

Utilización de ensayos no destructivos para verificar parámetros elásticos en un suelo blando estabilizado químicamente y reforzado con fibras
Use of nondestructive testing to verify elastic parameters in a soft chemically stabilized and fiber-reinforced soil

INFORMACIÓN
DEL ARTÍCULO

Historial del artículo:

Recibido
14-11-2023
Aceptado
16-04-2024
Publicado
25-04-2024

Palabras Clave:
Mejoramiento de suelos blandos

Ensayos no destructivos

Article history:

Received
14-11-2023
Accepted
16-04-2024
Available
25-04-2024

Keywords:
Soft soil improvement

Non-destructive testing

Berta Vivar Vivar^{1,*}, Jorge Villarroel Ortega¹, Laura Lourenço de Sousa²

¹ Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Chile

² Máster en Ingeniería Civil, Coimbra, Portugal

Resumen

Las propiedades elásticas dependen del tipo de material, y estas propiedades proporcionan información sobre la resistencia del material y su calidad. Las pruebas no destructivas, como la determinación de la velocidad del pulso ultrasónico, se utilizan como buenas aproximaciones de las propiedades elásticas de los materiales. En el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico se determinan las velocidades primarias (V_p) y de onda cortante (V_s), a partir de las cuales es posible determinar los parámetros elásticos del material siempre que se conozca la densidad y la hipótesis del material isotrópico sea válida. Este trabajo tiene como objetivo estudiar la relación entre los resultados obtenidos en ensayos de velocidad de pulso y los resultados de ensayos destructivos, como el de resistencia a la compresión no confinada (UCS), realizados sobre muestras de suelo blando químicamente estabilizado y reforzado con fibras. Se analizaron las pruebas bajo carga monotónica y cíclica (utilizando una frecuencia de 0,5 Hz, 5000 ciclos, una amplitud de ± 10 % de su nivel de tensión máxima a un nivel de tensión aplicada del 50 % de su resistencia a la compresión no confinada bajo carga monotónica). De los resultados se puede concluir que el uso de ensayos no destructivos es útil para determinar V_p y V_s , los valores son similares, asegurando la homogeneidad de las muestras lo que refleja una buena reproducibilidad del procedimiento de preparación de muestras de laboratorio experimental.

Abstract

Elastic properties depend on the type of material, and these properties provide information about the strength of the material and its quality. Non-destructive tests, such as ultrasonic pulse velocity determination, are used as good approximations of the elastic properties of materials. In the ultrasonic pulse velocity test, the primary (V_p) and shear wave (V_s) velocities are determined, from which it is possible to determine the elastic parameters of the material provided that the density is known and the isotropic material hypothesis is valid. This work aims to study the relationship between the results obtained in pulse velocity tests and the results of destructive tests, such as the unconfined compressive strength (UCS) test, performed on chemically stabilized soft soil samples reinforced with fibers. Tests were analyzed under monotonic and cyclic loading (using a frequency of 0.5 Hz, 5000 cycles, an amplitude of ± 10 % of its maximum stress level at an applied stress level of 50 % of its unconfined compressive strength under monotonic loading). From the results it can be concluded that the use of nondestructive testing is useful to determine V_p and V_s , the values are similar, ensuring the homogeneity of the samples which reflects a good reproducibility of the experimental laboratory sample preparation procedure.

* Corresponding author at: Berta Vivar Vivar, Universidad de Magallanes, Av. Pdte. Manuel Bulnes 01855, Punta Arenas, Chile. E-mail address: berta.vivar@umag.cl

