superior. Las ondas Love son intrínsecamente dispersivas incluso cuando la capa superficial y el semi-espacio subyacente son uniformes. Las ondas Rayleigh en un medio espacio uniforme no son dispersivas, sin embargo, las capas horizontales con diferentes velocidades generalmente están presentes o hay un gradiente de velocidad vertical. Las ondas Rayleigh con longitudes de onda largas penetran más profundamente en la tierra que aquellas con longitudes de ondas cortas. La velocidad de la onda Rayleigh es proporcional a la velocidad de la onda de corte y en la corteza y manto superior generalmente aumenta con la profundidad.

El paquete de energía que se propaga como una onda de superficie contiene un espectro de longitudes de onda. La energía en la onda se propaga como la envoltura del paquete de ondas, mostrado en la Figura 7, a una velocidad que se denomina velocidad de grupo (U).

La situación en la que la velocidad de fase aumenta con el aumento de la longitud de onda (es decir, las longitudes de onda más largas se propagan más rápidamente que las longitudes de onda cortas) se denomina dispersión normal. En este caso, como $\partial c / \partial \lambda$ es positivo, la velocidad del grupo U es más lenta que la velocidad de fase c . La forma del paquete de ondas cambia sistemáticamente a medida que las longitudes de onda largas más rápidas se mueven a través del paquete. A medida que pasa el tiempo, un pulso inicialmente concentrado se estira progresivamente en una larga serie de ondas. En consecuencia, en un medio en el que

la velocidad aumenta con la profundidad, las longitudes de onda largas llegan como la primera parte del registro de la onda de superficie a grandes distancias de la fuente sísmica.

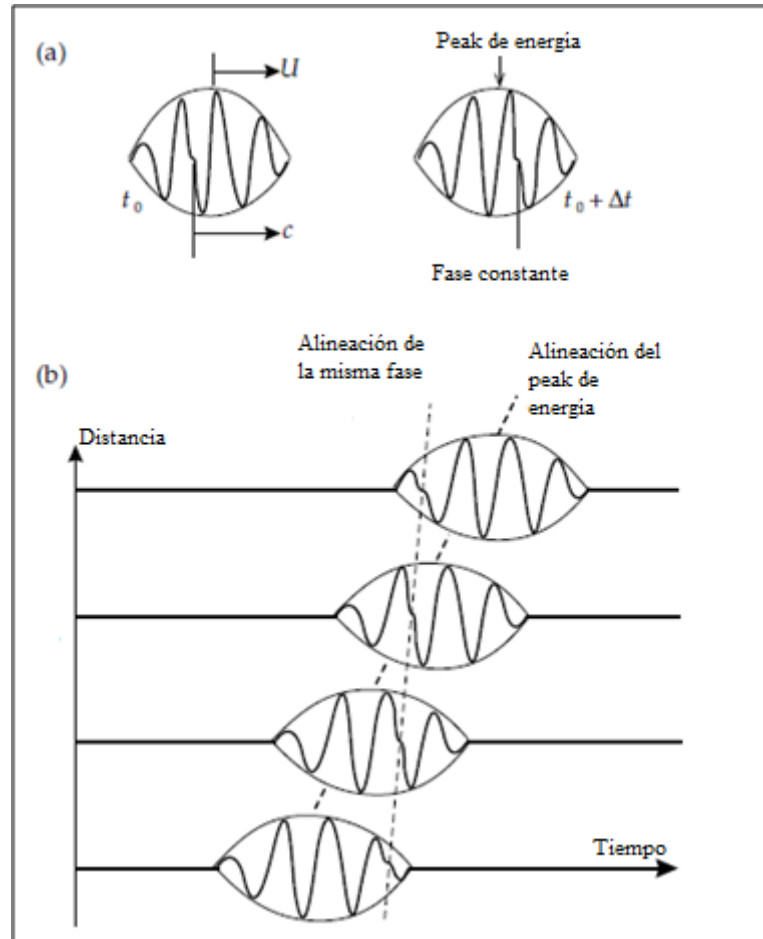


Figura 7: (a) Representación del peak de energía y la fase constante. (b) Representación de la alineación de fases dentro de un registro. Modificado de Lowrie (2007).

2.4 Ensayo MASW

El ensayo entrega como resultado la velocidad de las ondas S (V_s). Utiliza las ondas superficiales Rayleigh en las frecuencias más bajas (entre 1 a 30 Hz) recibidas por los geófonos.

Con los datos sísmicos se generan las curvas de dispersión, que es un gráfico de la frecuencia versus la velocidad de propagación (fase). La curva de dispersión con una velocidad de fase más lenta se conoce como el modo fundamental. En el caso que exista más de una velocidad de fase para una frecuencia dada, se producen dispersiones más rápidas para los modos superiores (armónicos). Es común que se obtengan varios modos presentes. La claridad con la que se puede identificar un modo de vibrar afecta la calidad de la interpretación, puesto que si se identifica erróneamente un modo superior como el modo fundamental, la determinación de las posteriores velocidades de onda de corte será mayor. En algunos casos el segundo o incluso más alto modo puede ser muy evidente mientras que el modo fundamental puede parecer estar ausente. Este es un tema clave en la calidad de la interpretación de los datos de MASW.

Una vez obtenido la curva de dispersión se deriva un perfil 1D de la velocidad de corte V_s con la profundidad que proporcionan las curvas de dispersión teóricas más cercanas a las curvas extraídas. A medida que la dispersión sísmica se traslada a la siguiente ubicación en el suelo, cada expansión adyacente dará lugar a un perfil 1D, V_s , que consta de calcular la velocidad promedio de la onda que requiere de la curva de dispersión

y además estimaciones del radio de Poisson y de densidad (Park et al., 1999) que dan a lugar a una imagen 2D de la distribución V_s y profundidad.

El ensayo se puede aplicar de tres formas activo, pasivo y combinado. Tanto el método pasivo como activo tienen la misma preparación en terreno, la cual según Park et al. (1999) consiste en el uso de múltiples receptores o geófonos separados entre sí por una distancia constante y lineal, que además se conectan hasta un canal que recibe toda la información (Park, Miller, Xia, y Ivanov, 2001).

Para el caso del ensayo activo, se utiliza como fuente de las vibraciones un martillo o una fuente puntual de ondas. Mientras que en el caso del ensayo pasivo se dejan los geófonos recoger información en base a las fuentes ambientales del terreno, como lo pueden ser vehículos que circulan alrededor, oleaje si es que está cerca de cuerpos de agua, gente caminando y las vibraciones propias de la Tierra.

Cada medición usando el método activo consiste en los diferentes registros obtenidos por los geófonos para una misma fuente o golpe de martillo, también puede variar la distancia de la fuente (llamado “offset”), Según (Park, Miller, et al., 2001) el objetivo del offset es obtener tanto una redundancia de datos, lo que permite ayudar a reconocer estructuras tanto como para disminuir o identificar el ruido ambiental. La junta o suma de diversos resultados para un mismo “offset” se conoce como “stacking” y consiste en superponer los resultados de diferentes mediciones para un mismo “offset” para disminuir el ruido asociado a las mediciones.

Si bien los ensayos activo y pasivo son parecidos, su diferencia radica en la profundidad de penetración, donde el ensayo activo funciona para la parte superficial mientras que el pasivo sirve para obtener información para las mayores profundidades.

