

COMPORTAMENTO DE SOLOS ESTABILIZADOS QUIMICAMENTE E REFORÇADOS COM FIBRAS SOB AÇÕES MONOTÓNICAS E CÍCLICAS

Behavior of chemically stabilized soils reinforced with fibers under monotonic and cyclic loading

Luis J. L. Lemos^{a,b}, António A. S. Correia^{a,c}, Paulo J. Venda Oliveira^{a,d}

^a Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Portugal.

^b CGeo, Centro de Geociências, Universidade de Coimbra, Portugal.

^c CIEPQPF, Centro de Investigação em Engenharia Química de Processos e Produtos para a Floresta, Universidade de Coimbra.

^d ISISE, Instituto para a Sustentabilidade e Inovação na Engenharia de Estruturas, Universidade de Coimbra.

RESUMO – No presente trabalho pretende-se analisar o comportamento de solos quimicamente estabilizados não reforçados e reforçados com fibras metálicas e de polipropileno. Inicialmente aborda-se o comportamento sob ações monotónicas de compressão e tração, tendo como referencial o solo mole do Baixo Mondego. Posteriormente, analisa-se o efeito do carregamento cíclico no comportamento de uma areia, um silte e de um solo orgânico, confrontando os resultados de ensaios de compressão não confinada (UCS) e de compressão diametral (CD) em condições monotónicas com os ensaios equivalentes previamente submetidos a carregamento cíclico. Em complemento, também se analisam as deformações permanentes acumuladas registadas na fase cíclica. Os resultados permitem observar que: *i*) o reforço com ambos os tipos de fibras aumenta a ductilidade do solo estabilizado; *ii*) o efeito da inclusão de fibras nas propriedades mecânicas depende do nível de cimentação, i.e., para reduzidos teores de ligante a inclusão de fibras tem efeito positivo, registando-se um efeito contraproducente para elevados teores de ligante; *iii*) independentemente do tipo de solo, a solicitação cíclica induz a melhoria das propriedades mecânicas dos solos estabilizados.

ABSTRACT – This work analyzes the behavior of chemically stabilized soils unreinforced and reinforced with steel and polypropylene fibers. Initially, the behavior under monotonic compressive and tensile loads is addressed, using as reference the soft soil of Baixo Mondego. Subsequently, the effect of cyclic loading on the behavior of a sand, a silt and an organic soil is analyzed. This is based on the comparison of the results of monotonic unconfined compressive strength (UCS) and Brazilian tests with equivalent tests previously subjected to cyclic loading. Additionally, the accumulated permanent deformations obtained in the cyclic phase are also analyzed. From the results it was found that: *i*) the reinforcement with both types of fibers increases the ductility of the stabilized soil; *ii*) the effect of the inclusion of fibers on the mechanical properties depends on the cementation level, i.e., for low binder content the inclusion of fibers has a positive effect, while for high binder content the effect is negative; *iii*) regardless of the soil type, the cyclic loading induces the increase of the mechanical properties of the stabilized soils.

Palavras Chave – Solo estabilizado quimicamente; fibras metálicas; fibras de polipropileno, ensaio de compressão não confinado, carregamento cíclico

Keywords – Chemically stabilized soil; steel fibers; polypropylene fibers, unconfined compressive strength test, cyclic loading

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

ORCID: orcid.org/0000-0003-3489-7162, orcid.org/0000-0002-3260-8729, orcid.org/0000-0001-8515-8664

1 – INTRODUÇÃO

A partir da década de 60 do século XX a estabilização química dos solos tem-se afirmado como uma das principais técnicas de melhoramento de solos com aplicação generalizada em todos os continentes, em particular nas zonas do globo com grande predominância de solos moles, os quais exigem a melhoria das suas propriedades para serem considerados aptos para a engenharia civil. Atualmente, o campo de aplicação desta técnica é muito diversificado, nomeadamente: fundações de estruturas e aterros, estabilidade de taludes, mitigação de vibrações induzidas por comboios de alta velocidade ou equipamento industrial, mitigação de liquefação, muros de contenção de terras (Terashi, 2005; Holm, 2005; Terashi e Kitazume, 2009) e estabilização/solidificação de solos contaminados (Al-Tabbaa et al, 2009; Hernandez-Martinez et al., 2009).