RIOCI

journal homepage: <https://revistas.ufro.cl/ojs/index.php/rioc/index>

Vol. 25, no. 03, pp. 1-6, Abril 2024

1. Introducción.

Los parámetros elásticos y la densidad pueden revelar detalles sobre su calidad y resistencia. Para obtener estimaciones precisas de las características elásticas de un material, se realizan ensayos no destructivos como Pundit (velocidad de impulsos ultrasónicos). Pundit puede utilizarse para evaluar la homogeneidad de un material, la presencia de huecos, grietas u otras imperfecciones o defectos internos, los cambios en el material que pueden producirse con el tiempo (por ejemplo, debido a la hidratación del cemento) o los daños provocados por incendios, heladas o ataques químicos (ASTM D 2485-05). El procedimiento de ensayo Pundit está regulado por varias normas como ASTM D 2485-05, BS 1881-203, ISO1920-7:2004. En el presente estudio se adoptó el procedimiento descrito en la norma ASTM D 2485-05. El pulso del transductor emisor es transferido a la muestra por el medio de contacto y reconocido por el transductor receptor en el lado opuesto. Como el tiempo entre la generación y la recepción de la onda es registrado por el dispositivo eléctrico, se puede determinar la velocidad de la onda si se conoce la distancia entre los transductores (emisor y receptor), Ecuación 1.

$$\text{Propagation pulse velocity} = \frac{\text{Path length}}{\text{Transit time}} \quad (1)$$

En el Pundit, la señal es generada y registrada por el ordenador, que es capaz de amplificarla, filtrarla y visualizarla. El ordenador también registra el tiempo de ejecución y la amplitud de la tensión.

Suponiendo que la muestra se comporta como un material elástico isotrópico (Correia, 2011), la velocidad de propagación de una onda de compresión o primaria (P) puede expresarse como Ecuación 2.

$$V_p = \sqrt{\frac{M}{\rho}} = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}} \quad (2)$$

Donde,

V_p : Propagación de ondas primarias o de compresión (m/s)

M : Modulus (MPa)

E : Young's Modulus (MPa)

ρ : Densidad (kg/m³)

ν : Coeficiente de Poisson (-)

A diferencia de la onda de compresión o primaria (P), la onda de corte (S) sólo causa deformación por corte sin tener deformaciones de volumen, y la dirección del movimiento de las partículas del medio es perpendicular a la dirección de propagación. La velocidad de propagación de la onda S (V_s) en la Ecuación 3 viene determinada por el módulo elástico, la velocidad de onda de corte y primaria además de la densidad (Hong et al., 2020).

$$E = [\rho \cdot V_s^2 \cdot (3 \cdot V_p^2 - 4 \cdot V_s^2)] / (V_p^2 - V_s^2) \quad (3)$$

$$\nu = \left[\frac{0.5 \cdot \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1} \right] \quad (4)$$

Este trabajo estudia el comportamiento de un suelo blando con características físicas y químicas mostradas en la Tabla 1, y bajo condiciones de referencias diferentes: estabilizado químicamente sin fibras y también estabilizado químicamente reforzadas con fibras sintéticas. El trabajo de laboratorio se centra en la evaluación de los parámetros elásticos haciendo uso de los siguientes ensayos

a) Ensayo Pundit (no destructivo).

b) Pruebas de resistencia a la compresión no confinada bajo carga monotónica y cíclica (utilizando una frecuencia de 0,5 Hz, 5.000 ciclos, una amplitud de $\pm 10\%$ de su nivel máximo de tensión a un nivel de tensión aplicada del 50% de su resistencia máxima a la compresión no confinada bajo carga monotónica).

c) Prueba de Pundit luego de haber recibido una carga cíclica (no destructiva).

2. Metodología

La Tabla 1 resume las principales propiedades físicas y químicas. Se observa que el suelo presenta una distribución granulométrica mayoritariamente limosa (71%), un bajo peso unitario (14,6 kN/m³), una elevada relación de vacíos (> 2,0), un alto contenido en agua natural (80,6%) y un mayor contenido en materia orgánica (MO) (9,3%). Estos resultados tienen una gran influencia en su comportamiento mecánico, caracterizado por una baja resistencia al corte no drenado ($c_u \approx 25$ kPa) y una alta compresibilidad (Coelho, 2000; Correia, 2011). Este suelo orgánico limo-arcilloso con alta plasticidad fue clasificado por la USCS como OH (ASTM D2487). La composición química del suelo expuso un alto contenido de sílice (SiO₂=62%) y un contenido de alúmina (Al₂O₃) del 16%, lo que confirió propiedades puzolánicas al suelo.