El ensayo combinado es la unión de los datos de los ensayos pasivos y activos para obtener buenos resultados a nivel de superficie como a mayores profundidades.

2.5 Efecto de la Temperatura

Alzate-Diaz y Popovics (2009) utilizan el ensayo MASW para evaluar la aplicabilidad del ensayo en la medición del espesor del pavimento. Para ello realizaron un estudio en laboratorio donde fabricaron probetas con diferentes configuraciones de pavimento las cuales fueron sometidos a diferentes condiciones ambientales que van desde los 11°C hasta temperaturas mayores a 32°C.

Los resultados de las estimaciones según el MASW fueron contrastados con la extracción de sondajes. En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos por Alzate-Diaz y Popovics (2009) para un tipo de probeta “completa”, en donde el pavimento con un espesor de 15 cm se encuentra en contacto con un material granular estabilizador.

Las principales conclusiones son que el ensayo sirve para medir el espesor del pavimento de forma estimativa, puesto que no cuenta con una precisión mayor. Por otra parte, los autores proponen que gran parte del error de los resultados proviene que el modelo asume un radio de Poisson poco adecuado tanto para la temperatura como la edad del pavimento. Por ejemplo, para baja a media temperatura un radio de Poisson de 0.32 sería adecuado, mientras que para las altas un radio de 0.42 les entregó los mejores resultados (Alzate-Diaz y Popovics, 2009).

Tabla 1: Resultados obtenidos mediante en ensayo MASW para la sección completa del pavimento y sus errores con la comparación de un testigo de espesor de 153mm. Modificado de Alzate-Diaz y Popovics (2009)

Temperatura	Espesor predicho (mm)	Error (mm)	Error en %
Baja (<11°C)	167	14	9
Media (19-25°C)	160	7	5
Alta (>32°C)	123	-30	-20

2.6 Velocidad de la onda de corte promedio a los 30 metros

Dentro del Decreto Supremo 61 del 13 de Diciembre de 2011 (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2011) se agrega una clasificación sísmica completaría a la norma NCh 433 de 1996 modificada el 2009 (Norma Chilena Oficial, 2009). Esta clasificación está basada en la velocidad promedio de la onda S entre los primeros 30 metros (V_{s30}) y está descrita en la ecuación (5)

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{s-i}}} \quad (5)$$

Donde V_{s-i} Velocidad de ondas de corte para el estrato i , en m/s , h_i es el espesor del estrato i , en metros y n el número de estratos en los 30 metros superiores del terreno.

La velocidad de propagación de la onda sísmica se puede medir por ensayos Down-hole, Cross-hole o sonda de suspensión, también se puede medir en base a las ondas Rayleigh por los ensayos SASW (Spectral Analysis Seismic Wave), MASW (Multichannel Analysis Seismic Wave) o ReMi (Refracción Micro Tremor) (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2011).

La clasificación sísmica del Decreto Supremo 61 del 13 de Diciembre de 2011 (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2011) considera como los terrenos de mejor comportamiento (roca: tipo de suelo A) a los de mayor exigencia sísmica (suelo tipo E: suelo de compacidad o consistencia mediana). La Tabla 2 muestra la clasificación de suelo según la V_{s30} .

Por otra parte existen tipos de suelos que por sus propiedades geotécnicas se requieren de mayor caracterización que la V_{s30} (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2011), los cuales son:

- Suelos potencialmente licuables, entendiendo por ellos las arenas, arenas limosas o limos, saturados, con Índice de Penetración Estándar N_1 , menor que 20 golpes/pie (normalizado a la presión efectiva de sobrecarga de 0.10 MPa)
- Suelos susceptibles de densificación por vibración
- Suelos colapsables
- Suelos orgánicos
- Suelos finos saturados con $LL > 80$ y espesor > 20 metros
- Suelos finos saturados de sensibilidad mayor a 10

Tabla 2: Clasificación sísmica del terreno de fundación. Tomado de Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2011)

Suelo tipo		V_{s30} (m/s)	RQD	q_u (MPa)	N_1 (golpes/pie)	S_u (MPa)
A	Roca, suelo cementado	≥ 900	$\geq 50\%$	≥ 10 ($\varepsilon_{qu} \leq 2\%$)		
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	≥ 500		$\geq 0,4$ ($\varepsilon_{qu} \leq 2\%$)	≥ 50	
C	Suelo denso o firme	≥ 350		$\geq 0,3$ ($\varepsilon_{qu} \leq 2\%$)	≥ 40	
D	Suelo medianamente denso o firme	≥ 180			≥ 30	$\geq 0,05$
E	Suelo de compacidad o consistencia mediana	< 180			≥ 20	$< 0,05$
F	Suelo especial	*	*	*	*	*

Dónde:

N_1 es el índice de Penetración Estandar normalizado por presión de confinamiento de 0.1 MPa. Aplicable solo a suelos que se clasifican como arenas.

RQD (Rock Quality Designation) según norma Astm D 6032.

q_u Es la Resistencia a la compresión simple del suelo.

S_u Es la resistencia al corte no-drenada del suelo.

2.7 Características del pavimento de asfalto

En el Manual de Carreteras Volumen N°4 (Ministerio De Obras Publicas, 2018) se encuentran planos para diferentes tipos de pavimentos, incluyendo los pavimentos rígidos y los pavimentos flexibles.

Dentro de la sección “Obras Tipo” para los pavimentos flexibles encontramos que la sección tipo de pavimento para la zona de estudio es la de Figura 8 donde se desprende que tanto la capa de asfalto, base granular y subbase poseen espesores variables, pero acotados a un espesor total mínimo de 30 cm y máximo de 59 cm.

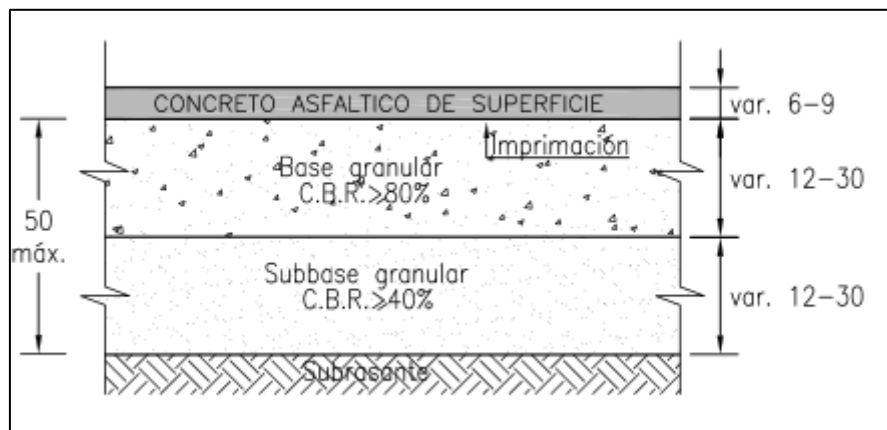


Figura 8: Sección tipo de pavimento para la zona de estudio. Las dimensiones están en centímetros. Tomado de Ministerio De Obras Publicas (2018).

Park, Ivanov, et al. (2001) describen el asfalto como un material desafiante, no solo por la escasa profundidad superficial, sino también por la inusual estructura sísmica. La capa superior posee velocidades de onda superiores a las capas de material subyacentes y cada capa del material posee un contraste significativo en la velocidad con las capas contiguas.

