

# ANÁLISE INDIRETA DO EFEITO DA SUÇÃO EM ENSAIOS UCS CÍCLICOS DE UM SOLO ESTABILIZADO E REFORÇADO COM FIBRAS

Indirect analysis of the suction effect in cyclic UCS tests of a fibre reinforced stabilized soil

Ligia Abreu Martins<sup>a</sup>, António Alberto Soares Correia<sup>b</sup>, Paulo José da Venda Oliveira<sup>c</sup>, Luís Joaquim Leal Lemos<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Portugal

<sup>b</sup> Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, CERES, Portugal

<sup>c</sup> Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, ISISE, Portugal

<sup>d</sup> Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, CGeo, Portugal

**RESUMO** – Quando um material é sujeito a carregamento cíclico há alterações no comportamento geomecânico que devem ser conhecidas e caracterizadas para otimizar o binómio segurança-custo de uma dada obra. Para atingir tal objetivo, no presente trabalho apresenta-se uma série de ensaios de resistência à compressão não confinada e triaxiais, monotónicos e previamente submetidos a carregamento cíclico, com e sem membrana a envolver os provetes durante a fase cíclica, para avaliar indiretamente o efeito da sucção num solo mole quimicamente estabilizado e reforçado com fibras. Os resultados são analisados em termos de evolução da deformação axial permanente acumulada, da energia elástica e plástica e da resistência à compressão não confinada, tendo-se observado que a ocorrência de sucção promove um aumento das deformações plásticas acumuladas, da energia elástica e plástica e da resistência à compressão, sendo estes efeitos mitigados com a utilização de uma membrana a envolver os provetes.

**ABSTRACT** – When a material is subjected to cyclic loading there are changes in its geomechanical behaviour that must be known and characterized in order to optimize the safety-cost binomial of a specific project. To achieve such objective, this work presents a series of unconfined compressive strength and triaxial tests, monotonic or previously subjected to cyclic loading, with and without a membrane surrounding the specimens during the cyclic stage, to evaluate indirectly the effect of the occurrence of suction in a fibre reinforced stabilized soft soil. The results were analysed in terms of the evolution of accumulated permanent axial strain, elastic and plastic energy and unconfined compressive strength, and it was observed that the occurrence of suction promotes an increase in accumulated plastic strains, elastic and plastic energy and compressive strength, being these effects mitigated by using a membrane surrounding the specimens.

**Palavras-Chave** – Solo estabilizado, fibras sintéticas, carregamento cíclico, sucção.

**Keywords** – Stabilized soil, synthetic fibres, cyclic loading, suction.

---

E-mails: uc2020142548@student.uc.pt (L. Martins), aalberto@dec.uc.pt (A. Correia), pjvo@dec.uc.pt (P. Oliveira), llemos@dec.uc.pt (L. Lemos)

ORCID: orcid.org/ 0000-0002-5232-5419 (L. Martins), orcid.org/0000-0000-0002-3260-8729 (A. Correia), orcid.org/0000-0001-8515-8664 (P. Oliveira), orcid.org/0000- 0003-3489-7162 (L. Lemos)

## 1 – INTRODUÇÃO

A construção de aterros sobre solos compressíveis está normalmente associada a problemas de estabilidade e assentamentos de elevada magnitude. Uma das técnicas que tem sido aplicada com sucesso, em todo o mundo, para melhorar o comportamento mecânico de solos com débil comportamento mecânico consiste na adição de ligantes (tais como cimento Portland, cal viva, cinzas volantes, escórias) ao material natural, sendo este processo designado por estabilização química (Abdullah et al., 2020, Åhnberg et al., 2003, Consoli et al., 2007, Consoli et al., 2013, Consoli et al., 2011a, Correia et al., 2021, Correia et al., 2019, Horpibulsuk et al., 2005, Kamruzzaman et al., 2009, Lau et al., 2021, Lorenzo e Bergado, 2004, 2006, Venda Oliveira e Cabral, 2023, Venda Oliveira et al., 2013, Venda Oliveira et al., 2014). Apesar da melhoria no comportamento mecânico, nomeadamente em termos de aumento de resistência à compressão, o material compósito resultante apresenta em geral um comportamento tensão-deformação frágil e baixa resistência a tração. Estas debilidades podem ser mitigadas com a adição de fibras (sintéticas ou naturais) aleatoriamente distribuídas ao solo estabilizado, as quais promovem o aumento de ductilidade e da resistência à tração, além de contribuírem para a diminuição da perda da resistência pós-pico (Akbari et al., 2021, Consoli et al., 2009, Consoli et al., 2011b, Correia et al., 2015, Correia et al., 2017, Kaniraj e Havanagi, 2001, Kumar e Gupta, 2016, Martins et al., 2023, Olgun, 2013, Park, 2011, Plé e Lê, 2012, Tang et al., 2007, Venda Oliveira et al., 2016, Yilmaz, 2009, Zaimoglu e Yetimoglu, 2012).

A aplicação de uma solitação cíclica (por exemplo induzido por sismos, explosivos, ação do vento, ondas do mar, tráfego rodoviário/ferroviário), induz alterações no comportamento do material compósito que necessitam ser caracterizadas para incrementar a segurança e diminuir os custos associados a obras geotécnicas. Todavia, o conhecimento sobre o comportamento de solos sob ação de carregamentos cíclicos é ainda limitado, abrangendo em geral apenas solos granulares, e frequentemente com resultados contraditórios. Neste âmbito, Dall'Aqua et al. (2010), Venda Oliveira et al. (2018), Venda Oliveira et al. (2017) verificaram um aumento de deformações permanentes acumuladas induzidas pelo carregamento cíclico, fundamentalmente durante os primeiros ciclos de carregamento. Por sua vez, Chauhan et al. (2008) observaram um aumento mais acentuado de deformações permanentes após um maior número de carregamentos cíclicos. Adicionalmente, AhmedeNaggar (2018) e Narani et al. (2021) observaram que a resistência à compressão diminuiu com a adição de fibras à medida que o número de ciclos aumenta, enquanto Festugato et al. (2013), KhattakeAlrashidi (2006), Venda Oliveira et al. (2018) e Lemos et al. (2021) relataram um aumento na resistência à compressão e tração com a inclusão de fibras num solo estabilizado.

A análise do comportamento mecânico de solos não coesivos sob influência de carregamento cíclico pode ser realizada com base no conceito de energia (Lenart, 2008, Sas et al., 2017). Tal conceito considera que a deformação induzida por uma solitação cíclica relaciona-se com a dissipação de energia (energia plástica), a qual pode ser avaliada por meio da curva tensão-deformação de cada ciclo, correspondendo a energia dissipada à área dentro do ciclo histerético e a energia recuperada (energia elástica) à área sob a curva de descarga (Choobbasti e Kutanaei, 2017, Lenart, 2008, Narani et al., 2020, Narani et al., 2021, Sas et al., 2017, Xia et al., 2021). Em amostras de solos estabilizados e reforçados, Narani et al. (2021) observaram que a energia plástica é maior durante os primeiros ciclos, diminuindo acentuadamente com o aumento do número de ciclos de carregamento e que a adição de fibras promove a redução de energia plástica. Este comportamento está relacionado com o facto de parte da carga aplicada às amostras ser absorvida pelas fibras e assim ocorrer uma menor transferência de energia para o esqueleto sólido, resultando numa menor degradação da matriz cimentícia.

