

Predicción de variación de curvas de atenuación a nivel de terreno durante la hincada de pilotes mediante caracterización geofísica del sitio

Prediction on variation of attenuation curves at ground level during pile driving works by geophysical site characterization

Mauro Codevilla & Pedro A. Covassi

consultor-director, AOSA SA, Buenos Aires, Argentina, mcodevilla@aosa.com.ar

consultor, AOSA SA, Buenos Aires, Argentina, p.covassi@aosa.com.ar

Eric D. Homenuc

consultor, INETEK, Córdoba, Argentina, eric.homenuc@inetek.com.ar

ABSTRACT: Ground vibrations induced by human activities that affect existing structures, are a widely studied topic. Indeed, there exist many standards or local codes which establish vibrations limit levels in relation to structural risks. Particularly, energy transmission to the ground by pile driving is a complex phenomenon which depends on both geotechnical site conditions and pile driving equipment. This paper shows a simple implementation of an analytical method for ground vibrations by pile driving proposed by Fellenius & Massarch (2004, 2008, 2015). The investigation was done in a Refinery Plant in Dock Sud, Buenos Aires Metropolitan Area. In addition to a typical geotechnical campaign. The execution of Multispectral Analysis of Surfaces Waves (MASW) and seismic refraction was proposed to improve the dynamic site characterization, particularly the shear wave velocity profile (V_s) and compressional wave velocity profile (V_p). Finally, several results on the relation between vertical particle velocity (mm/sec) – distance (m) – depth of toe pile driving (m) are presented.

KEYWORDS: Driven piles – MASW – Vertical particle velocity – Postpampeano – Attenuation curves

1 INTRODUCCIÓN

Dentro de la gran variedad de problemas de interacción terreno-estructura existentes en el ámbito de la ingeniería geotécnica, aquellos que involucran la existencia de acciones dinámicas presentan una complejidad mayor en lo que respecta a la predicción de comportamiento o respuesta frente a una acción, ya sea del terreno o de la estructura.

En forma particular, el estudio de propagación de ondas mecánicas en el terreno producto de la hincada de pilotes y su afectación al entorno cercano es considerado un fenómeno de alta complejidad. Numerosos autores han estudiado la problemática durante décadas (Attewell & Farmer 1973, Brenner & Viranuvut 1977, Attewell et al 1992, Woods 1997, Kim & Lee 2000, Massarsch 2004, Dungca 2016, Hamidi et al 2018), comenzando por simples formulaciones empíricas o semi-empíricas hasta el desarrollo de software específicos en la actualidad (GRL WEAP, CAPWAP).

1.1 Breve descripción del fenómeno de vibración del terreno por la hincada de un pilote

En la Figura 1 (Massarch, 2004) se visualiza el fenómeno descripto y las partes involucradas más relevantes. De manera simplificada, durante el proceso de hincada de un pilote se genera una transmisión de la energía cinética procedente del equipo de hincada (1) al cabezal de golpeo (2), luego al pilote (3) y posteriormente del pilote al terreno a través del fuste (4) y la punta (5).

El frente de propagación de onda que comienza por el extremo superior del pilote (A) generará nuevos frentes de onda que se transmitirán del pilote al terreno (B) y viajarán por este último una cierta distancia en función de las propiedades dinámicas del terreno

(C), pudiendo alcanzar estructuras cercanas existentes (D) cuya afectación dependerá tanto del frente de onda que arribó a la estructura como así también de la tolerancia de la estructura a la acción dinámica o umbral límite.

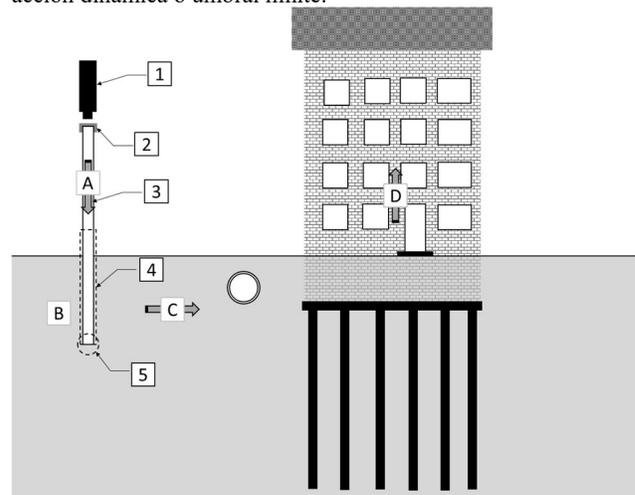


Figura 1. Transferencia de energía por hincada de pilotes al terreno, propagación y arribo a estructuras adyacentes (adaptado de Massarsch, 2004).

En relación con los frentes de onda que se van sucediendo posterior al inicio de la hincada, se pueden distinguir: i) frente de ondas esféricas de compresión (P-wave) y ondas esféricas de corte (S-wave) en correspondencia con la punta del pilote, ii) frente de ondas cilíndricas de corte (S-wave) en correspondencia con el fuste

del pilote, iii) frente de ondas reflectadas (Reflected wave) y refractadas (R-wave, onda de Rayleigh) a nivel de superficie. Cada uno de esos frentes de onda presenta una determinada ley de atenuación geométrica la cual permitirá mayor o menor alcance del frente de onda con respecto a su punto de origen. Lo dicho anteriormente se muestra en la Figura 2.

