



Influencia de parámetros claves de cargas cíclicas sobre el comportamiento de un suelo estabilizado químicamente no reforzado y reforzado con fibras

Influence of key parameters of cyclic loading on the behaviour of chemically stabilized soil unreinforced and reinforced with fibres

Fecha de entrega: 25 de enero 2022
Fecha de aceptación: 12 de mayo 2022

Jorge A. Villarroel-Ortega^{1,2}, Antonio A.S. Correia², Paulo J. Venda Oliveira²
y Luís J.L. Lemos²

¹Facultad de Ingeniería, Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Chile, jorge.villarroel@umag.cl

²Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Coimbra, Portugal, aalberto@dec.uc.pt, pjvo@dec.uc.pt, llemos@dec.uc.pt

En este trabajo se analiza el efecto de parámetros claves de la solicitud cíclica en el comportamiento mecánico de un suelo blando químicamente estabilizado, no reforzado y reforzado con fibras sintéticas de polipropileno. Este estudio experimental se realizó en un suelo blando portugués recogido en la zona del Baixo Mondego en el centro del país. El trabajo de laboratorio se llevó a cabo desarrollando las siguientes pruebas: i) monótonico de compresión no confinada (UCS), ii) prueba cíclica de compresión no confinada realizada con diferentes números de ciclos (2500, 5000, 10000) y diferentes frecuencias (0.25, 0.5, 1.0, 2.0 Hz) para una carga correspondiente al 50% de la resistencia evaluada en las pruebas monótonicas (UCS) y iii) pruebas de UCS monótonicas realizadas luego de la etapa cíclica (UCS_{pc}). El análisis se complementa con el estudio de la deformación axial permanente acumulada desarrollada durante la etapa cíclica. Los resultados muestran que la deformación axial permanente acumulada aumenta con el número de ciclos, también se observa que aumenta la resistencia y la rigidez después de la etapa de carga cíclica.

Palabras clave: estabilización química, suelos blandos, ensayo de resistencia a la compresión no confinada, carga cíclica

In this work the effect of the number of cyclic loads on the mechanical behaviour of a chemically stabilised soft soil, reinforced with synthetic polypropylene fibres, and not reinforced, are analysed. This experimental study was carried out on a Portuguese soft soil collected in the Baixo Mondego area in the centre of the country. The laboratory work is based on the following tests: i) monotonic unconfined compression test (UCS), ii) cyclic unconfined compression test performed with different numbers of cycles (2500, 5000, 10000) and several frequencies (0.25, 0.5, 1.0, 2.0 Hz) for a load corresponding to 50% of the strength evaluated in the monotonic tests (UCS) and iii) monotonic UCS tests performed after the cyclic loading stage (UCS_{pc}). The analysis is complemented with the study of the accumulated permanent axial deformation developed during the cyclic stage. The results show that the accumulated permanent axial strain increases with the number of cycles, also the strength and stiffness after the cyclic loading stage increase their values.

Keywords: chemical stabilization, soft soils, unconfined compression strength test, cyclic loading

Introducción

El comportamiento de los suelos blandos estabilizados químicamente y reforzados con fibras en condiciones monótonicas ha sido estudiado por varios autores (e.g. Correia *et al.*, 2015; Consoli *et al.*, 2011; Venda Oliveira *et al.*, 2015). La inclusión de fibras convierte el comportamiento mecánico del suelo estabilizado de

frágil a dúctil (Tang *et al.*, 2010; Venda Oliveira *et al.*, 2018), a pesar de que comúnmente se observa un aumento de la resistencia residual debido a la movilización de la resistencia a la tracción de las fibras para mayores niveles de deformación (Tang *et al.*, 2010; Sukontasukkul y Jamsawang, 2012). Sin embargo, este comportamiento puede cambiar en presencia de cargas repetitivas o cíclicas realizadas por diferentes tipos de acciones, maquinaria