Outro aspeto não totalmente esclarecido em termos de comportamento mecânico de solos estabilizados, tanto não reforçados como reforçados com fibras sob solitação cíclica, diz respeito ao efeito da solitação cíclica na resistência à compressão não confinada do material compósito.

Enquanto alguns autores (Varkuti (2015), Venda Oliveira et al. (2018), Venda Oliveira et al. (2017)) reportam aumentos significativos de resistência à compressão não confinada (UCS) após a aplicação de carregamento cíclico, Chae et al. (2010) constataram que os resultados destes ensaios são influenciados por perturbações na amostragem, extração, transporte, armazenamento e durante a realização do ensaio. Em ensaios de longa duração, nomeadamente quando a fase cíclica compreende um elevado número de ciclos, pode ocorrer diminuição do teor em água da amostra e o consequente aumento das tensões de sucção, principalmente em solos com poros de reduzida dimensão (Fredlund et al., 2011).

O efeito da sucção no comportamento mecânico de solos bem como a aplicação do conceito de energia na interpretação de ensaios cíclicos têm sido objeto de estudo em diversos trabalhos, no entanto, a análise do comportamento mecânico de solos quimicamente estabilizados e reforçados com fibras, à luz dos conceitos mencionados, tem sido praticamente negligenciada pela comunidade científica. Assim, o presente trabalho visa contribuir para o estudo do efeito da secagem/sucção no carregamento cíclico, bem como analisar o efeito do reforço com fibras nas deformações plásticas acumuladas e no comportamento tensão-deformação do material compósito. Para a análise destes efeitos, foram realizados: i) ensaios UCS cíclicos com provetes revestidos com membrana de latex (CM) e provetes não revestidos (SM), pretendendo-se com a colocação de membrana evitar a secagem das amostras e a consequente diminuição da sucção; ii) ensaios UCS pós-cíclicos; iii) e ensaios triaxiais de compressão não drenados pós-cíclicos. No Quadro 1 apresenta-se o plano de ensaios considerado no presente trabalho.

**Quadro 1** – Plano de ensaios da investigação realizada.

Condição de Ensaio	Número de provetes ensaiados			
	Sem Membrana (SM)	Com Membrana (CM)	Sem Membrana (SM)	Com Membrana (CM)
Tipo de ensaio	Tipo de reforço			
	Não reforçado		Fibras de Polipropileno	
UCS monotónico	6	-	6	-
UCS cíclico	3	4	3	4
UCS pós-cíclico	3	2	3	2
Triaxial	-	2	-	1
Triaxial pós-cíclico	-	2	-	2

## 2 – MATERIAIS

### 2.1 – Características do solo

No presente trabalho utilizou-se um solo mole orgânico recolhido a uma profundidade de 2-3 metros abaixo do nível freático, na zona do “Baixo Mondego”, em Portugal. O solo foi classificado pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (ASTM-D2487, 1998) como um silte orgânico de elevada plasticidade (OH), exibindo um teor em matéria orgânica de 9,5%. A sua composição química revelou um elevado teor de sílica (SiO<sub>2</sub>) e de alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (59% e 17%, respetivamente), pelo que o solo apresenta propriedades pozolánicas significativas (Janz e Johansson, 2002). As propriedades físicas, mineralógicas e químicas do solo estão apresentadas no Quadro 2.

### 2.2 – Características do ligante e das fibras

O ligante hidráulico adotado no presente estudo foi o cimento Portland Tipo I 42.5 R (EN-197-1, 2000), o qual desenvolve resistência rapidamente, e cuja composição química está apresentada no Quadro 3. A dosagem de ligante utilizada foi de 175 kg/m<sup>3</sup> (peso seco de cimento por m<sup>3</sup> de solo).

**Quadro 2 – Principais características do solo.**

<b>Propriedades Físicas</b>									
<b>Composição mineralógica</b>			<b>G<sub>s</sub></b> <b>(g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>w<sub>nat.</sub></b> <b>(%)</b>	<b>Granulometria</b> <b>(%)</b>		<b>Plasticidade</b> <b>(%)</b>	<b>OM</b> <b>(%)</b>	
Quartzo, muscovita, albite, microclina, esmectite, ilite, caulinite e cloreto de magnésio			2,57	80,9	argila = 12 silte = 77 areia = 11		LP= 44,9 LL= 72,2 IP= 27,3	9,5	
<b>Propriedades Químicas</b>									
<b>pH</b>	<b>Perda por ignição</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b> <b>(%)</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> <b>(%)</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> <b>(%)</b>	<b>CaO</b> <b>(%)</b>	<b>MgO</b> <b>(%)</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b> <b>(%)</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b> <b>(%)</b>	<b>TOC</b> <b>(%)</b>
4,6	9	59	17	4,9	0,4	1,1	0,8	31	3,5

Nas amostras reforçadas, foram adicionadas ao compósito fibras de polipropileno aleatoriamente distribuídas com uma dosagem de 10 kg/m<sup>3</sup> (peso seco de fibras por m<sup>3</sup> de solo). As principais características das fibras estão apresentadas no Quadro 3.

**Quadro 3 – Principais características do ligante e das fibras de polipropileno (PP).**

<b>Cimento Portland tipo I 42.5 R*</b>		<b>Tipo de Fibra</b>	<b>Polipropileno*</b>
<b>CaO (%)</b>	62,9	<b>Comprimento (mm)</b>	12
<b>SiO<sub>2</sub> (%)</b>	19,0	<b>Diâmetro (µm)</b>	32
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	5,2	<b>Relação Comprimento diâmetro</b>	375
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	3,2	<b>Resistência à tração</b>	250
<b>SO<sub>2</sub> (%)</b>	3,1	<b>Módulo de elasticidade</b>	3,5-3,9
<b>MgO (%)</b>	2,2	<b>rugosidade<sup>&amp;</sup></b>	Baixa
<b>K<sub>2</sub>O (%)</b>	1,3	<b>Biodegradabilidade</b>	Não Biodegradável
<b>Superfície específica de Blane (m<sup>2</sup>/kg)</b>	326,3	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,91

\* dados do fabricante.

& Agboola et al. (2021).