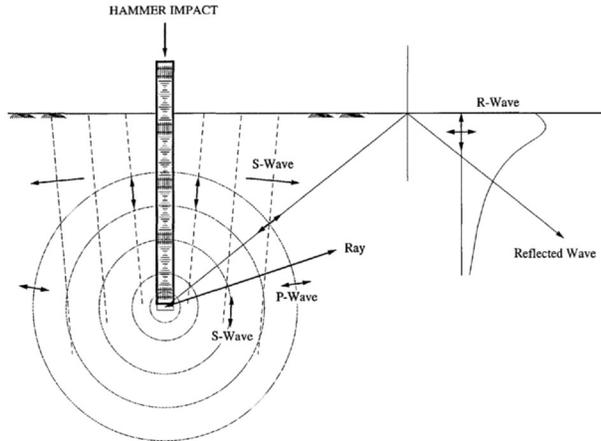


Figura 2. Esquema de propagación de frentes de ondas por punta y fuste durante hincas de pilotes (Woods, 1997).

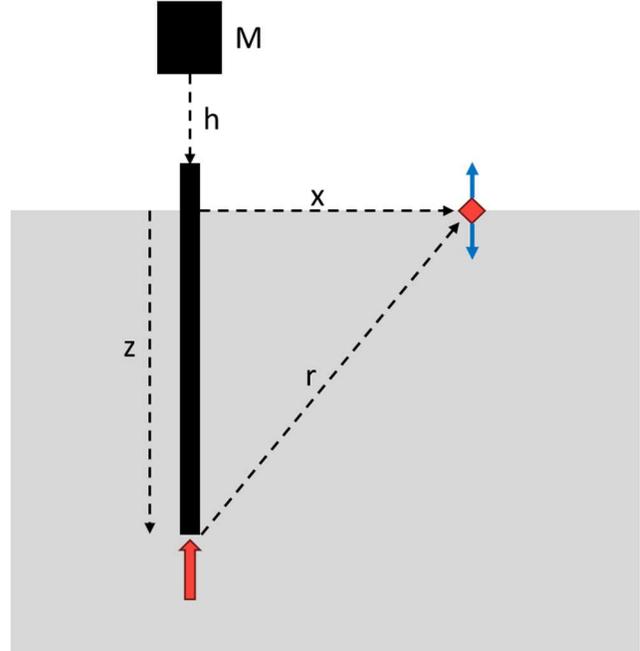


Figura 3. Esquema ilustrativo durante la hincas de un pilote (Massarsch & Fellenius, 2015).

1.2 Métodos semiempíricos para determinar el nivel de vibración en superficie por hincas de un pilote

Existen numerosos métodos empíricos para la estimación de vibraciones en el suelo debido a la hincas de pilotes. La ecuación más comúnmente utilizada para predecir la velocidad vertical de partícula a nivel de terreno viene dada por:

$$v = k \cdot \sqrt{Mgh} / (z^2 + x^2) \quad (1)$$

donde v : componente vertical de la vibración del suelo [m/s]; k : factor empírico [$m^2/s/(Nm)^{0.5}$]; $W = Mgh$: energía transferida al pilote por impacto del martillo de hincas [Nm]; M : masa del martillo de hincas [kg]; g : aceleración de la gravedad [m/s^2]; h : altura de caída del martillo de hincas [m]; z : profundidad de penetración del pilote [m] y x : distancia horizontal desde el pilote al punto de observación [m]. En la Figura 3 se presenta un esquema ilustrativo de los parámetros utilizados.

El valor del factor empírico k ha sido estudiado por diversos autores en base a mediciones realizadas durante la hincas de distintos tipos de pilotes y en diferentes perfiles de suelos. En la Figura 4 se presentan los resultados obtenidos por diferentes autores del factor empírico k para diferentes ensayos reales de hincas de pilotes. Claramente se observa una fuerte dispersión de los resultados.

En general, un valor $k = 0.75$ es comúnmente utilizado para unos primeros cálculos. Por otro lado, Heckman & Hagerty (1978) han demostrado que dicho factor es inversamente proporcional a la impedancia del pilote ($Z^P = E^P A^P / v^P$, [Ns/m]). De esta manera, Massarsch & Fellenius (2008) han propuesto la siguiente expresión:

$$k = 436/Z^P = 436/(E^P A^P) \cdot v^P \quad (2)$$

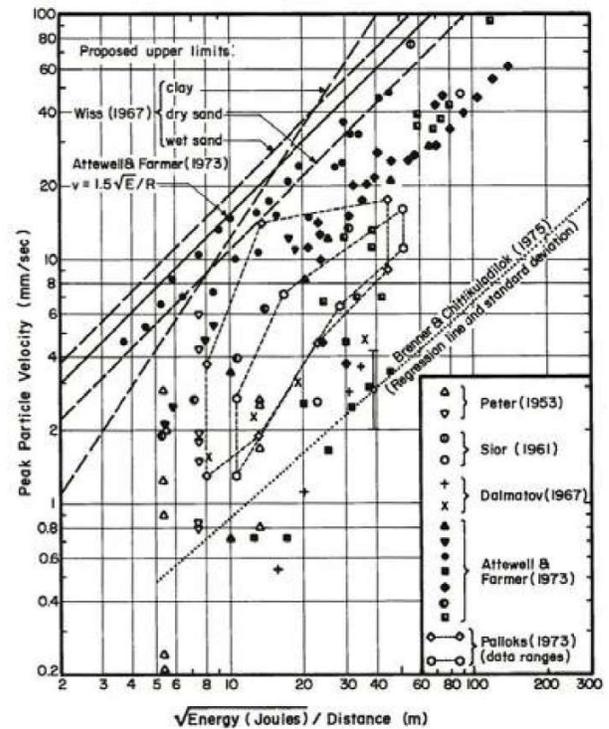


Figura 4. Resultados de medición de vibraciones durante hincas de pilotes en relación con el factor empírico k (Brenner & Viranuvut, 1977).