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas del suelo utilizado

Physical Properties		Chemical Composition	
w_{nat} (%)	80.6	pH (BS1377-33)	3.5
G_s	2.55	SiO ₂ (%)	62
e_{nat}	2.03	Al ₂ O ₃ (%)	16
γ (kN/m ³)	14.6	Fe ₂ O ₃ (%)	4.8
OM (%)	9.3	CaO (%)	0.74
Grain size distribution		MgO (%)	1.1
Clay (%)	10	Na ₂ O (%)	0.9
Silt (%)	71	K ₂ O (%)	3
Sand (%)	19	TiO ₂ (%)	0.69
w_L (%)	71	MnO (%)	< 0.3
w_p (%)	43	P ₂ O ₅ (%)	< 0.5
PI (%)	28	TOC (%)	2.79
LI (%)	1.35	CTC (cmol+/kg)	11
USCS (ASTM D2487)	OH		

El suelo blando fue estabilizado con un cemento Portland, cuyas principales características químicas se presentan en la Tabla 2. El cemento Portland reacciona inmediatamente con el agua produciendo una gran cantidad de productos de reacción a corto plazo; con el tiempo, las reacciones fisicoquímicas se desarrollan a un ritmo más lento, ayudando a la producción de más ligaciones cementicias responsables de la mejora de las propiedades mecánicas del suelo estabilizado.

Tabla 2. caracterización química del cemento usado (datos Fabricante CIMPOR)

SiO ₂ (%)	19.3
Al ₂ O ₃ (%)	5.09
Fe ₂ O ₃ (%)	3.15
CaO Total (%)	63.87
MgO (%)	1.91
SO ₃ (%)	3.15
K ₂ O (%)	1.13
Na ₂ O (%)	0.1
CaO Free (%)	2.19
Loss on ignition (%)	1.26

Las fibras de polipropileno utilizadas en este estudio tienen una longitud de 12 mm, un diámetro de 32 μ m y presentan: una gran flexibilidad, una superficie específica elevada (134 m²/kg), una densidad de 905 kg/m³, una resistencia a la tracción de 250 N/mm² y un módulo de Young de 3500 - 3900 N/mm² (según la ficha técnica del producto suministrada por el fabricante BEKAERT).

2.1 Caracterización, preparación y ensayo de las muestras

Las muestras utilizadas en todos los ensayos se prepararon con una cantidad de ligante (peso seco de ligante por metro cúbico de suelo) de 250 kg/m³, una cantidad de fibra (peso seco de fibra por metro cúbico de suelo) de 10 kg/m³. El suelo se mezcló mecánicamente (142 rpm, 4 min) con las fibras y una pasta de aglutinante que eleva el contenido de agua al 115%. La pasta homogénea se compactó en un molde cilíndrico de PVC (37 mm de diámetro y 76 mm de altura) en tres capas. Cada capa se golpeó 20 veces contra una mesa rígida, después se ajustó la parte superior y se golpeó 10 veces más; la superficie de la capa se escarificó ligeramente con cuidado antes de introducir una nueva capa. Las probetas se curaron durante 28 días en una sala de temperatura (20±2°C) y humedad (95±5%) controladas; una vez transcurrido el tiempo de curado, las probetas se colocaron en el equipo de pruebas y se configuraron y ajustaron los dispositivos electrónicos (transductores transmisor y receptor para la prueba Pundit; célula de carga y transductor de desplazamiento para la prueba UCS); por último, se realizaron las pruebas y se registraron automáticamente los datos. Los ensayos de carga cíclica se realizaron para un nivel de tensión desviatoria del 50% de la resistencia a la compresión no confinada (q_u -max), una excitación sinusoidal de 0,5 Hz y una amplitud de ±10% de q_u -max hasta 5.000 ciclos de carga. Para garantizar la confiabilidad del procedimiento utilizado, los ensayos se repitieron dos veces.