Em geral, o comportamento mecânico de solos estabilizados com ligantes caracteriza-se por boa resistência à compressão, mas deficiente resistência à tração/flexão (Sukontasukkul e Jamsawang, 2012), associada a um comportamento frágil (Consoli et al., 2009; Sukontasukkul e Jamsawang, 2012; Olgun, 2013). Para garantir a funcionalidade de determinadas estruturas geotécnicas é necessário conferir ao solo estabilizado alguma resistência à tração/flexão, nomeadamente, quando as estruturas estão sujeitas a significativos deslocamentos horizontais (por exemplo, colunas instaladas em taludes e sob as laterais de aterros), cargas sísmicas e/ou pressões laterais de terras (como no caso de paredes de contenção). Para ultrapassar esta limitação dos solos estabilizados, existem duas metodologias alternativas que podem ser utilizadas, o reforço do solo estabilizado quimicamente com vigas de aço tipo H (frequentemente utilizado em paredes de contenção) e/ou a inclusão de fibras na mistura solo-ligante, como frequentemente utilizado no betão.

O efeito da inclusão de fibras sintéticas no comportamento dos solos quimicamente estabilizados tem sido estudado na bibliografia fundamentalmente em termos de resistência à compressão não confinada (Cai et al., 2006; Tang et al., 2007; Consoli et al., 2010; 2011a, 2012, 2013a, 2013b, 2013c; Park, 2009, 2011; Estabragh et al., 2012; Olgun, 2013; Correia et al, 2015) e resistência à tração (Consoli et al., 2011b, 2012, 2013a, 2013b, 2013c; Olgun, 2013; Correia et al., 2015). Solos estabilizados com baixo teor em cimento ou cal (inferior a 10%) mostram que a inclusão de fibras sintéticas origina um aumento de resistência à compressão e à tração (Cai et al., 2006; Tang et al., 2007; Consoli et al., 2010; 2011a; 2011b; Park, 2011; Estabragh et al., 2012; Olgun, 2013), diminuição de rigidez (Tang et al., 2007), incremento da resistência residual (Tang et al., 2007; Sukontasukkul e Jamsawang, 2012) e melhoria da ductilidade do material compósito (Tang et al., 2007; Estabragh et al., 2012). Contudo, a estabilização de solos moles, caracterizados por elevados teores em matéria orgânica, exige a utilização de uma elevada dosagem de ligante de modo a conferir ao material compósito propriedades mecânicas compatíveis com os requisitos exigidos por diversas obras geotécnicas. O reduzido número de trabalhos publicados sobre a inclusão de fibras em solos estabilizados com elevada dosagem de ligante revelam resultados distintos dos obtidos com menores teores em ligante. Assim, num solo arenoso estabilizado com elevada dosagem de ligante Consoli et al. (2009) obtiveram uma diminuição da resistência ao pico de compressão com a inclusão de fibras de polipropileno, enquanto Khattak e Alrashidi (2006) observaram uma redução da resistência à tração em argilas de alta plasticidade estabilizadas com um teor de cimento de 10% e reforçadas com teores de fibras de polipropileno superiores a 0,3%. Os poucos estudos sobre a inclusão de fibras de aço num solo estabilizado com elevado teor em ligante (superior a 10%) mostram uma redução da resistência à flexão (Sukontasukkul e Jamsawang, 2012), enquanto que a utilização de fibras de aço num solo de baixa plasticidade estabilizado com 4% de cal provoca um aumento da resistência à compressão (Gülü e Khudir, 2014).