1.1 Los métodos geofísicos aplicados a geotecnia

Desde hace ya varias décadas los métodos geofísicos (ASTM D 6429, USACE geophysical exploration) han comenzado a ser herramientas complementarias de las campañas geotécnicas estándar en las cuales la prospección del terreno mediante perforaciones tradicionales (ensayos SPT) combinada con alguna de estas técnicas permiten brindar más información del terreno, no solo en lo que respecta a la predicción de parámetros sino además con relación al área/volumen de terreno investigado. Es decir, las perforaciones son herramientas de información 1-D mientras que varias de las técnicas geofísicas aplicadas en geotécnica se caracterizan por ser 2-D y 3-D.

1.1.1 Multianálisis espectral de ondas superficiales (MASW) y sísmica de refracción

En lo que respecta al estudio de propagación de ondas mecánicas en el terreno a muy bajos niveles de deformación, las técnicas de multi-análisis espectral de ondas superficiales MASW (Park 1998a, 1998b, 1999) y la sísmica de refracción (ASTM D 5777) permiten determinar los valores de velocidad del frente de onda de corte V_s y del frente de ondas de compresión V_p . Estos valores de velocidad son utilizados posteriormente con diversos propósitos geotécnicos, entre ellos:

- Estratificación del terreno por contraste de velocidad;
- Predicción de techo de roca;
- Predicción de nivel de agua libre subterránea;
- Predicción de módulos de deformación dinámicos (E, G, M) y coeficiente de Poisson dinámico (ν_d).

Con relación a la adquisición de datos en campo, en ambos ensayos se trabaja de la misma manera, básicamente: i) tendido de geófonos en trazo recto en forma equiespaciada, ii) conexión de geófonos a equipo hard-soft, iii) posicionamiento de la fuente activa (masa de boleó, caída de peso libre, voladura, etc) sobre el tendido, iv) captura de frente de onda en cada geófono producto del accionamiento de la fuente activa, v) repetición de los pasos iii) a iv) en diferentes posiciones del tendido. En las Figuras 5 a 6 se muestra en forma esquemática el lay-out básico y el equipamiento de trabajo utilizado, respectivamente.



Figura 5. Lay-out básico de adquisición de datos de línea sísmica.

El post-procesamiento de los datos adquiridos en gabinete consiste, brevemente, en: i) análisis de registros en forma individual, a los fines de evaluar la calidad de las señales, relación señal/ruido y la coherencia, ii) filtrado de las señales obtenidas en

bruto en el ancho de banda de los sensores, a los fines de eliminar ruidos de línea y frecuencias fuera de interés, iii) confección de curvas de dispersión velocidad de fase $V_{fase} (m/seg)$ – frecuencia $f (Hz)$ para ensayo MASW y curvas domocronas distancia geófonos $\Delta_{geof} (m)$ tiempos de arribo $t (mseg)$ para ensayo de sísmica, iv) confección de tomografías 2D velocidad de onda de corte $V_s (m/seg)$ – horizontal $x (m)$ – profundidad $z (m)$ para ensayo MASW y velocidad de onda de compresión $V_p (m/seg)$ – horizontal $x (m)$ – profundidad $z (m)$ para ensayo de sísmica.



Figura 6. Equipamiento: i) hard-soft de adquisición, ii) cables, iii) geófonos de baja frecuencia, v) masa boleó, vi) disco de impacto.

2 TRABAJO REALIZADO

2.1 Ámbito de trabajo

El sitio de emplazamiento en estudio se encuentra ubicado en Dock Sud, zona ribereña perteneciente al área metropolitana de Buenos Aires (AMBA), el cual se caracteriza por ser un polo petroquímico relevante debido a la gran cantidad de industrias allí presentes. En la Figura 7 se presenta una imagen satelital del sitio. Como se aprecia en la imagen, la zona se encuentra emplazada sobre la margen derecha del gran estuario del Río de La Plata.



Figura 7. Sitio de estudio, Dock Sud, AMBA (Google earth).

2.1 Perfil geotécnico

Producto de numerosas campañas efectuadas con anterioridad y de la experiencia acumulada con estos suelos (Núñez 1986, Sfriso, 1997, Codevilla & Sfriso 2019), el perfil geotécnico típico de los suelos cercanos a la ribera de Buenos Aires (CABA y AMBA) en los primeros 40 m de profundidad, presenta la siguiente secuencia estratigráfica:

- Rellenos artificiales (1 a 3 m): suelos antrópicos pobres a medianamente compactos.
- Formación Post-pampeano (espesor variable): limos de baja plasticidad y arcillas de alta plasticidad normalmente consolidados a ligeramente preconsolidados, compresibles ($N_{SPT} < 3$), saturados.
- Formación Pampeano (espesor variable): limos y arcillas de baja y mediana plasticidad, compactos a muy duros ($15 < N_{SPT} < 60$), preconsolidados, saturados.
- Formación Puelchense: arenas finas cuarcíticas densas a muy densas ($N_{SPT} > 40$).