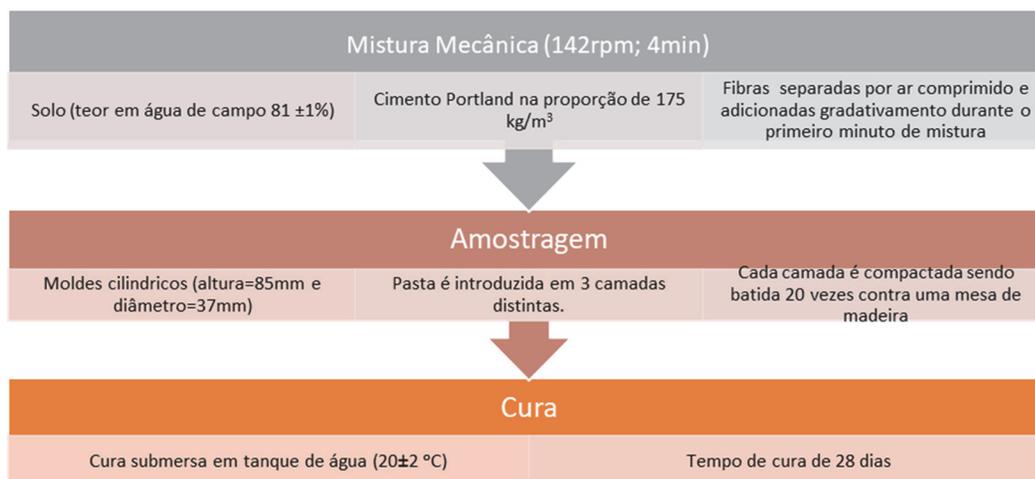
### 3 – PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

As amostras do solo estabilizado reforçado ou não com fibras foram preparadas com base no procedimento laboratorial descrito em EuroSoilStab (2002) com as modificações propostas por Correia (2011), apresentado na Figura 1.

A fase cíclica, em condições de compressão não confinada, de todas as amostras, foi realizada no aparelho GDS Dynamic Triaxial para um nível de tensão deviatória inicial de 50% de  $q_{umáx.}$  obtida no ensaio UCS monotónico, uma amplitude de  $\pm 10\%$  de  $q_{umáx.}$ , uma frequência de 0,5 Hz e foram aplicados 5.000 ciclos. Para a análise do efeito da secagem/sucção durante o carregamento cíclico, foram efetuados ensaios com amostras não revestidas (SM) e revestidas (CM) por uma membrana de látex. Imediatamente após o término da fase de cíclica, os provetes foram submetidos a ensaios monotónicos, nomeadamente UCS pós-cíclico e triaxiais pós-cíclico.

Na análise do efeito da membrana de látex na mitigação da secagem/sucção foram comparados os resultados dos ensaios UCS pós-cíclico (realizados com e sem membrana) e os ensaios triaxiais CIU pós-cíclico, onde nestes últimos existia a garantia de saturação dos provetes na fase de corte, ou seja, o fenómeno de sucção era negligenciável.

Os ensaios triaxiais CIU foram realizados com uma tensão de confinamento de 50 kPa e compreenderam a execução de três fases: saturação, consolidação e corte não drenado. A fase de



**Fig. 1** – Representação esquemática do procedimento laboratorial adotado nas amostras estabilizadas e/ou reforçadas com fibras.

saturação prolongou-se por cerca de 2 dias até se obter um parâmetro B de Skempton superior a 95%. Uma vez terminada a saturação iniciou-se a fase de consolidação, com aplicação de uma contrapressão de 450 kPa e uma tensão na câmara (confinamento) de 500 kPa, durante o tempo suficiente para a dissipação do excesso de pressões intersticiais, ou seja, aproximadamente 7 horas. A fase de corte não drenado foi realizada sob taxa de deformação axial constante (1%/h), até se obter uma deformação axial de cerca de 20%.

No caso dos ensaios triaxiais pós-cíclicos, as amostras foram previamente sujeitas a cargas cíclicas (nas condições acima descritas) antes de serem inseridas na célula triaxial.

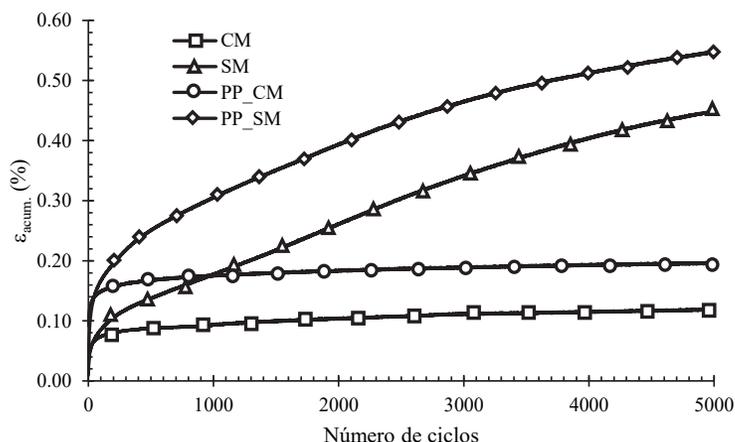
## 4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 – Fase cíclica: deformação axial permanente acumulada

A Figura 2 apresenta a evolução da deformação axial permanente acumulada com o número de ciclos de carga obtida em ensaios UCS cíclicos realizados com provetes de solo estabilizado reforçado e não reforçado com fibras, revestidos (CM) e não revestidos (SM) com membrana de látex.

Independentemente do solo ser ou não reforçado com fibras, os resultados permitem constatar a ocorrência de aumento de deformação axial permanente acumulada quando a amostra não é envolvida por uma membrana durante o ensaio. Este comportamento parece estar relacionado com o facto da fase cíclica demorar aproximadamente 3 horas, o que induz a diminuição do teor em água (secagem) da amostra, levando ao desenvolvimento de tensões de sucção.

Na Figura 2 também se observa, que independentemente do tipo de amostra estudada, o comportamento é caracterizado por um rápido aumento de deformação axial nos primeiros 100 ciclos de carregamento, seguido de uma diminuição da taxa de deformação (caso sem membrana) e uma estabilização assintótica para um valor constante (caso com membrana). A taxa de deformação durante a fase de carregamento cíclico para um solo estabilizado está diretamente relacionada com a velocidade de degradação do esqueleto sólido do material compósito, estando este comportamento em linha com observado por Abu-Farsakh et al. (2015), Chen et al. (2016), Guo et al. (2013), Martins et al. (2023, 2024), Ni et al. (2015), Nie et al. (2020), Venda Oliveira et al. (2018).



**Fig. 2** – Evolução da deformação axial permanente acumulada com o número de ciclos de carga para amostras estabilizadas, reforçadas ou não, com fibras de polipropileno (PP), e ensaiadas com (CM) e sem (SM) membrana.