Heisey, Stokoe, y Meyer (1982) midieron las propiedades sísmicas del pavimento de asfalto mediante el método SASW (Spectral Analysis Seismic Wave, ensayo precursor al MASW que utiliza el mismo principio de la dispersión de las ondas). Los resultados obtenidos son resumidos en la Tabla 3.

Tabla 3: Tabla resumen de propiedades del pavimento de asfalto medidas por SASW para sitio Austin, modificado de Heisey et al. (1982). Los valores en el Sistema Internacional de Medidas están redondeados a la unidad.

Material	Espesor aproximado (cm)	Poisson	Velocidad de la onda S		Velocidad de la onda Rayleigh	
			ft/s	m/s	ft/s	m/s
Asfalto	16,51	0,35	1500	457	1400	427
Base	38,10	0,4	925	282	670	204
Sub-base	34,29	0,4	740	226	520	158
Sub-agregado	304,80	0,4	605	184	430	131

Considerando los antecedentes anteriores se estudió el comportamiento del ensayo MASW sobre pavimento de asfalto, considerando una metodología parecida a la utilizada por Park, Ivanov, et al. (2001), donde se considera que el aumento de temperatura sobre la superficie del pavimento induce errores en los espesores (Alzate-Díaz y Popovics, 2009) y cabe esperar que los resultados de velocidad y espesor para el primer estrato se encuentren alterados. Las velocidades obtenidas por Heisey et al. (1982) sirven como patrón de referencia para comparar el espesor y velocidad de la onda para estrato interpretado como el pavimento. Adicionalmente se espera que los resultados para la V_{s30} se vean alterados con el aumento de la temperatura.

3 METODOLOGÍA

3.1 Etapa de gabinete

La etapa de gabinete está acotada en dos grandes bloques los cuales son:

- Gabinete 1: Corresponde a la búsqueda de información en bases de datos y libros relacionadas al ensayo MASW, lo que incluye manuales y publicaciones. Durante este proceso, se redactó el marco teórico, se planificaron las pruebas de campo y se determinaron las condiciones de muestreo.
- Gabinete 2: La segunda etapa de gabinete corresponde a la etapa de búsqueda de información sobre el comportamiento sísmico del asfalto en publicaciones.

3.2 Toma de datos

Para este proyecto, se realizó el ensayo MASW con mediciones activas y pasivas, que luego, al procesar los datos se integraron para obtener los resultados del MASW combinado.

Se realizaron anteriormente ensayos de prueba en un terreno conocido para determinar el espaciamiento de los geófonos que se utilizó en este estudio. Los espaciamientos utilizados fueron de 3, 4 y 5 metros entre geófonos, con la misma metodología expuesta salvo de las mediciones de temperatura, puesto que todos los ensayos fueron efectuados durante la mañana. Se determinó que el espaciamiento a utilizar es de 4 metros porque fue el que entregó mejores resultados con respecto a la información disponible para ese lugar.

Se utilizaron para este estudio geófonos de 4.5 Hz, distribuidos de forma lineal, con un total de 24 geófonos espaciados cada 4 metros (Figura 9). Los geófonos se distribuyeron de forma lineal, debida a que por las dimensiones de una calle, su largo es mucho mayor que su ancho y que, además un arreglo adicional perpendicular o un arreglo en diagonal no aportaría mayor información.

Los datos son capturados por los geófonos, mediante el Geode Seismic Recorder de Geometrics los datos son enviados al computador portátil, los cuales se capturan con el software Seismic Controller Software (SCS) (Geometrics, 2016b) para ser guardados en formato binario con extensión *.dat*.

La configuración utilizada para la adquisición de los datos activos en SCS es la siguiente:

- Tipo de spread: Lineal
- Número de Geófonos 24, intervalo entre geófonos: 4 m
- Ubicación del shot: ingresada de forma manual
- Trigger: auto
- Sample: 0.5 ms, Length 1s, No delay
- Sin filtros
- Stacking – Limit 1 con autoestack activado, polaridades positivas
- All High gains

Por otra parte la configuración para datos pasivos en SCS es la siguiente:

- Tipo de spread: Lineal
- Número de Geófonos 24, intervalo entre geófonos: 4 m
- Ubicación del shot: 0
- Trigger: auto
- Sample: 2 ms, Length 32s, No delay
- Sin filtros
- Stacking – Limit 1 con autoestack activado, polaridades positivas
- All High gains



Figura 9: Distribución de los geófonos en terreno, espaciados cada 4 metros.

Con el fin de contar con condiciones de temperatura en el asfalto similares a las de Alzate-Diaz y Popovics (2009) se realizaron mediciones de temperatura superficial del asfalto sobre la línea de geófonos antes de cada grupo de mediciones. Se realizaron las mediciones el 14 de Noviembre, con el fin de obtener las condiciones de temperatura elevada de forma natural durante el día. Las mediciones comenzaron a las 13:00 hrs para terminar a las 19:00 hrs.

Se realizaron 5 mediciones para cada offset, los cuales se ubicaron en los extremos de la línea de geófonos como cada 4 geófonos, dando un total de 9 offsets por temperatura (Tabla 4)

Tabla 4: Resumen de la la ubicación de los offset para los ensayos.

Numero de geófono	n/a	1	4	8	12	16	20	24	n/a
Coordenada metrica	-4	0	12	28	44	60	72	92	96

Se tomaron medidas para evitar la destrucción del pavimento, para ello, se utilizó una placa de madera debajo de la placa de acero, de forma que se amortigua tanto el rebote de la placa como la destrucción del pavimento, adicionalmente se sujetó la placa de acero con el fin de que el rebote no generara ondas sísmicas adicionales, lo que se muestra en la Figura 10.



Figura 10: Metodología de los golpes, la placa de metal está apoyada sobre una placa de madera y sujeta para evitar el rebote.

3.3 Análisis de los resultados

Los registros sísmicos son procesados con el software Seisimager (Geometrics, 2016a), de donde se obtienen las curvas de dispersión, perfiles de velocidad y los perfiles de velocidad invertidos en 2D.

El proceso general de análisis de los datos sísmicos en el software Seisimager (Geometrics, 2016a) es el mostrado en la Figura 11.

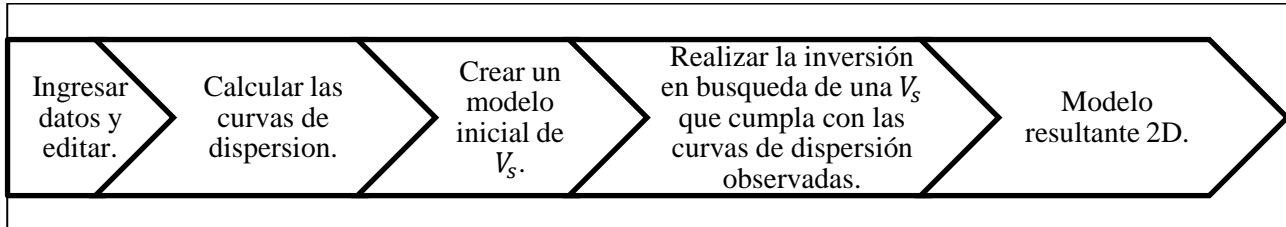


Figura 11: Esquema simplificado del procesamiento de los datos sísmicos, modificado de (Geometrics, 2006)

El primer módulo de Seisimager (Geometrics, 2016a) a utilizar es “Pickwin”, donde se ingresa los datos sísmicos según su tipo (datos activos o pasivos), luego de procesar los datos sísmicos en términos de velocidad de las fases y frecuencias permite la visualización de las curvas de dispersión. Durante el procesamiento de datos no se considera el uso de filtros en esta fase a menos de que los resultados fuesen caóticos entre sí.