Tal como se aprecia en la Figura 8 (Núñez 1986), la Formación Pampeano va reduciendo su espesor en dirección hacia el Río de La Plata hasta desaparecer por completo, lo cual se ve reflejado en las pruebas SPT efectuadas con regularidad en las cuales dicho depósito puede aparecer o no. En color anaranjado se indica en forma esquemática la ubicación del sitio de estudio. En la Tabla 1 se resume alguno de los parámetros medios obtenidos en función de las perforaciones SPT oportunamente efectuadas.

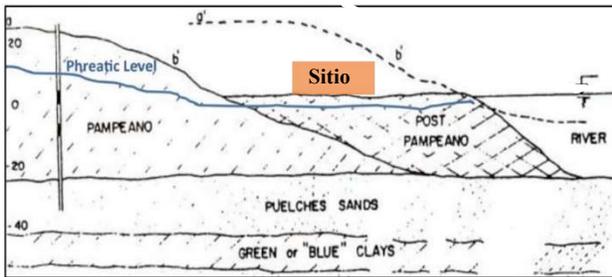


Figura 8. Perfil geotécnico típico de la ribera de Buenos Aires (Núñez 1986, dibujos fuera de escala).

Tabla 1. Perfil geotécnico medio adoptado para el sitio.

Unidad	USCS	γ (kN/m ³)	N_{SPT}
Rell. Artificial (0 a 3 m)	-	18-20	5
Fm. Postpamp. (3 a 11/15m)	CH CH, CL	16-17 17-18	< 2 10
Fm. Pampeano (11/15m a 30/35m)	CL CL, CH	18-19 17-19	> 20 10-20
Fm. Puelchense (30/35m a 40m)	SP, SP- SM	20-21	40

2.2 Caracterización geofísica del sitio

Se efectuaron mediciones sísmicas con procesamiento conjunto de sísmica de refracción y MASW en correspondencia con la ubicación en donde se necesitaba analizar el efecto del hincado sobre estructuras y equipos cercanos. En forma particular, era de sumo interés evaluar si la velocidad vertical de partícula a nivel de terreno pasaba los umbrales límites de equipos turbina de gran envergadura que no podían entrar en parada.

Se efectuaron tendidos de hasta 75 m de longitud mediante el empleo de 16 geófonos uniaxiales de 4.5 Hz de frecuencia natural (RTC Clarck) equiespaciados cada 5 m. La fuente activa consistió en una masa de bolebo de 5 kg de peso. Teniendo en cuenta de que el ámbito de trabajo era de carácter industrial con elevado ruido ambiente de base, se procuró levantar no menos de 5 registros por posición sobre cada tendido a los efectos de mejorar la relación señal-ruido durante la etapa de post-procesamiento (stacking). La metodología de trabajo adoptada fue idéntica a la descripta en el apartado 1.1.1.

En las Figuras 9 y 10 se muestra los resultados obtenidos en imágenes 2D para los ensayos MASW y sísmica de refracción respectivamente. En la Tabla 2 se resume en forma sintética la estratificación del perfil del terreno en términos de velocidades de onda de compresión y corte. A continuación se mencionan los aspectos más relevantes de la campaña geofísica efectuada:

- La estratificación del terreno es prácticamente horizontal en los primeros 25 - 30 m del perfil.
- Se registraron valores de velocidad de onda de corte entre $90 \text{ m/s} < c_s = V_s < 195 \text{ m/s}$.
- Se registraron valores de velocidad de onda de compresión entre $300 \text{ m/s} < c_p = V_p < 1450 \text{ m/s}$.
- No se evidencia un techo de roca en la profundidad investigada.
- A partir de los 2-3 m de profundidad el terreno se encuentra saturado ($V_p \sim 1450 \text{ m/s}$).
- Entre los 3 y 11 m de profundidad se detecta un horizonte de suelos muy compresibles ($V_s < 150 \text{ m/s}$).

Con respecto a la profundidad de prospección alcanzada ($z \sim 30\text{m}$), la velocidad del frente de onda de corte máxima obtenida ($V_{s \text{ máx}} \sim 200 \text{ m/seg}$) y la frecuencia natural de los geófonos utilizados ($f_{\text{mín}} \sim 3.5 \text{ Hz}$), se verificó el criterio propuesto por Rix & Leipski (1991):

$$z_{\text{máx}} \sim 0.5 \cdot \lambda_{\text{máx}} = 0.5 \cdot V_{s \text{ máx}} / f_{\text{mín}} \rightarrow z_{\text{máx}} \sim 28 \text{ m} \quad (3)$$

El contenido de frecuencias mínimo obtenido en la curva de dispersión se encuentra por debajo de la frecuencia natural de los geófonos utilizados ($f_{\text{nat}} > f_{\text{mín}}$), razón por la cual la velocidad de onda de corte máxima detectada presenta mayor incertidumbre. No obstante, en base al conocimiento del perfil estratigráfico local respaldado en numerosas campañas geotécnicas realizadas, se asumió para el cálculo el valor $V_{s \text{ máx}}$ y una profundidad de prospección media situada entre 25 - 30 m.