industrial, vibraciones en estructuras *offshore*, cargas de tráfico realizadas por trenes o carretas y terremotos. Cuando se incrementa el número de ciclos de carga, se produce una degradación progresiva de los enlaces de cementación, en ensayos realizados sobre suelos estabilizados (sin fibras), generando un aumento de las deformaciones permanentes acumuladas (Chauhan *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2008) y una disminución de la rigidez (Subramaniam y Banerjee, 2014). Otros parámetros que también afectan la resistencia a la compresión no confinada del material compuesto es el contenido de ligante, la longitud/tipo de fibras y el tipo de ensayo (Correia *et al.*, 2015; Venda Oliveira *et al.*, 2015). Algunos trabajos sobre el uso de suelos estabilizados reforzados con fibras sometidos a cargas cíclicas han mostrado: i) un aumento de las deformaciones permanentes con el incremento del número de ciclos de carga (Chauhan *et al.*, 2008; Dall’Aqua *et al.*, 2010; Venda Oliveira *et al.*, 2018); ii) la adición de fibras aumenta expresamente el número de ciclos y la magnitud de la deformación necesaria para provocar el fallo (Maher y Ho, 1993); iii) un aumento de la resistencia a la compresión no confinada con el número de ciclos de carga (Venda Oliveira *et al.*, 2018). En este trabajo se estudia el comportamiento de un suelo blando recogido cerca de Coimbra, Portugal, en el Baixo Mondego, el cual es estabilizado con cemento y reforzado con fibras sintéticas. El trabajo de laboratorio se basa en el comportamiento a compresión evaluado mediante los siguientes ensayos: i) ensayos monotónicos de resistencia a la compresión no confinada (UCS), ii) ensayos UCS cíclicos (CYC) variando el número de ciclos (2500, 5000, 10000) y las frecuencias aplicadas para una carga correspondiente al 50% de la resistencia evaluada en las pruebas monotónicas (UCS), y iii) ensayos de resistencia a la compresión monotónica no confinada realizados después de la etapa de carga cíclica (UCS_{pc}). El estudio informa la deformación axial permanente acumulada ($\epsilon_{ax-perm}$) durante la etapa cíclica y la influencia que tiene el número de ciclos y la frecuencia en la resistencia a la compresión y la rigidez.

Materiales de ensayo

Este estudio se realizó con un suelo blando portugués procedente de la zona del Baixo Mondego, situada en el centro de Portugal en las orillas del río Mondego, y que ha sido caracterizado por muchos investigadores (Coelho,

2000; Correia, 2011). El depósito de suelo se formó hace más de 20000 años en un ambiente deposicional fluvio-marino y presenta un espesor superior a los 20 m. En este trabajo se utilizó una muestra que se recogió a una profundidad de 2.5 m. La Tabla 1 resume las principales propiedades físicas y químicas del suelo en estudio. Se puede observar que el suelo tiene una distribución granulométrica mayoritariamente limosa (71%), un bajo peso unitario $\gamma = 14.6 \text{ kN/m}^3$, un elevado índice de vacíos $e > 2.0$, un alto contenido de humedad natural $w_{nat} = 80.6\%$ y un elevado contenido de materia orgánica OM = 9.3%. Además, estos resultados tienen una gran influencia en el comportamiento mecánico, debido a que se traduce en una baja resistencia al corte no drenado ($c_u \approx 25 \text{ kPa}$) y en una alta compresibilidad (Coelho, 2000). Este suelo orgánico arcilloso-limoso con alta plasticidad fue clasificado por la USCS como OH (ASTM D2487, 2017). La composición química del suelo expuso un alto contenido de sílice ($\text{SiO}_2 = 62\%$) y de alúmina ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 16\%$), lo que confirió propiedades puzolánicas al suelo.

Tabla 1: Características físicas y composición química del suelo empleado.