Luego se utiliza el módulo “Waveeq”, donde se puede aplicar filtros a las curvas de dispersión, de los que se usaron *eliminar el modo más alto y los datos de baja calidad*. En base a las curvas de dispersión se genera un modelo inicial de V_s , el cual asume una densidad y un módulo de elasticidad promedio, permitiendo ingresar como variables la cantidad de estratos y profundidad, que respectivamente son 15 estratos y 40 metros. Sobre este perfil, se aplica un método iterativo para ajustar el perfil de velocidades inicial a las curvas de dispersión observadas. En este módulo, se incluyen las curvas de dispersión *activas y pasivas* para realizar el ensayo MASW combinado.

Finalmente en el módulo “Geoplot” se pueden ver los perfiles 2D de la distribución de la V_s resultante de la inversión. En este módulo se les aplicó un suavizado a los perfiles 2D para facilitar la interpretación, además, se presentan en escala 1/500.

La primera diferenciación entre los resultados estuvo dada por la temperatura medida sobre el asfalto al momento del ensayo.

Se compararon los resultados de MASW en 2D, donde la inspección visual fue el parámetro de comparación, diferencias en la distribución de las velocidades en el espacio o diferentes velocidades fueron consideradas durante esta evaluación.

Por otra parte, los resultados de MASW en 1D, se compararon mediante la dispersión de las velocidades obtenidas desde el gráfico de dispersión. Con estos resultados se buscó una correlación entre los resultados obtenidos con la temperatura.

Se calculó la V_{s30} resultante para cada una de las temperaturas.

Finalmente, se compararon las velocidades de la onda S obtenidos por el software con las obtenidos por Heisey et al. (1982).

4 RESULTADOS

Las temperaturas registradas fueron entre los 30°C hasta los 52°C, los cuales fueron medidos al inicio y final de los ensayos. La Tabla 5 resume las temperaturas obtenidas durante la ejecución del ensayo. Las temperaturas registradas son producto de la radiación solar, por lo tanto tenían un cierto grado de variabilidad durante la ejecución de los ensayos. Según lo que fue observado durante la instalación del equipo, la variación de temperatura no fue mayor a 2°C, por esto, se decidió medir la temperatura al inicio y final de los ensayos registrando el promedio de temperatura durante la medición.

Tabla 5: Resumen de las temperaturas promedio a las que se realizaron los ensayos MASW activos y pasivos. (*) La cantidad de registros utilizados es menor a la cantidad de registros totales debido a limitaciones del software de prueba. (**) Los registros para el último ensayo pasivo son menos producto del agotamiento de las baterías.

Hora	Registros activos			Registros pasivos		
	Temperatura promedio °C	cantidad de registros	registros utilizados(*)	Temperatura promedio (°C)	cantidad de registros	registros utilizados(*)
13:30 a 14:15	37,4	47	30	37	18	18
14:55 a 15:30	51,2	45	30	52,1	18	18
16:40 a 17:05	44	45	30	46,6	18	18
19:00 a 19:20**	33,6	45	30	30,9	9(**)	9

La Figura 12 hasta Figura 15 corresponden a los resultados MASW pasivos. A lo largo de los resultados de las diferentes temperaturas se observa en común que hay un cierto y constante “peak” de velocidad entre los 5 Hz y los 7 Hz.