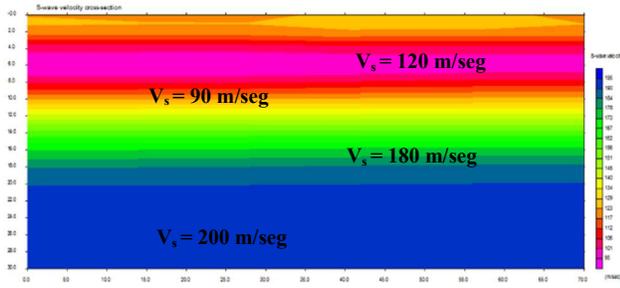


Figura 9. Imagen 2D resultante de ensayo MASW (velocidad de onda de corte $V_s = c_s$).

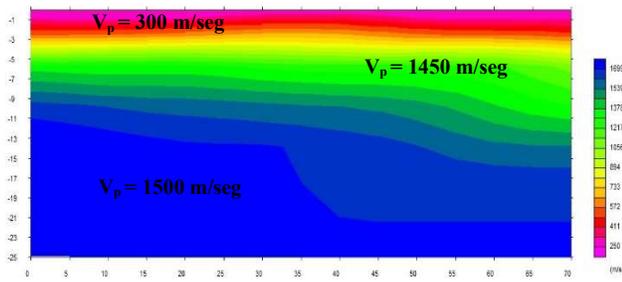


Figura 10. Imagen 2D resultante de ensayo sísmica de refracción (velocidad de onda de compresión $V_p = c_p$).

Tabla 2. Perfil geofísico medio adoptado para el sitio.

Unidad	$V_p = c_p$ (m/seg)	$V_s = c_s$ (m/seg)	v_d
Rell. Artificial (0 a 3 m)	300	120-150	0.3
Fm. Postpamp. (3 a 11/15m)	1450	90-100	0.5
Fm. Pampeano (11/15m a 30/35m)	1450	100-130	0.5
	1450	180-200	0.5
	1450	130-160	0.5

En relación con el módulo de Poisson dinámico informado (v_d), se determinó mediante el empleo de la siguiente ecuación:

$$v_d = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2(V_p/V_s)^2 - 2} \quad (4)$$

4 RESULTADOS OBTENIDOS

Con base a la información geotécnica y geofísica relevada en campo y gabinete se procedió a elaborar las curvas de atenuación necesarias en base a los métodos semi-empíricos indicados

anteriormente y en base al método energético propuesto por Fellenius & Massarch (2004, 2008, 2015).

4.1 Predicción de curvas de atenuación mediante método empírico (Fellenius & Massarch 2008)

Se contempló el uso de un martillo de hincas de masa conocida ($W = 40 \text{ kN}$) y altura de caída durante la hincas ($h = 0.5 \text{ m}$). En todos los casos las vibraciones fueron computadas para las distancias $x=5, 10, 15, 20, 30$ y 40 m . A su vez, para considerar tanto la influencia de la impedancia del pilote como la profundidad de hincado, se adoptaron los siguientes valores en correspondencia con la tipología de pilotes a utilizar:

- Pilotes octogonales circunscriptos por un círculo de diámetro 0.4 m .
- Profundidades de hincas hasta 30 m .

En la Figura 11 se presentan las curvas de atenuación para las diferentes profundidades de hincas y el factor empírico $k = 0.75$. En la Figura 12 se presentan las mismas curvas de atenuación utilizando el factor empírico propuesto en la ecuación (2) que contempla la impedancia del pilote.

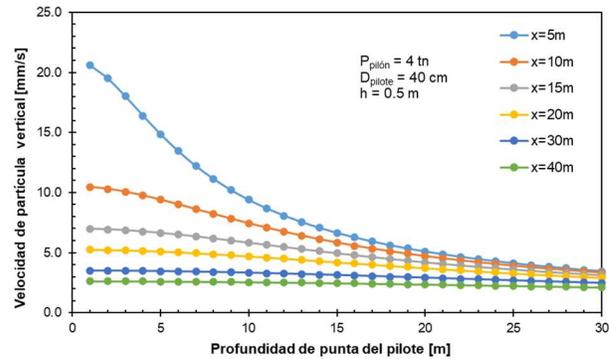


Figura 11. curvas de atenuación para las diferentes profundidades de hincas y el factor empírico $k = 0.75$.

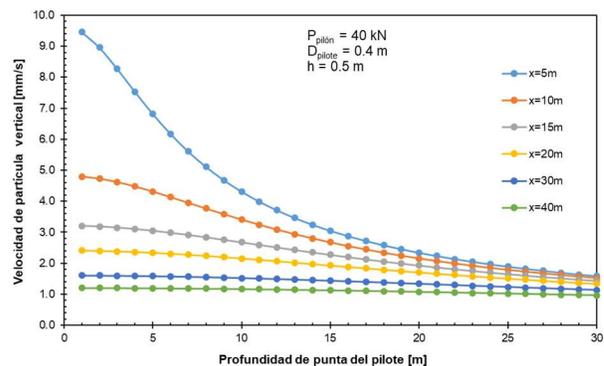


Figura 12. curvas de atenuación para las diferentes profundidades de hincas y el factor empírico $k = 436/Z^P$.

4.2 Predicción de curvas de atenuación mediante método energético (Fellenius & Massarch 2015)

Estos métodos están basados en la propagación de ondas en el terreno asumido como un medio elástico, dependiendo principalmente de: i) tipo de suelo, ii) estratificación del terreno, iii) propiedades dinámicas del terreno, iv) propiedades del pilote y equipo de hincia, v) interacción suelo-pilote por punta y por fuste.