Propiedades físicas		Composición química	
w_{nat} , %	80.87	pH (BS1377-3)	3.5
G_s	2.55	SiO_2 , %	62.00
e_{nat}	2.03	Al_2O_3 , %	16.00
γ , kN/m^3	14.6	Fe_2O_3 , %	4.80
OM, %	9.3	CaO, %	0.74
granulometría		MgO, %	1.10
Arcilla, %	10	Na_2O , %	0.90
Limo, %	71	K_2O , %	3.00
Arena, %	19	TiO_2 , %	0.69
w_L , %	71		
w_p , %	43		
Índice de plasticidad %	28		
Índice de liquidez %	1.35		
USCS	OH		

El suelo blando fue estabilizado con un ligante de cemento Portland portugués (cemento Portland Tipo I 42.5 R, producido por CIMPOR), 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 menor, ayudando a la producción de más productos



cementicios responsables de la mejora de las propiedades mecánicas del suelo estabilizado.

Las fibras de polipropileno utilizadas en este estudio tienen 12 mm de longitud, 32 mm de diámetro y presentan una gran flexibilidad, una elevada superficie específica (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).

Tabla 2: Caracterización química del cemento Portland (datos del fabricante)

CaO, %	62.88
SiO ₂ , %	19.00
Al ₂ O ₃ , %	5.15
Fe ₂ O ₃ , %	3.19
SO ₂ , %	3.14
MgO, %	2.16
K ₂ O, %	1.29
Na ₂ O, %	0.10

Procedimiento experimental

Las muestras utilizadas en todas las pruebas 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 de fibra por metro cúbico de suelo) de 10 kg/m³. El suelo se mezcló mecánicamente (142 rpm durante 4 min) con las fibras y una lechada de ligante 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, seguida de un ajuste de la parte superior; la superficie de la capa se escurificó ligeramente con cuidado antes de introducir una nueva capa. Las probetas se curaron durante 28 días en una sala con condiciones controladas de temperatura de 20 ± 2°C y humedad de 95 ± 5%. Una vez transcurrido el tiempo de curado, las probetas se colocaron en el equipo de pruebas y se configuraron y ajustaron los dispositivos electrónicos (celda de carga y transductor de desplazamiento). Finalmente, se realizaron las pruebas y se registraron los datos automáticamente. Los ensayos de compresión no confinada, UCS se realizaron con una velocidad de deformación constante del 1%/min (BS 1377-7, 1990). Los ensayos de carga cíclica (CYC) se realizaron para un nivel de tensión del 50% de la resistencia evaluada

en las pruebas monotónicas ($0.50q_{u-max}$), una excitación sinusoidal de 0.5 Hz y una amplitud de ±10% ($\pm 0.10q_{u-max}$) variando el número de ciclos de carga (2500, 5000, 10000) y en una segunda etapa de estudio, variando la frecuencia (0.25, 0.50, 1.00, 2.00 Hz) y manteniendo el número de ciclos de carga de 5000. Después de la etapa cíclica, se llevó a cabo una prueba UCS monotónica (UCS_{pc}). Para garantizar la fiabilidad del procedimiento utilizado, las pruebas se repitieron dos veces por lo menos.

Resultados

Al inicio del trabajo experimental, se realizaron ensayos de compresión no confinada UCS. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 1. Los materiales presentan una resistencia a la compresión no confinada q_{u-max} de 292 kPa asociada a una extensión axial ϵ_{ax-rot} de 4.5% para las muestras estabilizadas químicamente y reforzada con fibras (FQ = 10 kg/m³), en la otra situación los resultados mostraron que la resistencia no confinada q_{u-max} es de 276 kPa a una extensión axial ϵ_{ax-rot} de 2.3% para el caso sin fibras (FQ = 0 kg/m³). En general, se puede observar que la inclusión de las fibras induce un ligero aumento de la resistencia mecánica y una modificación del comportamiento de frágil a dúctil, presentando una resistencia residual.