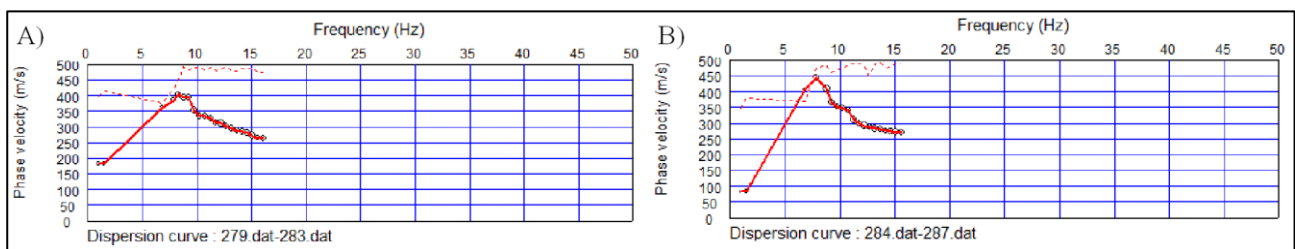


Figura 12: Resultados MASW pasivos para la temperatura de 30,9°C

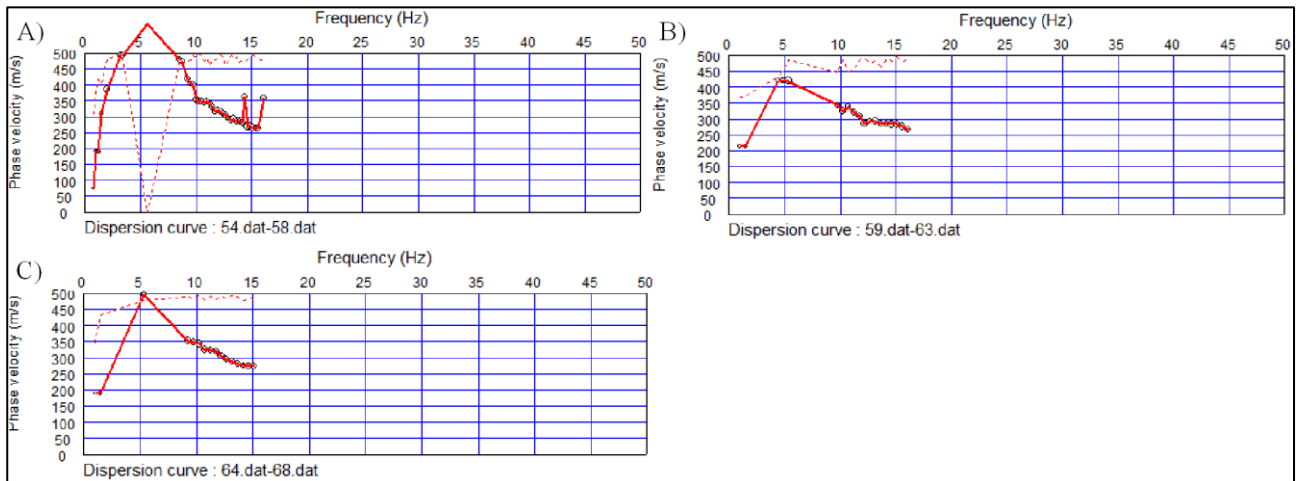


Figura 13: Resultados MASW pasivos para la temperatura de 37,0°C

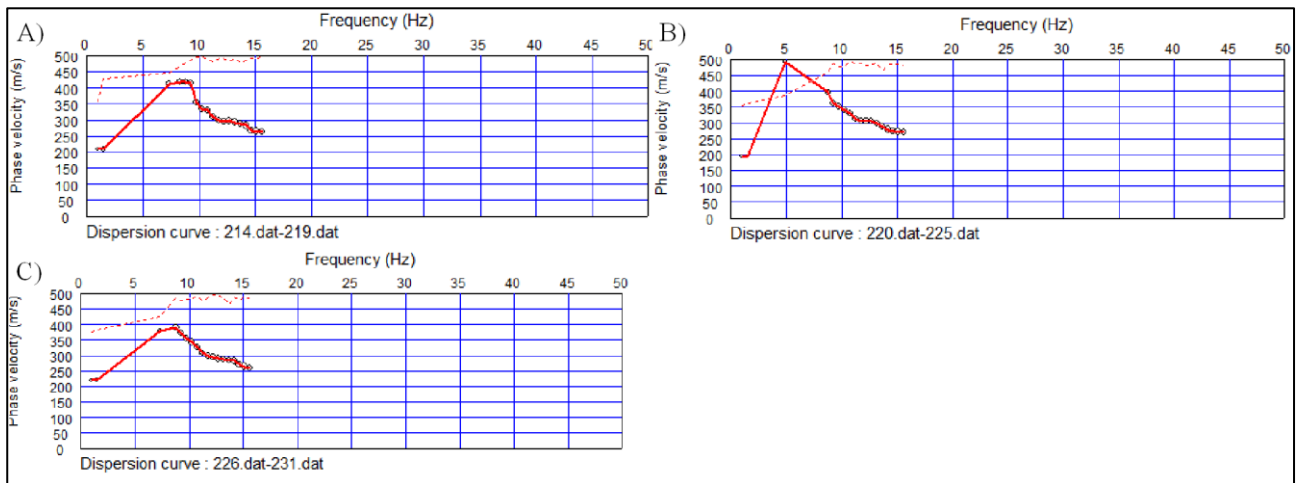


Figura 14: Resultados MASW pasivos para la temperatura de 46,6°C

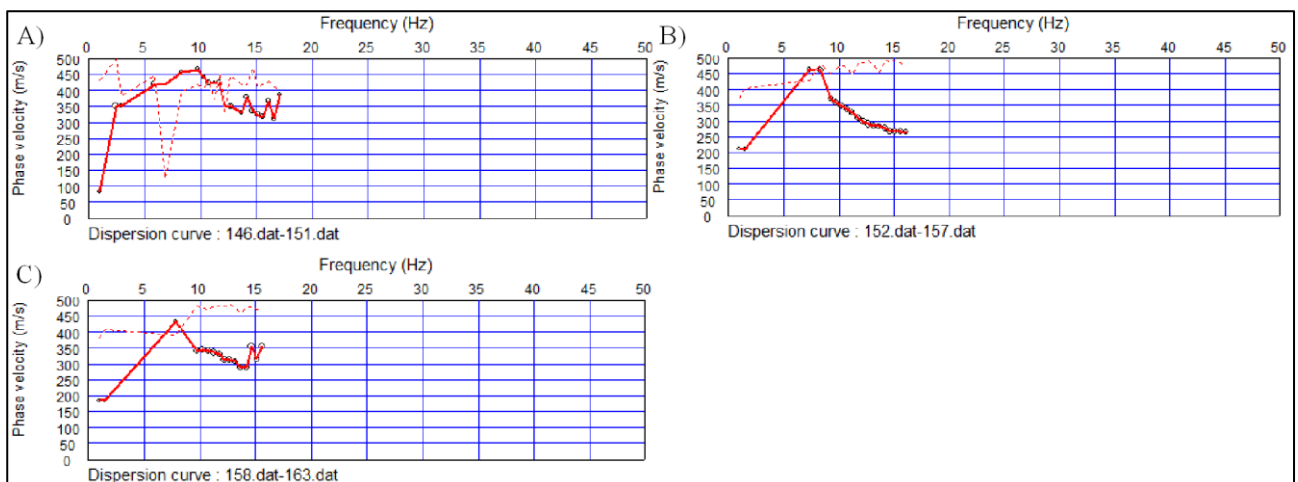


Figura 15: Resultados MASW pasivos para la temperatura de 52,1°C

En la Figura 16 se presentan los resultados MASW combinados (activos y pasivos) para las temperaturas de la Tabla 5. En las gráficas se muestra que los dos primeros estratos ubicados hasta los 1.4 y 3.1 metros poseen velocidades similares, y considerando que el ensayo fue realizado sobre el pavimento, estos estratos deberían corresponder tanto al pavimento como al o los estratos de suelo que fueron compactados debajo de

este, adicionalmente puede considerarse que capas de suelo no alterado también pueden estar dentro de estos estratos modelados.

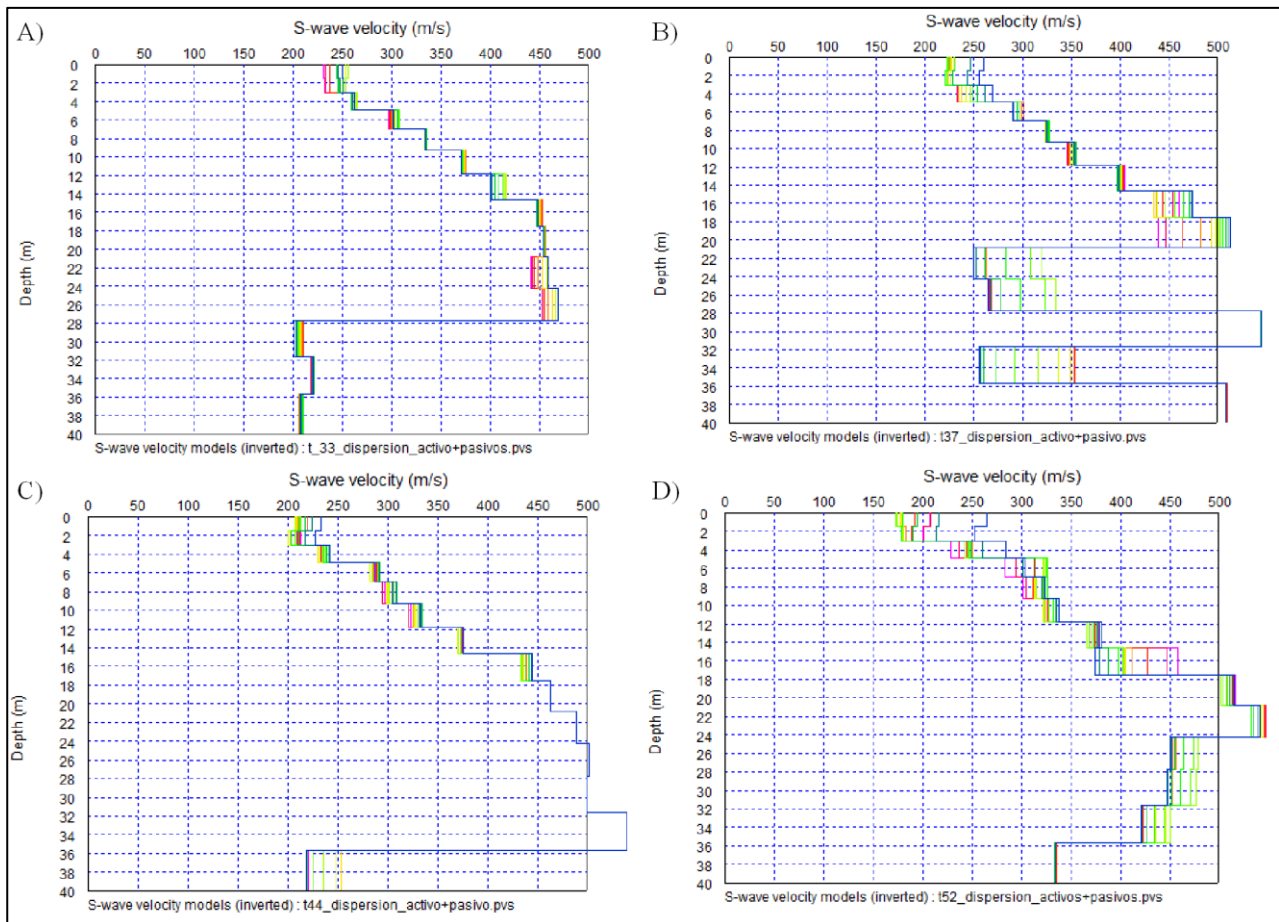


Figura 16: Perfiles V_s resultantes de los ensayos MASW activos y pasivos para las temperaturas A) 33,6°C, B) 37,4°C, C) 44,0°C y D) 51,1°C