Estas muestras cilíndricas también se sometieron al ensayo Pundit (Figura 1). En el presente estudio se utilizó un equipo de velocidad de pulso ultrasónico tipo PUNDIT LAB de Proceq. El V_p y V_s se registraron a través de la dirección vertical, es decir, a lo largo de la geratriz del cilindro. Para el V_p se utilizó un transductor de 54 kHz mientras que para el V_s se utilizó un transductor de onda de cizalla de 250 kHz (Figura 2). Los transductores se colocaron en el centro de los extremos de la superficie de la muestra, uno frente al otro. Se recogieron al menos 10 registros para la velocidad de propagación V_p o V_s .

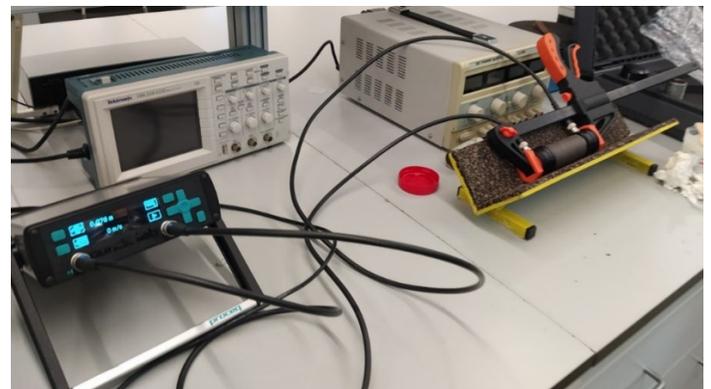


Figura 1. Vista general del equipamiento utilizado.

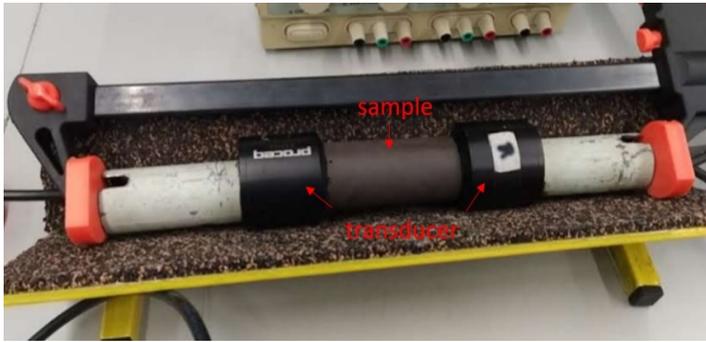


Figura 2. Vista en detalle del procedimiento utilizado.

3. Análisis de resultados

3.1 Suelo estabilizado químicamente sin refuerzo de fibras (SS)

Esta sección muestra los resultados de las pruebas realizadas en el Pundit, tras haber determinado la densidad. A partir de los valores medidos V_p y V_s es posible obtener los parámetros elásticos. La Tabla 3 muestra los valores de propagación de las ondas primarias y de corte, presentando una variabilidad muy baja de la que se observa la homogeneidad de las muestras. La Tabla 4 muestra los los parámetros elásticos resultantes según las ecuaciones 2,3 y 4. Al interior de los resultados en las tablas, se observa una variación de resultados debido a los valores obtenidos en toma de datos.