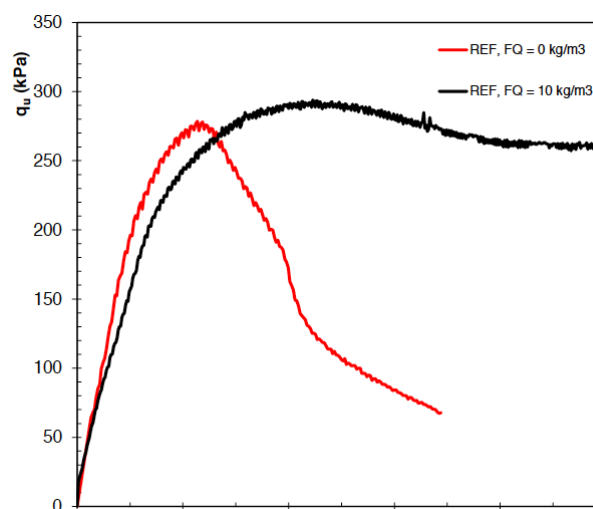


Figura 1: Curva de tensión-extension para los ensayos UCS de referencia

La etapa de carga cíclica se realizó a partir de un nivel de tensión del 50% de los valores de referencia obtenidos (Figura 1) en los ensayos monotónicos UCS de referencia. Manteniendo ese nivel de tensión desviatorica se estudió el



efecto que tiene el número de ciclos y la frecuencia aplicada. Para el caso del efecto del número de ciclos (2500, 5000, 10000), fue a una excitación sinusoidal de 0.5 Hz, con una amplitud del $\pm 10\%$ de q_{u-max} . Por otro lado, para el estudio del efecto de la frecuencia, ésta se ha variado de 0.25, 0.50, 1.0 y 2.00 Hz, habiéndose mantenido constante el número de ciclos en 5000. La comparación de la deformación axial permanente acumulada $\epsilon_{ax-perm}$ durante la etapa cíclica para ambos estudios, para los suelos estabilizados no reforzados y reforzados con fibras, se ilustra en las Figuras 2 y 3.

Resultados de ensayos cíclicos

Durante la etapa cíclica, se observa que la deformación axial permanente muestra un fuerte incremento al inicio de la etapa cíclica seguido de una disminución de la velocidad de deformación para ambos casos (no reforzado y reforzado con fibras). Esto mismo ocurre en el estudio del número de ciclos y de la frecuencia aplicada.

En términos del efecto de los ciclos, se observa una mayor deformación axial para los suelos reforzados con fibras (Figura 1). Sin embargo, en la Figura 2 se muestra el efecto de los ciclos en la etapa cíclica, se observa para el caso sin fibras, se aprecian mayores deformaciones que para el material compuesto reforzado con fibras, donde debido al nivel de deformaciones este tiende a movilizar las fibras a tracción y con esto disminuir la deformación permanente.

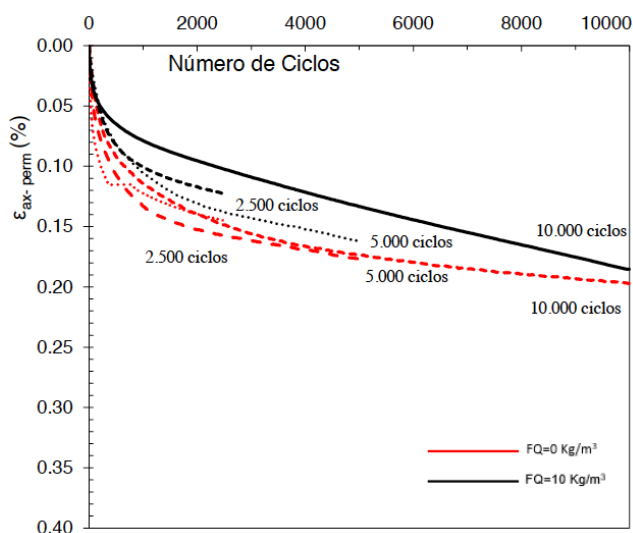


Figura 2: Evolución de la deformación axial permanente acumulada durante la etapa cíclica - efecto del número de ciclos

En contexto de analizar la variación de la frecuencia, se aprecia una clara reducción de la deformación axial

permanente acumulada con el aumento del nivel de frecuencia (Figura 3).