Quando as estruturas são sujeitas a cargas dinâmicas, por exemplo, induzidas por sismos, vento, ondas do mar, tráfego e vibrações induzidas por maquinaria pesada ou devido ao uso de explosivos (Venda Oliveira et al., 2018), a caracterização do material baseada em ensaios monotónicos pode-se revelar inadequada, sendo fundamental a realização de ensaios cíclicos para uma correta caracterização do comportamento e aferição das características mecânicas após a fase cíclica. Apesar

do volume de trabalhos que abordam esta temática ser escasso, estes têm revelado que a solicitação dinâmica induz a rotura progressiva da estrutura da matriz cimentícia com o consequente aumento de deformações plásticas acumuladas (Chauhan et al., 2008; Yang et al., 2008; Viana da Fonseca et al., 2013), diminuição de rigidez (Sarma e Fahey, 2003; Subramaniam e Banerjee 2014) e da tensão de cedência (Sarma e Fahey 2003). Em geral, os resultados publicados mostram um aumento das deformações permanentes com o número de ciclos de carga (Venda Oliveira et al., 2018, Chauhan et al., 2008, Dall'Aqua et al., 2010; Venda Oliveira et al., 2017), o qual ocorre fundamentalmente no início da fase cíclica (Venda Oliveira et al., 2018, Dall'Aqua et al., 2010; Venda Oliveira et al., 2017). Ensaio de corte simples cíclicos e ensaios cíclicos de compressão diametral realizados com solos estabilizados reforçados com fibras de polipropileno mostraram que a inclusão de fibras tem um impacto positivo na resistência, induzindo um ligeiro aumento da resistência ao corte (Festugato et al., 2013) e um aumento significativo da resistência à tração (Khattak e Alrashidi 2006). Os resultados de ensaios cíclicos de compressão não confinada realizados com diferentes solos estabilizados (arenosos, siltosos e orgânicos) reforçados ou não com fibras de aço (Venda Oliveira et al., 2017) e de polipropileno (Venda Oliveira et al., 2018) também confirmam esta tendência. Maher e Ho (1993) obtiveram a rotura do solo estabilizado reforçado com fibras para um elevado número de ciclos de carga e elevado nível de deformação. Por outro lado, resultados de ensaios de resistência à compressão não confinada pós-cíclica num solo estabilizado e reforçado com fibras de pneu, mostraram uma degradação da resistência com o aumento do número de ciclos de carga, sendo este efeito atenuado para maiores teores de ligante e de fibras (Ahmed e Naggar 2018).

Considerando as lacunas existentes na bibliografia, anteriormente identificadas, considera-se pertinente a realização de uma investigação laboratorial para caracterizar: (i) o comportamento monotónico à compressão e à tração de solos estabilizados e reforçados com fibras metálicas e de polipropileno; (ii) o impacto da aplicação de carregamento cíclico no comportamento de solos estabilizados reforçados com fibras. O presente trabalho pretende contribuir para a clarificação destas matérias.

2 – TRABALHO EXPERIMENTAL

2.1 – Características dos solos

No Quadro 1 apresentam-se as principais características dos solos utilizados no presente estudo, designados por A, B, C e D. O solo A é uma areia mal graduada (SP), o solo B é um silte de elevada plasticidade (ML), enquanto os solos C e D são solos semelhantes, sendo ambos provenientes da região do “Baixo Mondego”, classificados como solos orgânicos de alta plasticidade (OH) devido ao seu elevado teor em matéria orgânica (9,3-10,3%). A presença de matéria orgânica influencia negativamente o comportamento dos solos C e D, induzindo baixa resistência ao corte não drenada ($c_u < 25$ kPa), alta compressibilidade e plasticidade (Coelho, 2000; Correia, 2011).

2.2 – Características do ligante

Os solos A, B e C foram quimicamente estabilizados com uma dosagem de 175 kg/m^3 de cimento Portland tipo I 42,5 R (EN 197-1 2000). O solo D foi quimicamente estabilizado por uma mistura de ligantes constituída por 75% de cimento Portland tipo I 42,5 R (EN 197-1 2000) e 25% de escórias granuladas de alto-forno, em consonância com o estudo de otimização realizado por Correia (2011). A estabilização do solo D foi realizada para duas dosagens de ligante, 125 e 375 kg/m^3 .