La Tabla 6 caracteriza las velocidades de los tres primeros estratos. Al graficar las velocidades promedio vs la temperatura se obtiene la Figura 17, en donde se puede ver que la correlación entre la disminución de la velocidad y el aumento de la temperatura.

Tabla 6: Tabla resumen de promedio y desviación estándar de la V_s en m/s para los primeros 3 estratos.

Temperatura (°C)	33,6		37,4		44,0		51,2	
Profundidad (metros)	V_s	σ	V_s	σ	V_s	σ	V_s	σ
1,4	245	7,87	230	11,07	215	7,45	195	26,21
3,1	245	7,46	228	10,56	208	8,01	193	21,35
4,9	261	1,83	245	11,87	235	4,03	247	13,69

Las velocidades obtenidas por los ensayos comparadas con las obtenidas por Heisey et al. (1982) (Tabla 3) parecen acertadas considerando que la velocidad promedio ponderado según los espesores entrados para las 3 capas es de 293 m/s mientras que las registradas para el estrato considerado de pavimento están entre los 195 a 245 m/s. Esta variación correspondería a la temperatura de ejecución de los ensayos. Como se puede observar en la Tabla 6, la velocidad del primer estrato disminuye a medida de que aumenta la temperatura. Al utilizar la fórmula de regresión lineal de la Figura 17 obtenemos que la velocidad promedio del estrato para una temperatura de 20°C sea de 280 m/s correspondiente a temperatura ambiente. Al comparar los resultados de la velocidad ponderada obtenida en base a la Tabla 3 y la velocidad obtenida de la regresión se

considera que una diferencia de un 4% aproximado es aceptable, pese a que por el espesor obtenido por el modelado se incluyen estratos subyacentes al pavimento.