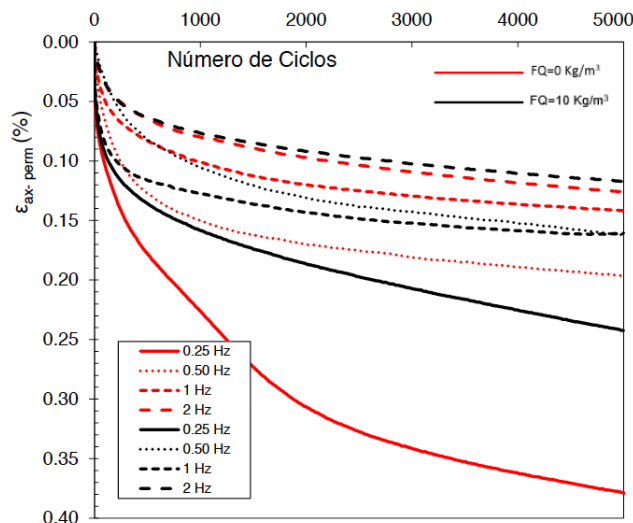


Figura 3: Evolución de la deformación axial permanente acumulada durante la etapa cíclica - efecto de la frecuencia

Las muestras que fueron sometidas a menores frecuencias evidencian mayores deformaciones axiales, debido a que también fueron ensayadas durante más tiempo. El aumento de sus deformaciones plásticas, lo que puede interpretarse como un deterioro de la matriz cementicia, sugiriendo que las frecuencias más altas están asociadas a una porción más significativa de deformaciones elásticas. La adición de fibras al material estabilizado da lugar a una transferencia progresiva de tensiones a las fibras que contribuyen a un menor deterioro de la matriz cementicia, es decir, una reducción de la deformación axial permanente acumulada.

Resultados pos-cíclicos

Las Figuras 4 y 5 muestran que los resultados de los ensayos UCS_{pc} realizados después de la etapa cíclica, ya sea para el efecto de los ciclos, como el efecto de la frecuencia. Se observan que las resistencias aumentan con relación a los ensayos de referencia (Figura 1).

La Figura 4 muestra a su vez que las resistencias pos-cíclicas muestran un notorio incremento con los ciclos, esto debido a que, a mayores deformaciones permanentes durante la etapa cíclica, generan una mayor resistencia no confinada, pues se entiende que las ligaciones cementicias tienden a quebrarse y generar partículas más gruesas en su granulometría y darle mayor resistencia por fricción de ellas. También se puede entender que las muestras a

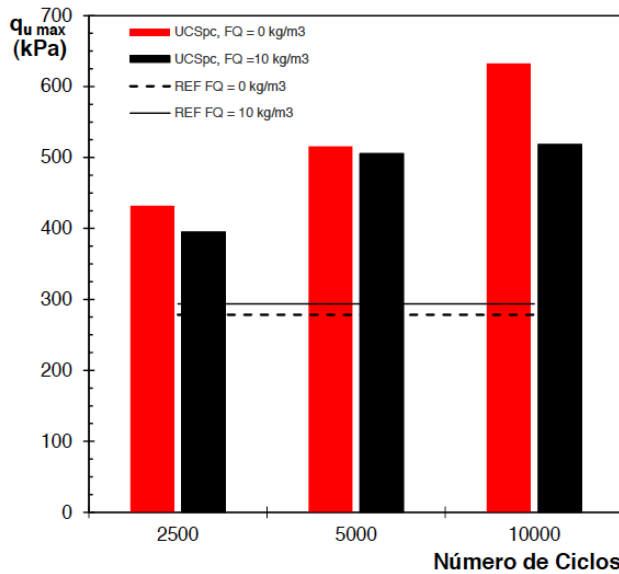


Figura 4: Resultados de resistencia no confinada máxima para el caso del efecto de ciclos