Con base a lo expuesto en el apartado 1.1, los frentes de onda generados durante el proceso de hincado generan vibración del terreno circundante. En forma particular, las curvas de atenuación deducidas en forma analítica Fellenius & Massarch que permiten calcular la velocidad vertical de partícula a nivel de terreno debido a un frente de ondas esféricas (v_{sv}), cilíndricas (v_c) y Rayleigh (v_{sv-R}) viene dada por el siguiente conjunto de ecuaciones, respectivamente:

$$v_{sv} = k_s F_v E_t \cdot (F^H W_0)^{0.5} / r_s \cdot \cos(\theta) \quad (5)$$

$$v_c = k_c E_s \cdot (F^H W_0)^{0.5} / r_c^{0.5} \quad (6)$$

$$v_{sv-R} = v_{sv-crit} \cdot (R_2 / r_{crit})^{0.5} \cdot e^{-\alpha(R_2 - r_{crit})} \quad (7)$$

Donde k_s : factor de vibración por ondas esféricas [(m²/kg)^{0.5}]; F_v : factor de amplificación vertical [-]; E_t : eficacia de transmisión de vibración por punta [-]; F^H : factor de eficiencia del martillo de hincia [-]; W_0 : energía transmitida por el martillo [Nm]; r_s : distancia desde la punta del pilote hasta el punto de observación [m]; θ : ángulo de incidencia de onda esférica a nivel de terreno [°]; k_c : factor de vibración por ondas cilíndricas [(m/kg)^{0.5}]; E_s : eficacia de transmisión de vibración por fuste [-]; r_c : distancia radial desde el pilote hasta el punto de observación [m]; $v_{sv-crit}$: componente vertical de la velocidad de partícula por onda esférica [mm/seg]; r_{crit} : distancia horizontal crítica [m]; R_2 : distancia horizontal entre el punto de interés y el centro del pilote [m] y α : coeficiente de absorción [1/m].

A su vez, las expresiones de los factores de vibración por ondas esféricas y cilíndricas y coeficiente de absorción viene dada por el siguiente conjunto de ecuaciones, respectivamente:

$$k_s = 1 / (2\pi\rho\lambda)^{0.5} \quad (8)$$

$$k_c = 1 / (\pi\rho\lambda h_c)^{0.5} \quad (9)$$

$$\alpha = 2\pi D_M f / c_R \quad (10)$$

$$\lambda = c / f \quad (11)$$

donde ρ : densidad del medio [kg/m³]; λ : longitud de onda [m]; h_c : longitud de propagación de onda por el fuste; D_M : amortiguamiento material [(Hz/s)⁻¹]; f : frecuencia dominante de vibración [Hz]; c : velocidad de propagación del frente de onda (cilíndrica o esférica) [mm/seg] y c_R : velocidad de propagación del frente de onda superficial o Rayleigh [mm/seg];

El parámetro k ; a diferencia de los métodos empíricos planteados anteriormente; ya no es un único valor al depender de 2 frentes de onda diferentes y a su vez depende de la longitud de propagación de onda λ .

En lo referente al contenido de frecuencias producto de la vibración por hincado, Svinkin (2004) y Dungca et al. (2016) proponen la siguiente fórmula:

$$f = 0.5 \cdot \xi c^P / 2\pi L \quad (12)$$

donde ξ : factor de ajuste [-]; c^P : la velocidad de propagación de ondas del pilote [mm/seg]; L : longitud del pilote [m].

Para el caso del martillo y pilote adoptados en el presente análisis, las frecuencias fundamentales de vibraciones verticales rondan los 22 Hz para un tramo de pilote de 12 m de longitud, 14 Hz para el pilote de 24 m de longitud y 6 Hz para el pilote de 36 m de longitud. Asimismo, para el caso de la frecuencia de vibración del pilote (y atribuida a la frecuencia de vibración de las ondas esféricas generadas en la punta del pilote según Massarsch y Fellenius, 2008) es de 114 Hz para el caso de un tramo de pilote de 12 m de longitud, 57 Hz para el pilote de 24m de longitud y 38 Hz para el pilote de 36m de longitud.

Con base a los cálculos efectuados mediante el conjunto de ecuaciones presentado con anterioridad, en las Figuras 13, 14 y 15 se muestran las curvas de atenuación deducidas que permiten calcular la velocidad vertical de partícula a nivel de terreno debido a un frente de ondas esféricas (v_{sv}), cilíndricas (v_c) y Rayleigh (v_{sv-R}) generado durante la hincia de un pilote aislado. En las Tablas 3 y 4 se indican las principales características del tipo de pilote y equipo de hincia utilizados para este análisis.

Tabla 3. Pilote empleado en el análisis.

Propiedad	valor
Área (m ²)	0.133
Peso unitario H (kg/m ³)	2450
Impedancia (kNs/m)	1266
Velocidad de onda H (m/seg)	3900

Tabla 4. Equipo de hincia utilizado.

Propiedad	valor
Masa del pilón (kN)	40
Densidad del acero (kg/m ³)	7800
Veloc. de onda acero (m/s)	5100
Longitud del martillo (m)	3.65
Impedancia (kNs/m)	27200
Altura de caída (m)	0.50

La velocidad de partícula real será una combinación de los fenómenos descritos anteriormente, los cuales suceden en forma simultánea, considerando además que cada frente de onda viaja con diferente velocidad de propagación. Bajo estas condiciones, un enfoque racional aceptable consiste en determinar la velocidad vertical de partícula pico mediante la siguiente ecuación (Hamidi et al 2018):

$$PPV_{max} = Máx(v_{sv}; v_c; v_{sv-R}) \quad (13)$$

Existen otras expresiones presentes en la literatura que permiten determinar PPV_{max} . A los efectos del presente análisis, en donde se determinaron velocidades verticales para los 3 diferentes frentes de onda generados durante la hinca, se consideró adecuado utilizar dicha expresión.