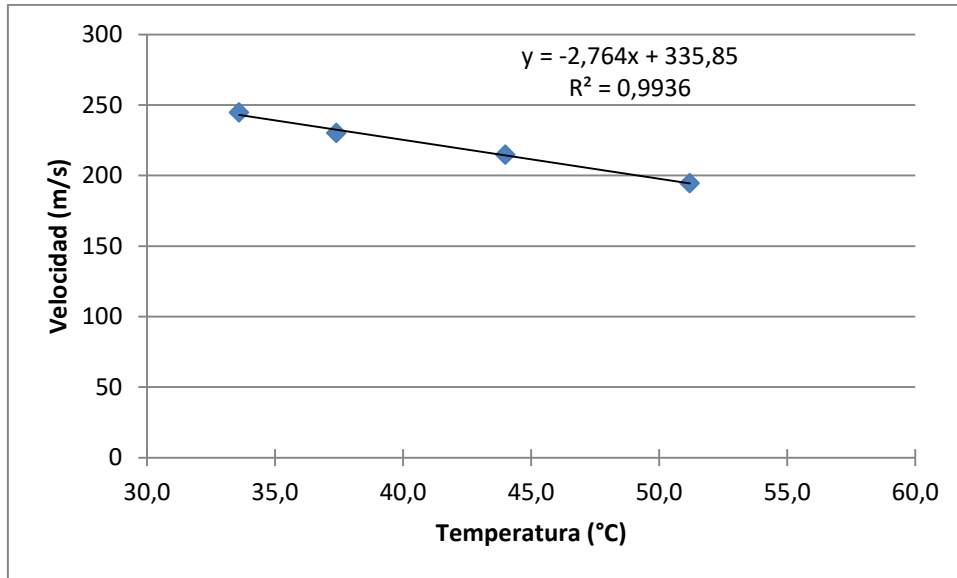


Figura 17: Grafica temperatura vs velocidad promedio del estrato 0 a 1.4m

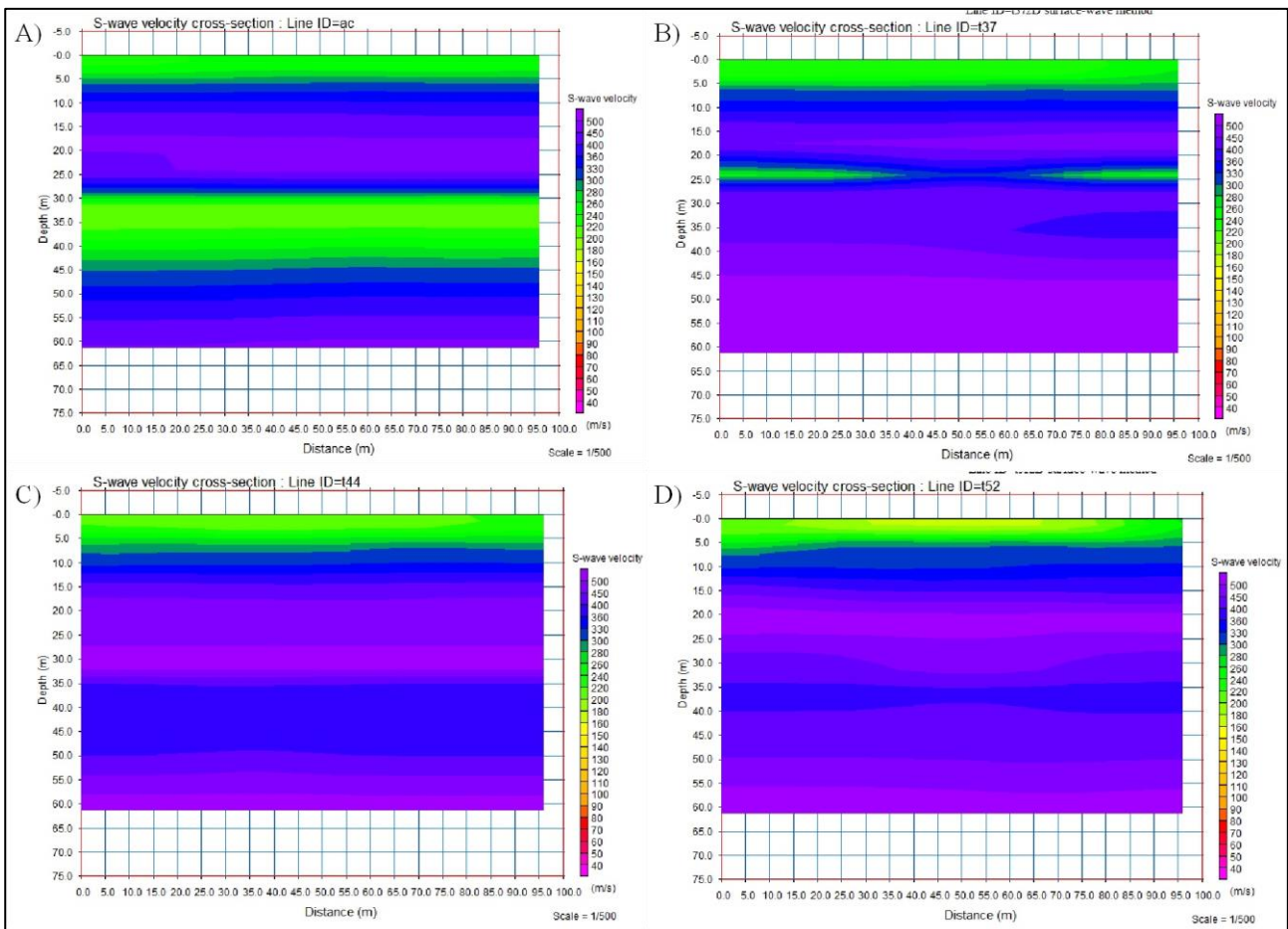


Figura 18: Perfiles V_s en 2D resultantes de los ensayos MASW combinados para las temperaturas A) 33,6°C, B) 37,4°C, C) 44°C y D) 51,1°C. Colores amarillos a verdes representan estratos de baja velocidad, azules de media velocidad y púrpuras de alta velocidad.

Los resultados de la Figura 18 son el perfil 2D de la V_s , donde se puede ver la paulatina desaparición de un estrato ubicado aproximadamente a los 30 metros. A medida que aumenta la temperatura comienza a difuminarse.

Tabla 7: Resultados V_{s30} para cada temperatura de medición. Las velocidades y espesores de los estratos son obtenidos de la Figura 16

Temperatura (°C)	33,6	37,4	44	51,2
V_{s30} (m/s)	372	353	386	387

En base a la Tabla 7 se observa que no hay una gran variación en los resultados para la V_{s30} . Debido a la limitante del pavimento como obstáculo para obtener muestras de suelo así como también para la ejecución de otros ensayos para poder clasificar el tipo de suelo en base al Decreto 61 del 13 de Diciembre de 2011, la clasificación del suelo en este caso no puede realizarse.

La Figura 19 muestra el resultado del ensayo MASW combinado pero con cambios en las condiciones de modelado, en este caso se utilizaron 20 estratos. Como se puede observar en la figura, el modelo presenta problemas de continuidad para el primer estrato, de hecho el estrato de baja velocidad se encuentra cubierto por un estrato de mayor velocidad en uno de sus extremos. En el caso de los 20 estratos se encontró que disminuye el espesor de la primera capa (interpretada como pavimento) reduciéndose a 1.2 metros.

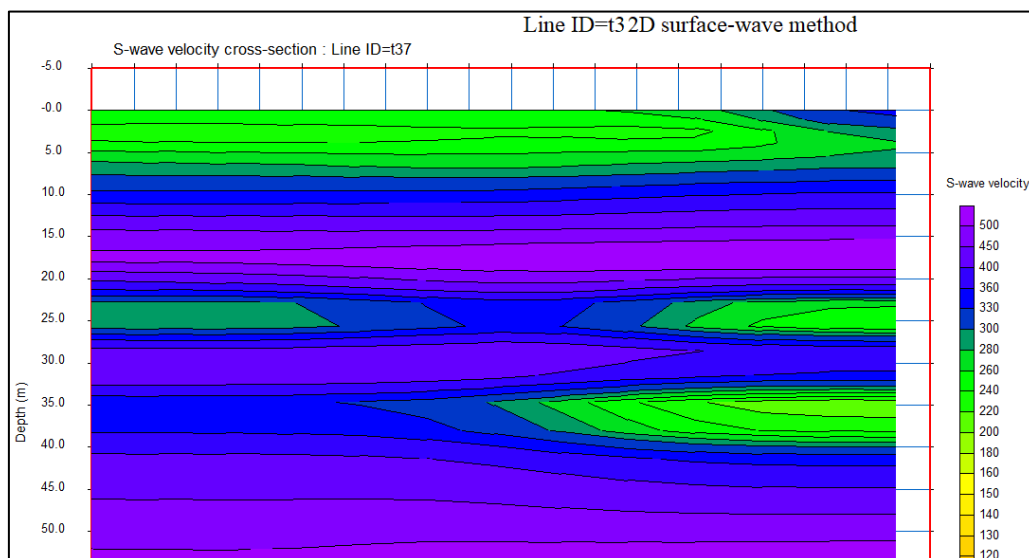


Figura 19: Resultado MASW combinado en 2D para la temperatura de 37,4 °C. Modelado con 20 estratos y para una profundidad de 40 metros.

5 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Considerando los resultados de la Figura 16, la sensibilidad del ensayo MASW en este caso, no alcanza a ser la ideal para caracterizar el asfalto. Park et al. (1999) propone que para los estratos más delgados se requiere de disminuir el offset y/o el espaciado de los geófonos. Considerando la Figura 8 se recomienda cambiar el espaciado entre geófonos a unos 5 a 10 cm para ver en mejor detalle el pavimento, lo que en la práctica de un ensayo MASW en condiciones normales es contraproducente, considerando que los espaciamientos comunes van entre los 3 a 5 metros para que su alcance en profundidad pueda entregar la V_{s30} .

Alzate-Diaz y Popovics (2009) utilizan una metodología en la cual el espaciado de los geófonos corresponde al margen para identificar las capas de asfalto, en cambio, el objetivo de esta investigación es cambiar las condiciones de espaciado y offset para revisar si al cambiar la escala de espaciamientos y offset los ensayos MASW se comportan de la misma forma.

Como ya se mencionó en los resultados y se puede observar en la Figura 16, el espesor del pavimento determinado por los resultados de las 4 temperaturas fue constantemente 1.4 metros, lo que implica, que el ensayo sobredimensiona el pavimento, agrupando adicionalmente otro/s estratos parcial o totalmente dentro de un gran estrato de 1.4 metros.

Durante el modelado se consideró el utilizar en el modelo 10, 15, 20, 25 y 30 estratos, donde como resultado se obtenía un cambio en el espesor del primer estrato que fue disminuyendo a medida que aumentaban los estratos desde los 2.5 metros hasta los 80 centímetros. En el caso de los 20 estratos de modelado, se consideran que no son correctos, puesto que en el resultado de MASW compuesto en 2D se ve que el pavimento según el modelo no es continuo lo que va en contra tanto de los resultados anteriores como del perfil tipo de pavimento. Los resultados de modelación para los 25 y 30 estratos fueron descartados porque el software en modo de prueba no permite más de 20 estratos para los resultados en 2D, por lo tanto, no se puede hacer la inspección visual de la distribución de los estratos donde puede darse el caso que el modelo presente problemas de continuidad como fue en el caso de los 20 estratos.

En la Figura 16 y Tabla 6, se observa que para el primer estrato la velocidad de la onda V_s disminuye en función de la temperatura en base a la ecuación de la Figura 17. Este es el principal efecto de la temperatura para los ensayos MASW en condiciones de espaciamiento normales de terreno.