Tabla 3. Resultados de los ensayos a través del Pulse Velocity Test para muestras no reforzadas

Mix No.	ρ (kg/m ³)	V_p (m/s)	V_s (m/s)
SS_1	1528.49 ($\pm 0.3\%$)	1705.67 ($\pm 0.4\%$)	470.33 ($\pm 2.7\%$)
SS_2	1522.84 ($\pm 0.5\%$)	1705.67 ($\pm 1.5\%$)	474.67 ($\pm 0.9\%$)
SS_3	1535.71 ($\pm 0.2\%$)	1705.67 ($\pm 0.4\%$)	483.67 ($\pm 0.3\%$)
SS_4	1527.07 ($\pm 0.6\%$)	1712.00 ($\pm 0\%$)	479.67 ($\pm 3.8\%$)
SS_5	1529.97 ($\pm 0.2\%$)	1683.50 ($\pm 0.6\%$)	474.00 ($\pm 2.1\%$)
SS_6	1524.92 ($\pm 0.6\%$)	1693.00 ($\pm 1.1\%$)	484.67 ($\pm 1.9\%$)

Tabla 4. Parámetros elásticos ensayos a través de las ecuaciones para muestras no reforzadas

Mix No.	E (MPa)	G (Mpa)	v (m/s)
SS_1	986.91 ($\pm 5.3\%$)	338.28 ($\pm 5.4\%$)	0.46 ($\pm 0.6\%$)
SS_2	1000.56 ($\pm 2.0\%$)	343.12 ($\pm 1.9\%$)	0.46 ($\pm 0.1\%$)
SS_3	1046.38 ($\pm 0.8\%$)	359.26 ($\pm 0.7\%$)	0.46 ($\pm 0.0\%$)
SS_4	1025.00 ($\pm 8.1\%$)	351.70 ($\pm 8.3\%$)	0.46 ($\pm 0.6\%$)
SS_5	1001.88 ($\pm 3.8\%$)	343.86 ($\pm 3.9\%$)	0.46 ($\pm 0.6\%$)
SS_6	1042.90 ($\pm 3.6\%$)	358.31 ($\pm 3.7\%$)	0.46 ($\pm 0.42\%$)

Algunas muestras estabilizadas (SS_11 y SS_12) también fueron sometidas a cargas cíclicas como se describió anteriormente. Se espera que al ser sometidas a una carga cíclica las muestras estabilizadas experimenten cierto deterioro en sus uniones cementantes, aumentando el recorrido de propagación de la onda, es decir, disminuyendo la velocidad de onda. La Tabla 5 muestra los resultados de los ensayos de velocidad de pulso realizados inmediatamente después del final de la etapa de carga cíclica, y como era de esperar la V_p disminuye casi un 30% en comparación con las muestras no sometidas a carga cíclica (Tabla 3). En términos de V_s la reducción observada es muy pequeña debido a la naturaleza de la onda de cizallamiento que causa sólo deformación por cizallamiento sin deformación de volumen, y la dirección del movimiento de las partículas del medio es perpendicular a la dirección de propagación. Se puede concluir que el deterioro de los enlaces cementosos promovido por la carga cíclica tiene un gran impacto en el V_p pero un efecto casi despreciable en términos de V_s .

Tabla 5. Resultados de los ensayos a través del Pulse Velocity Test para muestras no reforzadas postcíclicas

Mix No.	ρ (kg/m ³)	V_p (m/s)	V_s (m/s)
SS_11	1533.40 ($\pm 0\%$)	976.00 ($\pm 0\%$)	438.00 ($\pm 0\%$)
SS_12	1517.80 ($\pm 0\%$)	1064.00 ($\pm 0\%$)	475.00 ($\pm 0\%$)

La Tabla 6 muestra los resultados de los parámetros elásticos post-cíclicos. Se observa que la carga cíclica favorece el deterioro de la matriz estabilizada, ya que los parámetros elásticos (E, G y v) son significativamente inferiores a los de las muestras no sometidas a carga cíclica (Tabla 4).