De esta manera, en la Figura 16 se determina; para cada profundidad de hincado y distancia horizontal; la velocidad vertical de partícula pico a nivel de terreno producto de la hinca. Tal como se aprecia en el gráfico, el análisis efectuado permite inferir que durante los trabajos de hinca de un pilote aislado, en el perfil geotécnico estudiado y con el dispositivo de hinca seleccionado, los valores de velocidad de partícula vertical no deberían superar los 14 mm/seg, y para una distancia de 10 m desde el punto de hincado dicho valor máximo se reduce a 9 mm/seg. Estos valores se ubican dentro del rango de valores obtenidos mediante el empleo de los métodos empíricos descriptos anteriormente.

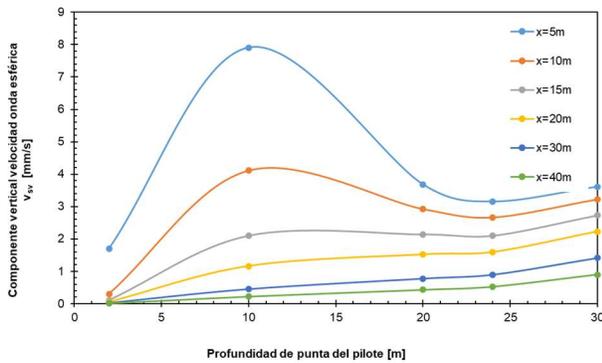


Figura 13. velocidad vertical de partícula a nivel de terreno (v_{sv}) debido a un frente de ondas esféricas generado durante la hinca de un pilote aislado.

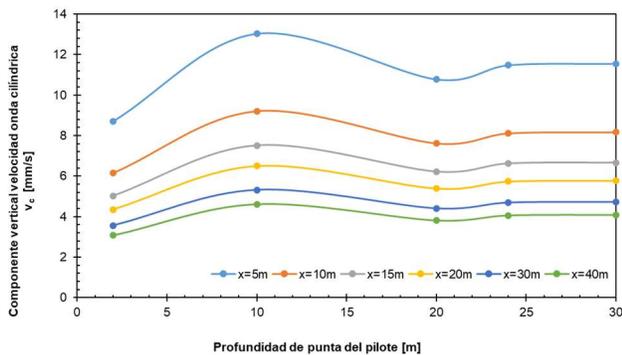


Figura 14. velocidad vertical de partícula a nivel de terreno (v_c) debido a un frente de ondas cilíndricas generado durante la hinca de un pilote aislado.

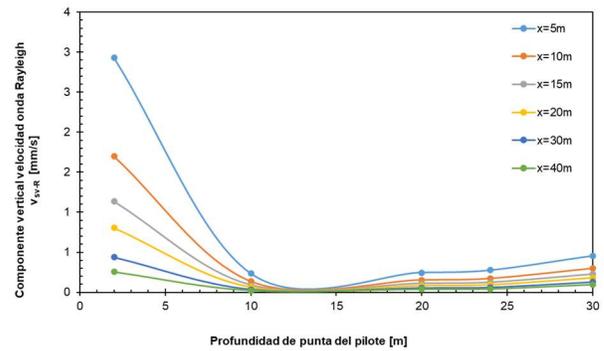


Figura 15. velocidad vertical de partícula a nivel de terreno (v_{sv-R}) debido a un frente de ondas superficial o de Rayleigh generado durante la hinca de un pilote aislado.

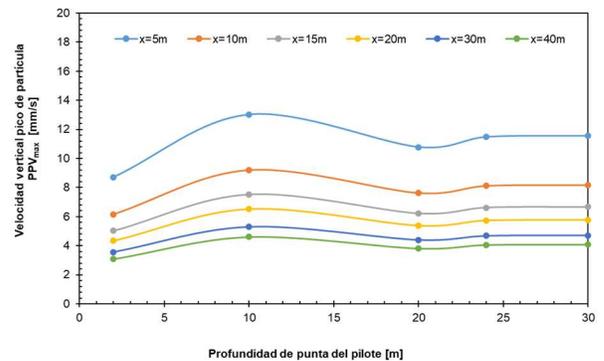


Figura 16. velocidad vertical pico de partícula a nivel de terreno (PPV) generado durante la hinca de un pilote aislado.

5 COMENTARIOS FINALES

El método propuesto por Fellenius & Massarch aquí presentado permite capturar en forma analítica los fundamentos claves para evaluar el grado de perturbación del terreno y estructuras cercanas durante un proceso de hincado de pilotes. No obstante, deben ser tenidas en cuenta las hipótesis y limitaciones que los autores mencionan en su investigación (2004, 2008, 2015).

Posterior a la ejecución del presente trabajo se desconoce si se han efectuado mediciones in situ durante la hinca real de los pilotes. Esta información resultaría clave y mandatoria para calibrar las curvas de atenuación obtenidas mediante los métodos anteriormente presentados.