Uma das formas de caracterização do comportamento de materiais sujeitos a solicitação cíclica é por meio da teoria do “*shakedown*”, sendo esta teoria amplamente difundida para os materiais granulares não coesivos (EN-13286-7, 2004). Esta norma define os limites de “*shakedown*” com base na diferença da deformação permanente acumulada entre 5.000 e 3.000 ciclos: o limite de “*plastic shakedown*” corresponde a  $4,5 \times 10^{-5}$ , enquanto o limite de “*plastic creep shakedown*” é de  $4 \times 10^{-4}$ . Assim sendo, se esta diferença for inferior a  $4 \times 10^{-4}$ , o material comporta-se de acordo com o “*plastic shakedown*”, mas para valores mais elevados o material apresenta um comportamento de “*plastic creep shakedown*”. Considerando os limites da teoria do “*shakedown*” anteriormente mencionados, na Figura 2 e no Quadro 4 observa-se que as amostras ensaiadas sem membrana, tanto não reforçadas como reforçadas com fibras, apresentam um comportamento próximo do “*plastic creep shakedown*” ( $\epsilon_{acum.5000} - \epsilon_{acum.3000} > 4 \times 10^{-4}$ ), ou seja, as deformações plásticas ocorridas durante o carregamento cíclico induzem o endurecimento do material. Por outro lado, as amostras revestidas com membrana de látex apresentam um comportamento dentro do limite do “*plastic shakedown*” ( $4,5 \times 10^{-5} < \epsilon_{acum.5000} - \epsilon_{acum.3000} < 4 \times 10^{-4}$ ), ou seja, inicialmente o carregamento cíclico induz deformações plástica, mas após um número finito de ciclos o material atinge uma resposta histerética estável.

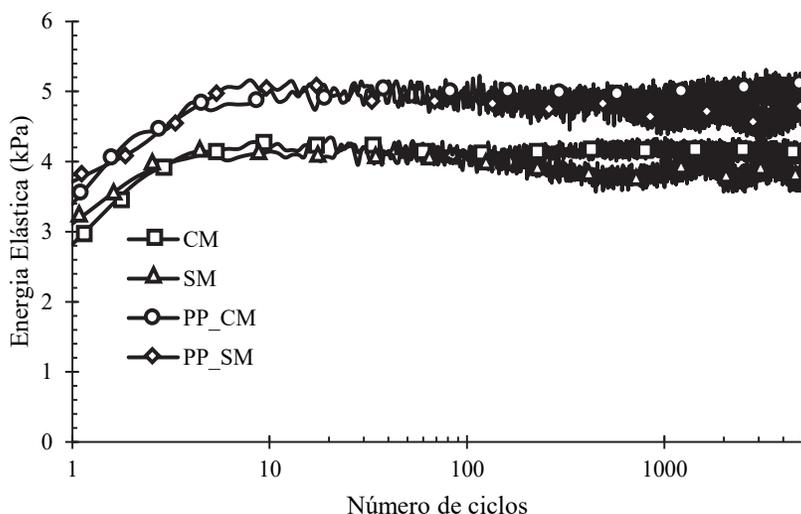
Os dados do Quadro 4 e da Figura 2 indicam que a adição de fibras às amostras estabilizadas promove um aumento de deformação axial permanente acumulada durante os primeiros ciclos de carga, tendendo este efeito a atenuar-se com o aumento do número de ciclos. Este comportamento indicia que a adição das fibras pode impedir o desenvolvimento de algumas ligações cimentícias, originando um material compósito com menor resistência e rigidez, pelo que o material estabilizado reforçado com fibras experimentará mais deformações axiais durante a fase inicial do carregamento cíclico. No entanto, com o aumento do número de ciclos existe geração de deformações plásticas que permitem a mobilização da resistência à tração das fibras, as quais passam a absorver parte das ações impostas durante a solicitação cíclica, contribuindo para a atenuação da taxa de deformação plástica para um número elevado de ciclos de carga.

**Quadro 4** – Diferença da deformação permanente acumulada entre 5.000 e 3.000 ciclos.

$\epsilon_{acum. 5000} - \epsilon_{acum. 3000} (-)$			
SM	CM	PP SM	PP CM
1,1E-03	8,2E-05	8,3E-04	7,6E-05

## 4.2 – Fase cíclica: energia

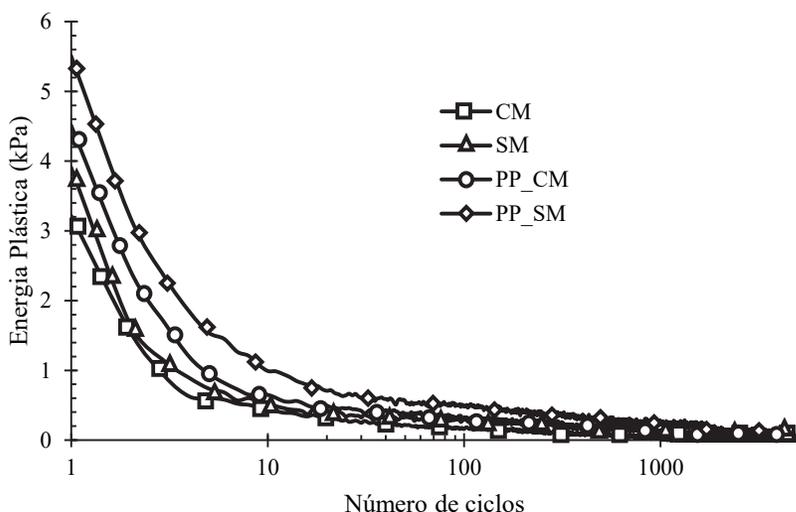
Um dos objetivos deste estudo é efetuar a análise do comportamento do solo sob carregamento cíclico em termos de energia. Assim, foram analisadas as energias elástica e plástica de cada ciclo histerético de tensão-deformação. Como referido anteriormente, a energia plástica ou dissipada corresponde à área delimitada pelo interior do ciclo histerético, enquanto a energia elástica ou recuperada corresponde à área abaixo da curva de descarga do ciclo (Choobbasti e Kutanaei, 2017, Martins et al., 2023, Narani et al., 2021, Ostadan et al., 1996, Sas et al., 2017). Todos os cálculos em termos de energia foram realizados utilizando a integração numérica pela regra dos trapézios, como sugerido por Lenart (2008), por meio um algoritmo desenvolvido pelos autores em Matlab. As evoluções da energia elástica e plástica com o número de ciclos são apresentadas nas Figuras 3 e 4, respetivamente.



**Fig. 3** – Evolução da energia elástica com o número de ciclos de carga para amostras estabilizadas reforçadas com fibras de polipropileno (PP) e não reforçadas ensaiadas com (CM) e sem (SM) membrana.

Na Figura 3 é possível observar que, para todos os casos estudados, a energia elástica aumenta gradualmente nos primeiros ciclos. Os resultados também mostram que nas amostras envolvidas por membrana, após um número finito de ciclos ( $\approx 100$  ciclos) a energia elástica tende a permanecer constante, estando em linha com a deformação axial permanente acumulada e o comportamento típico do “*plastic shakedown*”. Por outro lado, constata-se que nas amostras não revestidas por membrana, após um número finito de ciclos ( $\approx 200$  ciclos) a energia elástica decai ligeiramente, possivelmente devido à presença de sucção, sendo mais proeminente nos ciclos mais avançados devido à eventual ocorrência de uma maior secagem dos provetes, promovendo um maior aumento da tensão efetiva.