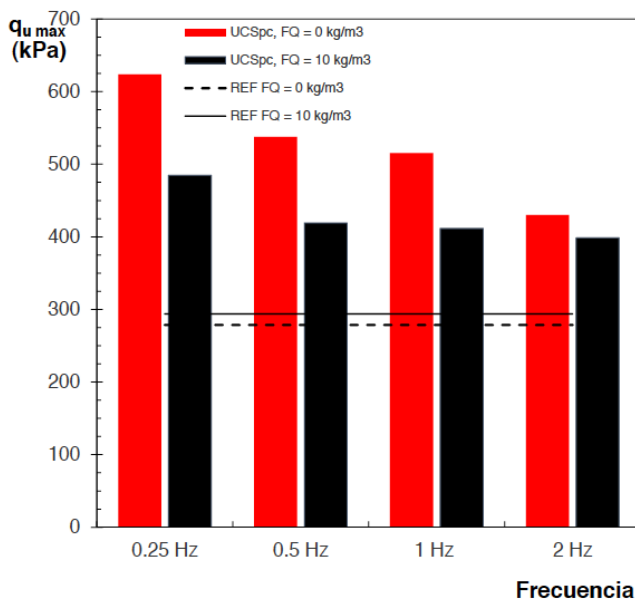


Figura 5: Resultados de resistencia no confinada máxima para el caso del efecto de la frecuencia

medida que estuvieron más tiempo en los ensayos (con mayores ciclos), presentan mayores resistencias, pues podrían presentar efecto de succión.

Con lo mencionado anteriormente, se entiende que el fenómeno de la succión podría acontecer también en el efecto de la frecuencia, brindándole al material compuesto mayor resistencia a medida que estuvieran más tiempo en el ensayo, es decir, menor frecuencia. Observando

la Figura 5, se muestra que a menor frecuencia mayor es su resistencia para ambos casos. De todas maneras, es posible entender que considerando mayores deformaciones axiales durante la etapa cíclica, podría obtenerse mayor cantidad de partículas gruesas en la granulometría del material compuesto, y con esto originar resistencia por fricción y coincidentemente obtener mayores resultados de resistencia no confinada, tal y cual se muestra en la Figura 5.

Conclusiones

Efecto del número de ciclos

Los resultados de los ensayos relativos a todas las etapas (antes de la carga cíclica, etapa cíclica y UCS luego de la etapa cíclica) arrojan las siguientes conclusiones.

- En el caso del comportamiento monotónico antes de la etapa cíclica, la inclusión de fibras (FQ = 10 kg/m³) indujo un ligero aumento de la resistencia a la compresión no confinada y una modificación del comportamiento de frágil a dúctil, presentando una resistencia residual.
- Durante la etapa cíclica se observó que la deformación axial permanente muestra un fuerte aumento al inicio de la etapa cíclica seguido de una disminución de la velocidad de deformación para ambos casos. La evolución de la deformación axial permanente es mayor para el caso sin fibras, lo que está relacionado a la influencia de la movilización de las fibras en términos de la ayuda que entrega en las deformaciones axiales plásticas.
- Después de la fase cíclica, la resistencia a la compresión no confinada aumenta en relación con los valores de referencia para ambos casos, no reforzados y reforzados con fibras.

Efecto de la frecuencia

De los ensayos monotónicos de UCS realizados antes de la carga cíclica (valores de referencia) y después de la etapa cíclica (UCS_{pc}) para el suelo estabilizado reforzado con fibras y no reforzado, se extraen las siguientes conclusiones.

- Durante la etapa cíclica, se observa que la deformación axial permanente muestra un fuerte aumento al inicio de la etapa cíclica, seguido de una disminución de la velocidad de deformación para ambos casos.