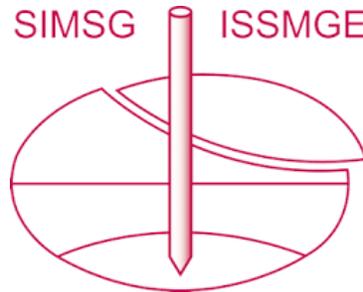
En relación con los métodos geofísicos, los autores del presente artículo destacan su necesidad de ejecución como parte de campañas geotécnicas estándar, tanto en etapa de investigación preliminar como a nivel de proyecto ejecutivo. Mas aún, forma parte de los métodos de investigación del terreno indicados en el Reglamento Argentino de estudios geotécnicos CIRSOC 401 (2018).

Por último, vale mencionar que la información aquí presentada es de carácter parcial, reservando en parte cierta confidencialidad del lugar exacto de trabajo por pedido del Comitente.

6 REFERENCIAS

- ASTM D6429-23 (2023). *Standard Guide for Selecting Surface Geophysical Methods*. ASTM Standards.
- ASTM D5777-18 (2018). *Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation*. ASTM Standards.
- Attewell, P.B. & Farmer, I.W. (1973). *Attenuation of ground vibrations from pile driving*. Ground Engineering, 6(4) 26 - 29.
- Attewell, P.B.; Selby, A.R. & O'Donnell, L. (1992). *Estimation of ground vibration from driven piling based on statistical analyses of recorded data*. Geotechnical and Geological Engineering, 1992, 10, 41-59.
- Attewell, P.B.; Selby, A.R. & O'Donnell, L. (1992). *Tables and graphs for the estimation of ground vibration from driven piling operations*. Geotechnical and Geological Engineering, 1992, 10, 61-87.
- Brenner, R.P. & Viranuvut, S. (1977). *Measurement and prediction of vibration generated by the drop hammer piling in Bangkok subsoils*. Proceedings of the 5th Southeast Asian Conference on Soil Engineering, Bangkok, July 1977, pp. 105-119.
- Codevilla M. & Sfriso A. (2019). *Geotechnical conditions in the Campana-Zárate industrial complex, Argentina*. XVI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Cancún, México.
- CIRSOC 401 (2018). *Reglamento Argentino de estudios geotécnicos*. Ministerio del interior, obras públicas y vivienda. Secretaría de planificación territorial y coordinación de obra pública. INTI.
- Dungca J.R., Acosta D.Y., Juego M.B., Sánchez H.M. & Sánchez I.S. (2016). *The Propagation Behavior of Pile-Driving-Induced Vibration done on Soil at Varying Distances and Its Effects on Existing Structures*. International Journal of GEOMATE, Vol 10, Issue 21, 1877-1883.
- Hamidi, A.; Homayou Rooz, A. F. & Pourjenabi, M. (2018). *Allowable Distance from Impact Pile Driving to Prevent Structural Damage Considering Limits in Different Standards*. Pract. Period. Struct. Des. Constr. 23(1): 04017029.
- Heckman, W.S. & Hagerty, D.J. (1978). *Vibrations associated with pile driving*. American Society of Civil Engineering, Journal of the Construction Division, 104(CO4) 385-394.
- Kim, D.-S. & Lee, J.-S. (2000). *Propagation and Attenuation Characteristics of Various Ground Vibrations*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 19, 115-126.
- Massarsch, K.R. (2004). *Vibrations caused by pile driving*. Deep Foundations Institute Magazine. Part 1: Summer Edition, pp. 41-44, Part 2: Fall Edition, pp. 39-42.
- Massarsch, K.R., & Fellenius, B.H. (2008). *Ground vibrations induced by impact pile driving*. The Sixth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Edited by S. Prakash, Missouri University of Science and Technology, August 12-16, 2008, Arlington, Virginia, 38 p.
- Massarsch, K.R. & Fellenius, B.H. (2015). *Engineering assessment of ground vibrations caused by impact pile driving*. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA 46(2) 54-63.
- Nazarian, S., Stokoe, K. H., II, & Hudson, W. R. (1983). *Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems*. Transport. Res. Record, 930, 38-45.
- Núñez E. (1986). Panel report. *Geotechnical conditions in Buenos Aires City*. V ICIAEG, 2623-2630.
- Park, C. B., Xia, J., & Miller, R. D. (1998a). *Ground roll as a tool to image near-surface anomaly*. 68th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 874-877.
- Park, C.B., Miller, R.D., & Xia, J. (1998b). *Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record*. [Expanded Abstract]: Soc. Explor. Geophysics, 1377-1380.
- Park, C.B., Miller, R.D., & Xia, J. (1999). *Multi-channel analysis of surface waves (MASW)*. Geophysics, v. 64, no. 3, p. 800-808.
- Rix, G. J. & Leipski, E. A. (1991). *Accuracy and resolution of surface wave inversion*, in Bhatia, S. K., and Blaney, G. W., Eds. Recent advances in instrumentation, data acquisition and testing in soil dynamics. Am. Soc. Civil Eng., 17-32.
- Sfriso A. O. (1997). *Caracterización de la Formación Postpampeano*, Boletín de la Sociedad Argentina de Mecánica de Suelos, No 34.
- Svinkin, M. R. (2004). *Minimizing Construction Vibrations Effects*. Practice Periodical on Structural Design and Construction, Vol. 9, No. 2, May 2004. ASCE.
- Woods, R.D. (1997). *Dynamic Effects of Pile Installations on Adjacent Structures*. NCHRP Synthesis 253, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.