Independentemente do caso analisado, na Figura 4 observa-se que a energia plástica prevalece fundamentalmente nos ciclos iniciais, decrescendo rapidamente com a evolução dos ciclos de carregamento. Também se constata que os provetes não revestidos com membrana, apresentam energia plástica superior aos provetes revestidos, o que vem corroborar os resultados das deformações permanentes acumuladas, ilustrados na Figura 2. Salienta-se o facto que a energia plástica está associada a vários mecanismos de dissipação de energia relacionados com o deslizamento por atrito nos contactos entre as partículas, alteração da viscosidade volumétrica



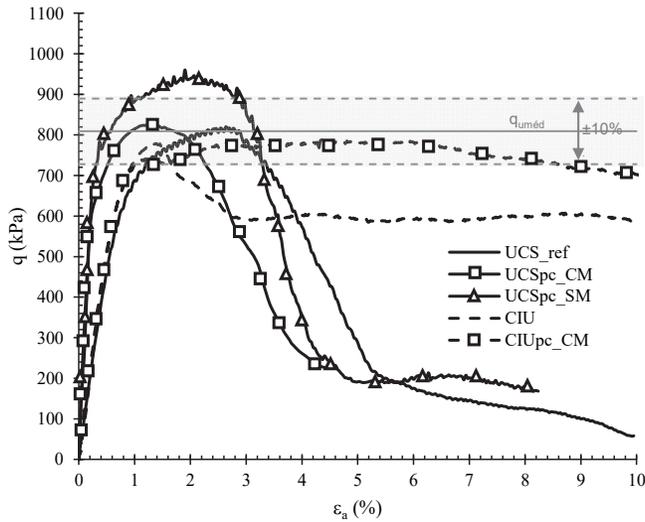
**Fig. 4** – Evolução da energia plástica com o número de ciclos de carga para amostras estabilizadas reforçadas com fibras de polipropileno (PP) e não reforçadas, ensaiadas com (CM) e sem (SM) membrana.

induzida pelo movimento do fluido dos poros, quebra de partículas (Johnson et al., 2021, Lenart, 2008, Narani et al., 2020, Sas et al., 2017, Xia et al., 2021), e à quebra de ligações do esqueleto sólido (ligações cimentícias). Sendo que para os solos estabilizados, a quebra de ligações cimentícias é o mecanismo de dissipação dominante, induzindo deformações irreversíveis do esqueleto sólido, ou seja, induzindo deformações plásticas permanentes Martins et al. (2023).

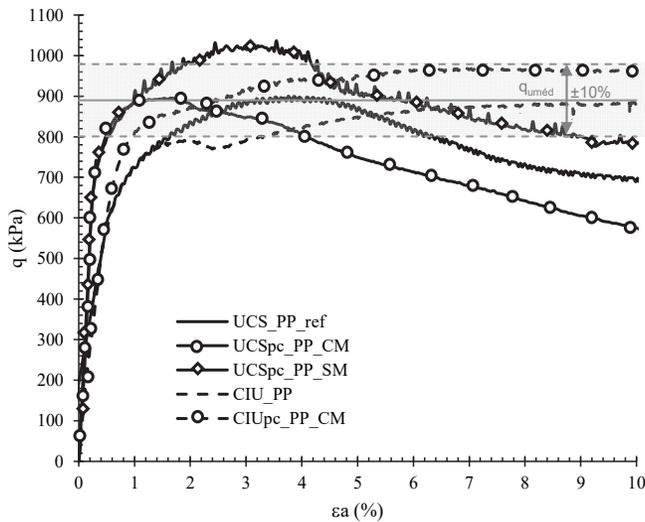
Comparando as Figuras 3 e 4 constata-se que a adição de fibras promove o aumento tanto da energia elástica quanto da energia plástica. Esse aumento pode ser explicado por dois efeitos: a alta compressibilidade das fibras de polipropileno (Narani et al., 2020) que quando mobilizadas promovem uma maior recuperação de energia (aumento da energia elástica), e pelo enfraquecimento da matriz estabilizada devido à presença física das fibras que podem impedir o desenvolvimento de algumas ligações cimentícias, produzindo um material compósito com menor resistência e rigidez, levando ao aumento de deformação plástica.

### 4.3 – Fase pós cíclica: comportamento tensão-deformação

Após se constatar que o não revestimento dos provetes com membrana durante a fase cíclica apresenta uma considerável influência nos resultados, possivelmente devido à secagem das amostras, nesta seção analisam-se os resultados de ensaios UCS previamente submetidos a fase cíclica (UCS pós-cíclico) para ambas as condições, com e sem membrana, de forma a verificar a influência da sucção na resistência à compressão do compósito. Para compreender se a utilização de membrana durante a fase de carregamento cíclico mitiga o fenómeno de sucção, adicionalmente realizaram-se ensaios triaxiais CIU, monotónicos e previamente submetidos a fase cíclica (CIU pós-cíclico) nas mesmas condições dos ensaios UCS, mas com a garantia de saturação dos provetes, ou seja, com sucção negligenciável. As Figuras 5 e 6 ilustram o comportamento tensão-deformação de ensaios UCS, ensaios UCS previamente submetidos a carregamento cíclico ( $UCS_{pc}$ ) com e sem membrana, ensaios triaxiais CIU e ensaios triaxiais CIU após fase cíclica ( $CIU_{pc}$ ) com membrana, com provetes de solo estabilizado não reforçado e reforçado com fibras, respetivamente.



**Fig. 5** – Comportamento tensão-deformação de amostras de solo estabilizado (sem adição de fibras) ensaiadas antes e após fase de carregamento cíclico, com (CM) e sem (SM) membrana envolvente.



**Fig. 6** – Comportamento tensão-deformação de amostras de solo estabilizado reforçado com fibras de polipropileno (PP), ensaiadas antes e após fase de carregamento cíclico, com (CM) e sem (SM) membrana envolvente

Observando detalhadamente os resultados apresentados nas Figuras 5 e 6 em conjunto com o Quadro 5 é possível constatar que, independentemente do reforço ou não com fibras, os resultados obtidos no ensaio UCS pós-cíclico sem membrana evidenciam um aumento de resistência, em relação aos ensaios UCS monotônicos, superior a 15% (critério de conformidade proposto em EN-206-1 (2007)), enquanto o ensaio UCS pós-cíclico com membrana exibe valores de resistência à compressão não confinada semelhantes ao ensaio monotônico. Comparando os resultados obtidos nos ensaios UCS, UCS pós-cíclicos com membrana, triaxiais CIU e CIU pós cíclicos (também realizados com membrana), é possível observar valores de resistência à compressão semelhantes

entre si, não apresentando diferenças consideráveis. Imediatamente no final de cada ensaio procedeu-se à medição do teor em água final das amostras, (Quadro 5), que em conjunto com os resultados obtidos nos ensaios mencionados, permite concluir que a utilização de membrana a envolver a amostra durante a fase cíclica (ou em ensaios de longa duração em solos estabilizados reforçados ou não com fibras) é fundamental para evitar a secagem dos provetes de forma significativa e, conseqüentemente, limitar o desenvolvimento de sucções e o seu efeito nos resultados obtidos.