Tabla 6. Parámetros elásticos ensayos a través de las ecuaciones para muestras no reforzadas postcíclicas

Mix No.	E (MPa)	G (MPa)	v (m/s)
SS_11	808.31 ($\pm 0\%$)	294.16 ($\pm 0\%$)	0.37 ($\pm 0\%$)
SS_12	942.15 ($\pm 0\%$)	342.46 ($\pm 0\%$)	0.38 ($\pm 0\%$)

3.2 Suelo estabilizado reforzado con fibras (SSRF)

La Tabla 7 muestra los valores de las velocidades de propagación de ondas para las muestras estabilizadas reforzadas con fibras sintéticas. Analizando los valores de propagación de las ondas primarias y de corte, se observa una baja variabilidad entre ellas, asegurando la homogeneidad de las muestras, es decir, una buena reproducibilidad del procedimiento experimental de preparación de las muestras de laboratorio. La Tabla 8 muestra los resultados de los parámetros elásticos que se calculan con las ecuaciones 2,3 y 4.

Se ha comprobado que la presencia de fibras provoca una reducción de la densidad. Sin embargo, las fibras tienen una densidad significativamente menor en comparación con el suelo y el cemento, y no altera los valores de V_p y V_s . Esta reducción de la densidad se traduce en una reducción de los parámetros elásticos (como se observa en las tablas 7 y 8).

Tabla 7. Resultados de los ensayos a través del Pulse Velocity Test para muestras reforzadas con fibras

Mix No.	ρ (kg/m ³)	V_p (m/s)	V_s (m/s)
SSRF 1	1516.91 (± 0.2%)	1693.00 (± 0%)	463.50 (± 1.0%)
SSRF 2	1505.94 (± 0.1%)	1683.51 (± 0.6%)	453.50 (± 0.3%)
SSRF 3	1506.92 (± 0.2%)	1668.00 (± 0.4%)	456.33 (± 0.2%)
SSRF 4	1507.98 (± 0.3%)	1668.00 (± 0.4%)	453.33 (± 2.1%)
SSRF_5	1504.72 (± 0.5%)	1680.33 (± 0.8%)	472.00 (± 0.1%)
SSRF_6	1508.7 (± 0.5%)	1680.33 (± 0.8%)	465.00 (± 1.5%)
SSRF_7	1533.30 (± 0.2%)	1705.67 (± 0.4%)	466.00 (± 0.6%)
SSRF_8	1528.77 (± 0.3%)	1680.67 (± 0.7%)	469.00 (± 0.6%)

Tabla 8. Parámetros elásticos ensayos a través de las ecuaciones para muestras reforzadas con fibras

Mix No.	E (MPa)	G (MPa)	ν (m/s)
SSRF 1	951.35 (± 2.1%)	325.92 (± 2.1%)	0.46 (± 0.2%)
SSRF 2	904.91 (± 0.5%)	309.72 (± 0.5%)	0.46 (± 0.2%)
SSRF 3	916.02 (± 0.4%)	313.8 (± 0.4%)	0.46 (± 0.1%)
SSRF 4	905.25 (± 4.5%)	310.00 (± 4.6%)	0.46 (± 0.4%)
SSRF_5	978.30 (± 0.4%)	335.70 (± 0.4%)	0.46 (± 0.2%)
SSRF_6	951.77 (± 3.4%)	326.28 (± 3.5%)	0.46 (± 0.1%)
SSRF_7	972.05 (± 1.0%)	332.97 (± 1.0%)	0.46 (± 0.1%)
SSRF_8	981.80 (± 1.0%)	336.77 (± 1.1%)	0.46 (± 0.3%)

Algunas muestras estabilizadas (SSRF_10 a SSRF_13) también se sometieron a carga cíclica como se ha descrito anteriormente. Los resultados muestran que las velocidades V_p y V_s se reducen (Tabla 9) cuando se comparan con las muestras no sometidas a una carga cíclica previa (Tabla 7), con mayor impacto en los valores de V_p debido a las razones explicadas en la sección 3.1. También se observa que los parámetros elásticos están directamente relacionados con sus velocidades de propagación de onda, es decir, si la velocidad de propagación de onda se

reduce, los parámetros elásticos también disminuyen como se presenta en la Tabla 10.

En general, se observa que la presencia de fibras sintéticas en la matriz estabilizada promovió una reducción de los parámetros elásticos del material.