- A medida que aumenta la frecuencia aplicada en la etapa cíclica, la deformación axial permanente disminuye, lo que indica un menor deterioro de la matriz cementicia. Esto se explica por el hecho de que las frecuencias más altas están asociadas a una porción más significativa de la deformación elástica.
- Después de la etapa cíclica, el comportamiento mecánico del suelo estabilizado reforzado y no reforzado se vuelve más resistente que los valores de referencia (ensayos monotónicos UCS). Así, se observa un aumento de la resistencia máxima tras la aplicación de la etapa cíclica, que es más significativo para las frecuencias más bajas.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a CIMPOR y a BIU International por suministrar los aglutinantes y las fibras, y a las instituciones que apoyaron financieramente la investigación: CIEPQPF (UIDB/00102/2020), Fundación Portuguesa para la Ciencia y la Tecnología (proyecto PTDC/ECI-CON/28382/2017), ISISE (UIDB/04029/2020), CONICYT PAI/INDUSTRIA 79090016, Universidad de Magallanes y ACIV.

Referencias

ASTM D2487 (2017). Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system). West Conshohocken, PA, USA

BS 1377-3 (1990). Methods of test for soils for civil engineering purposes: Chemical and electro-chemical testing. British Standards Institution BSI, Milton Keynes, UK

BS 1377-7 (1990). Methods of test for soils for civil engineering purposes: Shear strength tests (total stress). British Standards Institution BSI, Milton Keynes, UK

Chauhan, M.S., Mittal, S. and Mohanty, B. (2008). Performance evaluation of silty sand subgrade reinforced with fly ash and fibre. *Geotextiles and Geomembranes* 26(5), 429-435

Coelho, P.A.L.F. (2000). *Caracterização geotécnica de solos moles - estudo do local experimental da Quinta do Foja*. Tesis de maestría, Universidad de Coimbra, Portugal

Consoli, N.C., Rosa, D.A., Cruz, R.C. and Rosa, A.D. (2011). Water content, porosity and cement content as parameters controlling strength of artificially cemented silty soil. *Engineering Geology* 122(3-4), 328-333

Correia, A.A.S. (2011). *Aplicabilidade da técnica de deep mixing aos solos moles do Baixo Mondego*. Dissertação de doutoramento, Universidade de Coimbra, Portugal

Correia, A.A.S., Venda Oliveira, P.J. and Custódio, D.G. (2015). Effect of polypropylene fibres on the compressive and tensile strength of a soft soil, artificially stabilised with binders. *Geotextiles and Geomembranes* 43(2), 97-106

Dall'Aqua, G.P., Ghataora, G.S. and Ling, U.K. (2010). Behaviour of fibre-reinforced and stabilized clayey soils subjected to cyclic loading. *Studia Geotechnica et Mechanica* 32(3), 3-16

Maher, M. and Ho, Y. (1993). Behavior of fiber-reinforced cemented sand under static and cyclic loads. *Geotechnical Testing Journal* 16(3), 330-338

Subramaniam, P. and Banerjee, S. (2014). Factors affecting shear modulus degradation of cement treated clay. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 65, 181-188

Sukontasukkul, P. and Jamsawang, P. (2012). Use of steel and polypropylene fibers to improve flexural performance of deep soil-cement column. *Construction and Building Materials* 29, 201-205

Tang, C.-S., Shi, B. and Zhao, L.-Z. (2010). Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. *Geotextiles and Geomembranes* 28(1), 54-62

Venda Oliveira, P.J., Correia, A.A.S., Teles, J.M.N.P.C. and Custodio, D.G. (2015). Effect of fibre type on the compressive and tensile strength of a soft soil chemically stabilised. *Geosynthetics International* 23(3), 171-182

Venda Oliveira, P.J., Correia, A.A.S. and Cajada, J.C.A. (2018). Effect of the type of soil on the cyclic behaviour of chemically stabilised soils unreinforced and reinforced with polypropylene fibres. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 115, 336-343

Yang, C., Cui, Y.J., Pereira, J.M. and Huang, M.S. (2008). A constitutive model for unsaturated cemented soils under cyclic loading. *Computers and Geotechnics* 35(6), 853-859