A composição química do cimento Portland (Quadro 2) revela a predominância de óxido de cálcio ($\text{CaO} = 62,8\%$), enquanto as escórias também apresentam um elevado teor de sílica e alumina ($\text{CaO} = 37,0\%$, $\text{SiO}_2 = 38,7\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 11,6\%$). Esta composição química confere ao cimento Portland propriedades hidráulicas (ou seja, reage espontaneamente com água), enquanto as escórias

potenciam o desenvolvimento de reações pozolânicas, responsáveis pela melhoria das propriedades mecânicas a longo prazo (Taylor 1997; Janz e Johansson, 2002).

Quadro 1 – Resumo da caracterização geotécnica dos solos A, B, C e D (Cajada, 2017; Venda Oliveira et al., 2016, 2018; Correia 2011)

Índices Geotécnicos		Solo A	Solo B	Solo C	Solo D
Composição granulométrica	% Argila	0	6	16	10
	% Silte	0	58	57	71
	% Areia	100	36	27	19
Peso volúmico seco	γ_d (kN/m ³)	16,86	9,85	---	14,56
Teor em água natural	w (%)	-	-	80,9	80,9
Densidade das partículas sólidas	G	2,68	2,77	2,60	2,55
Teor em matéria orgânica	OM (%)	0	2,1	10,3	9,3
Limites de consistência	w _P (%)	-	42	48,8	71
	w _L (%)	-	44	72,0	43
Classificação unificada (ASTM D 2487, 1998)		SP	ML	OH	OH

Quadro 2 – Principais propriedades químicas dos ligantes (Teles, 2013; Custódio, 2013).

Ligante	Símbolo	CaO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Sup. espec. (m ² /kg)
Cimento Portland CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 R	62,84	19,24	4,93	349,0
Escória granulada de alto-forno	Esc	37,02	38,74	11,59	363,0

2.3 – Características das fibras

No Quadro 3 apresentam-se as principais características das fibras utilizadas no presente trabalho, as quais são ilustradas na Figura 1. As fibras de polipropileno (Pp) (Fig. 1a) possuem 12 mm de comprimento, 32 μ m de diâmetro, grande flexibilidade, superfície específica elevada (134 m²/kg), uma densidade de 905kg/m³, resistência à tração de 250 N/mm² e um módulo de elasticidade

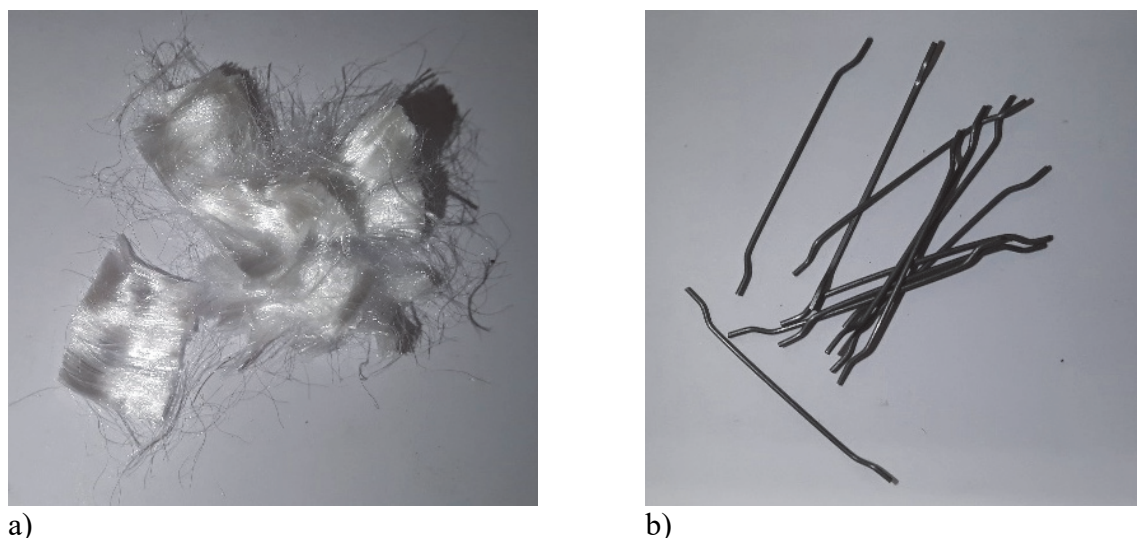


Fig. 1 – Tipos de fibras. a) fibras de polipropileno; b) fibras metálicas.