**Quadro 5** – Resistência à compressão, variação de resistência à compressão e teor em água imediatamente após o fim do ensaio.

	$q_{um\acute{a}x.}$ (kPa)	$\Delta q_u$ (%)	$w_{final}$ (%)
<b>UCS<sub>ref</sub></b>	809,92	-	59,4
<b>UCS<sub>pc SM</sub></b>	960,56	+ 18,73	57,1
<b>UCS<sub>pc CM</sub></b>	826,68	+ 2,19	59,6
<b>CIU</b>	778,17	- 3,81	61,1
<b>CIU<sub>pc CM</sub></b>	788,15	- 2,58	61,3
<b>UCS<sub>PP ref</sub></b>	900,03	-	58,9
<b>UCS<sub>pc PP SM</sub></b>	1036,80	+ 16,49	56,7
<b>UCS<sub>pc PP CM</sub></b>	895,59	- 0,63	58,8
<b>CIU<sub>PP</sub></b>	886,45	- 0,40	60,9
<b>CIU<sub>pc PP CM</sub></b>	872,21	- 2,00	61,0

$\Delta q_u$ = variação da resistência à compressão em relação à média dos valores de resistência a compressão encontrados nos ensaios UCS monotónicos.

Comparando as Figuras 5 e 6 é possível verificar que a inclusão de fibras de polipropileno (com uma dosagem de 10 kg/m<sup>3</sup>) torna o comportamento do material compósito mais dúctil, em concordância com Consoli et al. (2009), Correia et al. (2015), Olgun (2013), assim como induz um ligeiro aumento de resistência à compressão de pico, o que pode estar relacionado com a mobilização da resistência á tração das fibras e a conseqüente redistribuição de tensões.

Adicionalmente, observa-se nos ensaios UCS pós-cíclico, com ou sem membrana, um aumento da rigidez, não sendo esta tendência registada nos ensaios triaxiais. Tal comportamento pode ser devido à descarga/recarga das amostras após a fase cíclica ocorrer quase instantaneamente para os ensaios UCS, enquanto nos ensaios triaxiais, entre a fase cíclica e a fase de corte, os provetes estiveram a saturar durante cerca de dois dias.

## 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão não confinada e triaxial não drenado realizados com amostras estabilizadas não reforçadas e reforçadas com fibras de polipropileno, submetidas ou não a carregamento cíclico prévio (aplicada para um nível de tensão deviatória de 50% de  $q_{um\acute{a}x.}$ , amplitude de  $\pm 10\%$  de  $q_{um\acute{a}x.}$ , frequência de 0,5 Hz e durante 5.000 ciclos de carga), com e sem utilização de membrana a envolver os provetes, permitem concluir o seguinte:

- i) Os ensaios UCS cíclicos induzem a ocorrência de sucções, nomeadamente se o processo de secagem das amostras não for impedido, por exemplo, utilizando uma membrana a envolver a amostra ou assegurando a permanente saturação dos provetes.
- ii) A existência de secagem/sucção origina o aumento de deformação axial permanente acumulada durante o carregamento cíclico, o que pode estar relacionado com o aumento de tensão efetiva.

- iii) O comportamento durante a fase cíclica é caracterizado por um rápido aumento da deformação axial permanente acumulada nos primeiros 100 ciclos de carregamento, seguido de um suave aumento (provetes não revestidos membrana) e uma estabilização assintótica para um valor constante (provetes revestidos com membrana).
- iv) A energia elástica aumenta gradualmente nos primeiros ciclos, embora nas amostras envolvidas por membrana após um número finito de ciclos ( $\approx 100$  ciclos) a energia elástica tende a permanecer constante. Nas amostras não envolvidas por membrana, após um número finito de ciclos ( $\approx 200$  ciclos) a energia elástica decai, possivelmente devido à presença de sucção, sendo o comportamento mais proeminente nos ciclos mais avançados.
- v) A presença das fibras promove o aumento da deformação axial permanente acumulada, a qual tende a atenuar-se com o aumento do número de ciclos de carga, bem como o aumento de energia elástica e plástica. Este comportamento está relacionado com a elevada compressibilidade das fibras de polipropileno e pela presença física das fibras que pode impedir o desenvolvimento de algumas ligações cimentícias, produzindo um material compósito com menor resistência e rigidez.
- vi) Em termos de resistência à compressão não confinada, os resultados indicam que é muito importante evitar a secagem das amostras e, consequentemente, limitar a ocorrência de sucção durante os ensaios UCS cíclicos, uma vez que o fenómeno de sucção induz um aumento considerável da resistência, registada no ensaio UCS pós-cíclico. Nos ensaios triaxiais, a saturação do provete anula a sucção gerada durante a fase cíclica.
- vii) Constata-se que para solos estabilizados, independentemente de estarem ou não reforçados com fibras, a sucção é um parâmetro que afeta a deformação plástica, a energia e a resistência do material, pelo que é extremamente importante que o seu efeito seja mitigado, quer através da utilização de uma membrana a envolver os provetes durante os ensaios UCS cíclicos, quer assegurando que as amostras permaneçam saturadas nos ensaios triaxiais.

## 6 – AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar os seus agradecimentos à CIMPOR e à Biu International pelo fornecimento dos ligantes e das fibras, e à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT/MCTES) pelo apoio financeiro a esta investigação através de fundos nacionais (PIDDAC) no âmbito do projeto de investigação PTDC/ECI-CON/28382/2017, da bolsa de investigação individual 2021.05748.BD, do Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Engenharia de Estruturas (ISISE), com a referência UIDB/04029/2020, ao Laboratório Associado de Produção Avançada e Sistemas Inteligentes (ARISE) com a referência LA/P/0112/2020 e à unidade de I&D Engenharia Química e Recursos Renováveis para a Sustentabilidade (CERES) com a referência UIDB/00102/2020.