Tabla 9. Resultados de los ensayos a través del Pulse Velocity Test para muestras reforzadas postcíclicas

Mix	ρ	V_p	V_s
SSRF_5	1501.00 (± 0%)	1074.00 (± 0%)	457.00 (± 0%)
SSRF_6	1502.61 (± 0%)	1080.00 (± 0%)	455.00 (± 0%)
SSRF_7	1501.34 (± 0%)	1044.00 (± 2.1%)	455.50 (± 0.1%)
SSRF_8	1502.14 (± 0%)	1049.00 (± 2.6%)	456.00 (± 0.2%)

Tabla 10. Parámetros elásticos ensayos a través de las ecuaciones para muestras reforzadas postcíclicas

Mix No.	E (MPa)	G (MPa)	ν (m/s)
SSRF_5	871.14 (± 0%)	313.48 (± 0%)	0.39 (± 0%)
SSRF_6	866.10 (± 0%)	311.08 (± 0%)	0.39 (± 0%)
SSRF_7	861.07 (± 0.2%)	311.50 (± 0.2%)	0.38 (± 0.7%)
SSRF_8	864.09 (± 0.9%)	312.35 (± 0.4%)	0.38 (± 1.8%)

4. Conclusiones

Algunas muestras son ensayadas de manera destructiva, esto debido a que algunas fueron ensayadas en ensayos triaxiales condiciones drenadas o no drenadas.

Como era de esperar, en todos los resultados los valores de velocidad de la onda primaria (V_p) son superiores a los de la onda de corte (V_s) debido a que la onda primaria es una onda de compresión propagada directamente a través del esqueleto sólido de la muestra, correspondiente a la primera llegada transmitida.

Los suelos estabilizados tienen un esqueleto sólido directamente relacionado con los enlaces cementosos, creando un material continuo que facilita la propagación de las ondas. Cuando esas muestras fueron sometidas a cargas cíclicas, el efecto que ocurre es un cierto deterioro de la matriz cementicia, generando así un mayor recorrido a la onda a través del material, disminuyendo su velocidad de propagación y por lo tanto los parámetros elásticos. Se observó que un suelo estabilizado reforzado con fibras sintéticas presenta densidades menores, reflejando la menor densidad de las fibras. No obstante, el hecho de que las muestras estabilizadas reforzadas con fibras exhiban valores de V_p y V_s similares a las muestras no reforzadas, se observó que los

parámetros elásticos son menores para las muestras estabilizadas reforzadas con fibras, lo que se explica por sus menores densidades.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Magallanes, a profesores de la Universidad de Coimbra en Geotecnia, CONICYT PAI/INDUSTRIA 79090016.

6. Referencias

- ASTM-2485-00 (2000) Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock.
- BS-1881-203 (1986) Testing concrete - Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete.
- Coelho, P. (2000) Caracterização geotécnica de solos moles: estudo do local experimental da Quinta do Foja (Baixo Mondego). MSc. University of Coimbra.
- Correia, A. A. S. (2011) Aplicabilidade da Técnica de Deep Mixing aos Solos Moles do Baixo Mondego. Doctoral Dissertation. Universidade de Coimbra, Coimbra. (in Portuguese).
- Hong, S., Yoon, S., Kim, J., Lee, C., Kim, S. & Lee, Y. (2020) Evaluation of condition of concrete structures using ultrasonic pulse velocity method. *Applied Sciences*, 10 (2), pp. 706.
- ISO1920-7 (2004) Non-destructive test methods for use on hardened concrete.
- Miturski, M., Sas, W., Radzevičius, A., Šadzevičius, R., Skominas, R., Stelmaszczyk, M., & Głuchowski, A. (2021). Effect of dispersed reinforcement on ultrasonic pulse velocity in stabilized soil. *Materials*, 14(22), 6951.
- Villarroel-Ortega, J.A. (2022) Characterisation of stress-strain behaviour of a chemically stabilised soft soil reinforced with fibres under monotonic and cyclic loadings (Doctoral dissertation, Universidade de Coimbra).