Basado en los resultados obtenidos para el primer y segundo estrato se considera que el efecto de la alta temperatura del asfalto conduce a errores en los espesores de los estratos en esta escala de espaciamientos. Comparando con los resultados de Alzate-Díaz y Popovics (2009), se encuentra un efecto adverso al esperado, puesto que en esta investigación se mantuvo el espesor del estrato considerado asfalto constante, en cambio, en la Tabla 1 existía una disminución del espesor del estrato con respecto a las altas temperaturas ($>32^\circ\text{C}$). Esto se explica por el cambio drástico del espaciamiento de los geófonos.

Dentro de la investigación estaba considerado realizar Refracción como segundo método para identificar los primeros estratos y comparar. La primera dificultad encontrada es que los geófonos utilizados para este ensayo son de frecuencias entre 10 Hz a 30 Hz (Geometrics, 2019), por otra parte las curvas camino tiempo (parte esencial para el ensayo de refracción) son parecidas pese a las diferentes temperaturas, pero no son consistentes con el modelo obtenido mediante MASW ni con el perfil de pavimento. Esto se puede confirmar por Park, Ivanov, et al. (2001) quienes confirman que el pavimento de asfalto es complicado debido a las diferentes capas de diferentes espesores con velocidades muy diferentes, confirmadas por las velocidades en Tabla 3 de Heisey et al. (1982) y el perfil tipo de la Figura 8. Adicionalmente en el sitio del fabricante (Geometrics, 2019) no recomienda la realización de refracción en pavimento por la misma razón de la diferencia de velocidades, catalogando adicionalmente de extremadamente difícil.

Con respecto al estrato fantasma en la Figura 18 que desaparece a medida que aumenta la temperatura, se ve que el estrato de baja velocidad desaparece paulatinamente. En primera instancia, esta diferencia podría asumirse como ruido ambiental, pero las mediciones se realizaron bajo mínimas interferencias de ruido, pese a estar frente a un condominio, la cantidad de vehículos que transitaron durante el día fue menos a 10 vehículos, por otra parte, no se encontró una fuente constante de ruido en los alrededores.

Cuantificar el grado de error con la información proporcionada es cuestionable, puesto que a falta de refracción, un sondaje o el perfil geotécnico del pavimento es difícil saber el grado de diferencia entre el modelo y la estratificación real del terreno.

La comparación visual es la forma de comparación entre los modelos donde asumimos un grado de error aleatorio entre ellos, por ejemplo, entre los modelo C y D de la Figura 18 se aprecian similitudes y podría considerarse que más allá del cambio de la velocidad del estrato que engloba el pavimento. Por otra parte, entre A y B (Figura 18) existe una gran diferencia tanto espacial como de velocidades, por lo tanto se interpreta que si hay una diferencia real entre esos modelos para esas temperaturas. Adicionalmente producto de la comparación entre A y C se observa que espacialmente son muy similares, pero las velocidades varían para la profundidad de 30 metros a 55 metros en un rango de alrededor de 100 m/s .

Comparando las diferencias de velocidades promedio para el primer estrato (Tabla 6) que incluye al asfalto para las temperaturas de 33.6°C y 44°C son 30 m/s . Considerando la temperatura de 33.6°C como base, la diferencia de velocidades es de 30.95% más lento mientras que para el estrato de los 35 metros de



profundidad tenemos una diferencia de velocidades aproximadamente un 40% más rápida. Pese a esto, los resultados de la V_{s30} (Tabla 7) para cada una de las temperaturas no varía en gran medida.

Desde la geología de la macro zona de estudio, sabemos por Gajardo (1980) que la estratificación de la Formación La Montaña es horizontal, esto se comprueba con los resultados obtenidos por el ensayo MASW.

En virtud de lo anterior, se considera que la temperatura en el pavimento es un factor a considerar al momento de realizar ensayos MASW, sobre todo cuando se quieren un perfil 2D con la forma y distribución de los estratos, en cambio en este estudio, la V_{s30} parece no ser afectada por la temperatura superficial.

Se recomienda en caso de que el suelo por donde pase la línea esté cubierto parcial o totalmente con pavimento realizar las mediciones de la superficie del pavimento a una temperatura cercana a temperatura ambiente (es decir alrededor de 20°C).

6 REFERENCIAS

- Alzate-Diaz, S. P., & Popovics, J. S. (2009). Application of MASW to characterize pavement top layers. *Proceedings: Non-Destructive Testing in Civil Engineering*.
- Cohen, K., Harper, D., & Gibbard, P. (2018). International Chronostratigraphic Chart 2018/08. *International Commission on Stratigraphy*.
- Fuenzalida, H. (1965). Clima. *Geografía económica de Chile*, 99, 152.
- Gajardo, A. (1980). AVANCE GEOLOGICO HOJA CONCEPCION-CHILLAN. REGION DEL BIO BIO. ESCALA 1: 250.000. *Serie preeliminar*, 32.
- Geometrics, I. (2006). SeisImager/SW Manual. In *Manual v. 2.2* (pp. 281).
- Geometrics, I. (2016a). SeisImager (Version 0416). Retrieved from <http://www.geometrics.com/geometrics-products/seismographs/download-seismograph-software/>
- Geometrics, I. (2016b). Seismodule Controller Software (Version 11.1.69.0). Retrieved from <http://www.geometrics.com/geometrics-products/seismographs/download-seismograph-software/>
- Geometrics, I. (2019). Seismic Refraction FAQ. Retrieved from <http://www.geometrics.com/applications/frequency-asked-questions/seismic-refraction/>
- Gonzales-Bonorino, F. (1970). Series metamórficas del basamento cristalino de la Cordillera de la Costa, Chile Central. Publicación, Univ. de Chile. *Santiago*.
- Heisey, J., Stokoe, K., & Meyer, A. (1982). Moduli of pavement systems from spectral analysis of surface waves. *Transportation research record*, 852(22-31), 147.
- Hervé, F., Godoy, E., Del Campo, M., & Ojeda, J. (1976). *Las metabasitas del basamento metamórfico de Chile central y austral*. Paper presented at the Congreso Geológico Chileno.
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2019). *Cartografía Censo 2017 Región de Ñuble*.
- Love, A. E. H. (1911). Some problems of geodynamics. In: Cambridge University Press.
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of geophysics*: Cambridge university press.
- Ministerio De Obras Publicas. (2018). Manual de Carreteras In (Vol. N°4 Obras Tipo, pp. 411). Santiago, Chile.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2011). Reglamento que fija el diseño sísmico de edificios y deroga Decreto N° 117, de 2010. *Diario Oficial*, 13.
- Muñoz-Cristi, J. (1960). Contribución al Conocimiento Geológico de la Cordillera de la Costa de la Zona Central. *Revista Minerale*s, 15(69), 28-47.
- Norma Chilena Oficial. (2009). NCh 433.(1996).“ *Diseño Sísmico de Edificios.*” *Instituto Nacional de Normalización, Chile*.
- Park, C. B., Ivanov, J., Miller, R. D., Xia, J., & Ryden, N. (2001). *Multichannel analysis of surface waves (MASW) for pavement-feasibility test*. Paper presented at the Proceedings of the 5th SEGJ International Symposium.
- Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3), 800-808.
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., & Ivanov, J. (2001). *Seismic characterization of geotechnical sites by Multichannel Analysis of Surfaces Waves (MASW) method*. Paper presented at the Tenth International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering (SDEE), Philadelphia.
- Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. UK: Wiley.