## 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdullah, H. H., Shahin, M. A., Walske, M. L., e Karrech, A. (2020). *Systematic approach to assessing the applicability of fly-ash-based geopolymers for clay stabilization*. Canadian Geotechnical Journal, 57(9), 1356-1368. <https://doi.org/10.1139/cgj-2019-0215>
- Abu-Farsakh, M., Dhakal, S., e Chen, Q. (2015). *Laboratory characterization of cementitiously treated/stabilized very weak subgrade soil under cyclic loading*. Soils and Foundations, 55(3), 504-516. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.04.003>

- Agboola, O., Sadiku, E. R., Popoola, P., Fayomi, O. S. I., Ayeni, A. O., Dick, D. T., Adegbola, A. T., Moropeng, L., e Ramakhokhovhu, M. (2021). *Surface roughness of ternary blends: Polypropylene/chitosan/sisal fiber membranes*. *Materials Today: Proceedings*, 38, 2342-2346. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.513>
- Ahmed, A., e Naggar, M. H. (2018). *Effect of cyclic loading on the compressive strength of soil stabilized with bassanite-tire mixture*. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20(1), 525-532. <https://doi.org/10.1007/s10163-017-0617-1>
- Åhnberg, H., Johansson, S.-E., Pihl, H., e Carlsson, T. (2003). *Stabilising effects of different binders in some Swedish soils*. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 7(1), 9-23.
- Akbari, H. R., Sharafi, H., e Goodarzi, A. R. (2021). *Effect of polypropylene fiber inclusion in kaolin clay stabilized with lime and nano-zeolite considering temperatures of 20 and 40 °C*. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(2), 1841-1855. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-02028-x>
- ASTM-D2487. (1998). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. In: ASTM International.
- Chae, J., Kim, B., Park, S.-w., e Kato, S. (2010). *Effect of suction on unconfined compressive strength in partly saturated soils*. *KSCSE Journal of Civil Engineering*, 14(3), 281-290. <https://doi.org/10.1007/s12205-010-0281-7>
- Chauhan, M. S., Mittal, S., e Mohanty, B. (2008). *Performance evaluation of silty sand subgrade reinforced with fly ash and fibre*. *Geotextiles and Geomembranes*, 26(5), 429-435. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geotxmem.2008.02.001>
- Chen, Q., Indraratna, B., e Rujikiatkamjorn, C. (2016). *Behaviour of lignosulfonate-treated soil under cyclic loading*. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 169(2), 109-119. <https://doi.org/10.1680/grim.15.00004>
- Choobbasti, A. J., e Kutanaei, S. S. (2017). *Effect of fiber reinforcement on deformability properties of cemented sand*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 31(14), 1576-1590. <https://doi.org/10.1080/01694243.2016.1264681>
- Consoli, N. C., Foppa, D., Festugato, L., e Heineck, K. S. (2007). *Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(2), 197-205. [https://doi.org/doi:10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:2\(197\)](https://doi.org/doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:2(197))
- Consoli, N. C., Moraes, R. R., e Festugato, L. (2013). *Variables controlling strength of fibre-reinforced cemented soils*. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 166(4), 221-232. <https://doi.org/10.1680/grim.12.00004>
- Consoli, N. C., Rosa, D. A., Cruz, R. C., e Rosa, A. D. (2011a). *Water content, porosity and cement content as parameters controlling strength of artificially cemented silty soil*. *Engineering Geology*, 122(3), 328-333. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.05.017>
- Consoli, N. C., Vendruscolo, M. A., Fonini, A., e Rosa, F. D. (2009). *Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range*. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(3), 196-203. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geotxmem.2008.11.005>
- Consoli, N. C., Zortéa, F., de Souza, M., e Festugato, L. (2011b). *Studies on the dosage of fiber-reinforced cemented soils*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(12), 1624-1632.

- Correia, A. A. S. (2011). *Applicability of deep mixing technique to the soft soil of Baixo Mondego* (PhD Thesis, Univ. of Coimbra, Coimbra, Portugal).
- Correia, A. A. S., Lopes, L., e Reis, M. S. (2021). *Advanced predictive modelling applied to the chemical stabilisation of soft soils*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, 1-11. <https://doi.org/10.1680/jgeen.19.00295>
- Correia, A. A. S., Venda Oliveira, P. J., e 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. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2014.11.008>
- Correia, A. A. S., Venda Oliveira, P. J., e Lemos, L. J. L. (2019). *Strength assessment of chemically stabilised soft soils*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, 172(3), 218-227. <https://doi.org/10.1680/jgeen.17.00011>
- Correia, A. A. S., Venda Oliveira, P. J., Teles, J. M. N. P. C., e Pedro, A. M. G. (2017). *Strength of a stabilised soil reinforced with steel fibres*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, 170(4), 312-321. <https://doi.org/10.1680/jgeen.16.00200>
- Dall'Aqua, G. P., Ghataora, G., e Ling, U. (2010). *Behaviour of fibre-reinforced and stabilized clayey soils subjected to cyclic loading*. Studia Geotechnica et Mechanica, 32, 3-16.
- EN-197-1. (2000). *Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements*. In: European Committee for Standardization.
- EN-206-1. (2007). *Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity*. In: European Committee for Standardization.
- EN-13286-7. (2004). *Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures*. In: European Committee for Standardization.
- EuroSoilStab. (2002). *Development of design and construction methods to stabilise soft organic soils: Design guide soft soil stabilisation*. In: Industrial and Materials Technologies Programme (Brite-EuRam III), European Commission, p. 94.
- Festugato, L., Fourie, A., e Consoli, N. C. (2013). *Cyclic shear response of fibre-reinforced cemented paste backfill*. Géotechnique Letters, 3(1), 5-12. <https://doi.org/10.1680/geolett.12.00042>
- Fredlund, D. G., Sheng, D., e Zhao, J. (2011). *Estimation of soil suction from the soil-water characteristic curve*. Canadian Geotechnical Journal, 48(2), 186-198.
- Guo, L., Wang, J., Cai, Y., Liu, H., Gao, Y., e Sun, H. (2013). *Undrained deformation behavior of saturated soft clay under long-term cyclic loading*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 50, 28-37. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.01.029>
- Horpibulsuk, S., Miura, N., e Nagaraj, T. S. (2005). *Clay-Water/Cement Ratio Identity for Cement Admixed Soft Clays*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131(2), 187-192. [https://doi.org/doi:10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:2\(187\)](https://doi.org/doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:2(187))
- Janz, M., e Johansson, S. E. (2002). *The function of different binding agents in deep sathbilization* (9). S. D. S. R. Centre.
- Johnson, D. H., Vahedifard, F., e Peters, J. F. (2021). *Macroscale friction of granular soils under monotonic and cyclic loading based upon micromechanical determination of dissipated energy*. Acta Geotechnica, 16(10), 3027-3039. <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01224-7>

- Kamruzzaman, A. H., Chew, S. H., e Lee, F. H. (2009). *Structuration and Destructuration Behavior of Cement-Treated Singapore Marine Clay*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135(4), 573-589. [https://doi.org/doi:10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2009\)135:4\(573\)](https://doi.org/doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2009)135:4(573))
- Kaniraj, S. R., e Havanagi, V. G. (2001). *Behavior of Cement-Stabilized Fiber-Reinforced Fly Ash-Soil Mixtures*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(7), 574-584. [https://doi.org/doi:10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:7\(574\)](https://doi.org/doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:7(574))
- Khattak, M. J., e Alrashidi, M. (2006). *Durability and mechanistic characteristics of fiber reinforced soil-cement mixtures*. International Journal of Pavement Engineering, 7(1), 53-62. <https://doi.org/10.1080/10298430500489207>
- Kumar, A., e Gupta, D. (2016). *Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced pond ash, rice husk ash-soil mixtures*. Geotextiles and Geomembranes, 44(3), 466-474. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2015.07.010>
- Lau, J., Biscontin, G., e Berti, D. (2021). *Effects of biochar on cement-stabilised peat soil*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement, 176(2), 76-87. <https://doi.org/10.1680/jgrim.19.00013>
- Lemos, L. J. L., Correia, A. A. S., e Venda Oliveira, P. J. (2021). *Behavior of chemically stabilized soils reinforced with fibers under monotonic and cyclic loading*. Geotecnia Journal - Special Issue Commemorating the 50th Anniversary, 152, 509-529. [https://doi.org/https://doi.org/10.14195/2184-8394\\_152\\_16](https://doi.org/https://doi.org/10.14195/2184-8394_152_16)
- Lenart, S. (2008). The Use of Dissipated Energy at Modeling of Cyclic Loaded Saturated Soils. In T. M. a. Y. Ikeda (Ed.), *Earthquake Engineering: New Research* (pp. 29). Nova Science Publishers, Inc., New York.
- Lorenzo, G. A., e Bergado, D. T. (2004). *Fundamental Parameters of Cement-Admixed Clay - New Approach*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(10), 1042-1050. [https://doi.org/doi:10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:10\(1042\)](https://doi.org/doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:10(1042))
- Lorenzo, G. A., e Bergado, D. T. (2006). *Fundamental characteristics of cement-admixed clay in deep mixing*. Journal of Materials in Civil Engineering, 18(2), 161-174. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:2\(161\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:2(161))
- Martins, L. A., Correia, A. A. S., Venda Oliveira, P. J., e Lemos, L. J. L. (2023). *Effect of the number of loading cycles on the behavior of a stabilized fiber reinforced soft soil – energy evaluation*. Journal of Materials in Civil Engineering <https://doi.org/https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-15231>
- Martins, L. A., Correia, A. A. S., Venda Oliveira, P. J., e Lemos, L. J. L. (2024). *Using the shakedown theory to study the cyclic behaviour of an unreinforced and fibre-reinforced stabilized soft soil*. International Journal of Geotechnical Engineering, 1-12. <https://doi.org/10.1080/19386362.2024.2359816>
- Narani, S. S., Abbaspour, M., Hosseini, S. M. M. M., e Nejad, F. M. (2020). *Long-term dynamic behavior of a sandy subgrade reinforced by Waste Tire Textile Fibers (WTFs)*. Transportation Geotechnics, 24, 100375. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100375>
- Narani, S. S., Zare, P., Abbaspour, M., Fahimifar, A., Siddiqua, S., e Mir Mohammad Hosseini, S. M. (2021). *Evaluation of fiber-reinforced and cement-stabilized rammed-earth composite under cyclic loading*. Construction and Building Materials, 296, 123746. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123746>

- Ni, J., Indraratna, B., Geng, X., Carter, J. P., e Chen, Y. (2015). *Model of soft soils under cyclic loading*. International Journal of Geomechanics, 15(4), 04014067.
- Nie, R., Li, Y., Leng, W., Mei, H., Dong, J., e Chen, X. (2020). *Deformation characteristics of fine-grained soil under cyclic loading with intermittence*. Acta Geotechnica, 15(11), 3041-3054. <https://doi.org/10.1007/s11440-020-00955-3>
- Olgun, M. (2013). *Effects of polypropylene fiber inclusion on the strength and volume change characteristics of cement-fly ash stabilized clay soil*. Geosynthetics International, 20(4), 263-275. <https://doi.org/10.1680/gein.13.00016>
- Ostadan, F., Deng, N., e Arango, I. (1996). *Energy-based Method for Liquefaction Potential Evaluation. Phase I, Feasibility Study*. National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research ....
- Park, S. S. (2011). *Unconfined compressive strength and ductility of fiber-reinforced cemented sand*. Construction and Building Materials, 25(2), 1134-1138. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.017>
- Plé, O., e Lê, T. N. H. (2012). *Effect of polypropylene fiber-reinforcement on the mechanical behavior of silty clay*. Geotextiles and Geomembranes, 32, 111-116. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2011.11.004>
- Sas, W., Gluchowski, A., Bursa, B., e Szymański, A. (2017). *Energy-based analysis of permanent strain behaviour of cohesive soil under cyclic loading*. Acta Geophysica, 65(2), 331-344. <https://doi.org/10.1007/s11600-017-0028-7>
- Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F., e Cai, Y. (2007). *Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil*. Geotextiles and Geomembranes, 25(3), 194-202. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2006.11.002>
- Varkuti, H. R. (2015). *Influence Of Cyclic Loading On The Bearing Capacity Of Treated Soil*. In: Faculty of Civil Engineering, Bauhaus University Weimar.
- Venda Oliveira, P. J., e Cabral, D. J. R. (2023). *Behaviour of sand stabilised with xanthan gum under unconfined and confined conditions*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement, 176(1), 3-13. <https://doi.org/10.1680/jgrim.20.00065>
- Venda Oliveira, P. J., Correia, A. A. S., e 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. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.09.005>
- Venda Oliveira, P. J., Correia, A. A. S., e Garcia, M. R. (2013). *Effect of Stress Level and Binder Composition on Secondary Compression of an Artificially Stabilized Soil*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 139(5), 810-820. [https://doi.org/doi:10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000762](https://doi.org/doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000762)
- Venda Oliveira, P. J., Correia, A. A. S., e Lopes, T. J. S. (2014). *Effect of organic matter content and binder quantity on the uniaxial creep behavior of an artificially stabilized soil*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 140. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001158](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001158)
- Venda Oliveira, P. J., Correia, A. A. S., Teles, J. M. N. P. C., e Custódio, D. G. (2016). *Effect of fibre type on the compressive and tensile strength of a soft soil chemically stabilised*. Geosynthetics International, 23(3), 171-182. <https://doi.org/10.1680/jgein.15.00040>

- Venda Oliveira, P. J., Correia, A. A. S., Teles, J. M. N. P. C., e Pedro, A. M. G. (2017). *Effect of cyclic loading on the behaviour of a chemically stabilised soft soil reinforced with steel fibres*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 92, 122-125. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.10.006>
- Xia, P., Shao, L., e Deng, W. (2021). *Mechanism study of the evolution of quasi-elasticity of granular soil during cyclic loading*. *Granular Matter*, 23(4), 84. <https://doi.org/10.1007/s10035-021-01157-8>
- Yilmaz, Y. (2009). *Experimental investigation of the strength properties of sand–clay mixtures reinforced with randomly distributed discrete polypropylene fibers*. *Geosynthetics International*, 16(5), 354-363. <https://doi.org/10.1680/gein.2009.16.5.354>
- Zaimoglu, A. S., e Yetimoglu, T. (2012). *Strength behavior of fine grained soil reinforced with randomly distributed polypropylene fibers*. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(1), 197-203.