Quadro 3 – Principais propriedades das fibras (dados do fabricante).

Material	L (mm)	Diâmetro (mm)	Densidade (kg/m ³)	Rt (N/mm ²)	E (N/mm ²)
Aço (Met)	30	0,55	7800	1345	200x10 ³
Polipropileno (Pp)	12	0,032	905	250	3500-3900

L – comprimento; Rt – resistência à tração; E – módulo de elasticidade

entre 3500 a 3900 N/mm². As fibras metálicas (Met) possuem extremidades em gancho (Fig. 1b) para promover uma ancoragem eficaz, têm 30 mm de comprimento, diâmetro de 0,55 mm, resistência à tração superior a 1345 N/mm² e um módulo de elasticidade de 200x10³ N/mm².

2.4 – Preparação e ensaio dos provetes

O presente trabalho foi realizado com amostras reconstituídas, as quais permitem reduzir a heterogeneidade e variabilidade inerente à utilização dos solos naturais, sem alterar a composição mineralógica e granulométrica. As amostras dos solos estabilizados com ou sem a inclusão de fibras foram preparadas com base nos procedimentos definidos pelo EuroSoilStab (2001) e Correia (2011). Assim, o procedimento utilizado na preparação dos provetes compreendeu as seguintes fases:

- (i) A quantidade de ligante para perfazer a dosagem requerida foi misturada com os diferentes tipos de solos, com uma quantidade específica de água destilada de modo a produzir uma calda homogênea.
- (ii) A mistura solo-calda foi realizada por uma misturadora mecânica, com uma velocidade de 142 rpm durante 4 min.
- (iii) No caso dos provetes reforçados com fibras, a quantidade necessária de fibras foi cuidadosamente adicionada durante o processo de mistura mecânica (solo-calda-fibras).
- (iv) A pasta homogênea resultante foi introduzida e compactada diretamente no interior de um molde cilíndrico de PVC, em três camadas. Nos provetes de solo reforçado com fibras de polipropileno foram utilizados moldes com 70 mm de diâmetro, tendo-se utilizado nos provetes de solo reforçado com fibras metálicas provetes com diâmetro de 100 mm. Os moldes possuem uma relação comprimento/diâmetro (L/D) de 2 no caso de ensaios UCS monotónicos e cíclicos, e de 1 no caso de ensaios de compressão diametral (CD).
- (v) Cada camada é ligeiramente compactada manualmente, sujeita a vibrações pela aplicação de uma placa de aço junto à superfície interior do molde e compactada com 100kPa durante 10 segundos.
- (vi) A superfície de cada camada foi ligeiramente escarificada antes da introdução da camada seguinte.
- (vii) As amostras foram armazenadas durante 28 dias dentro de uma câmara com controlo de temperatura (20±2°C) e humidade (95±5%).
- (viii) Após o tempo de cura, as amostras foram colocadas no pedestal de uma prensa universal ou prensa cíclica, tendo os dispositivos eletrónicos de leitura (célula de carga e transdutor de deslocamento) sido calibrados e ajustados.
- (ix) Finalmente, os ensaios foram efetuados com aquisição automática de dados.

Os ensaios monotónicos (UCS e CD) foram realizados com uma máquina de ensaios universal (Wykeham Farrance Tristar 5000kg). Em consonância com a norma BS 1377-7 (1990) os ensaios UCS foram realizados para uma velocidade de deformação constante de 0,25%/min para os solos A, B e C e de 1%/min no caso do solo D.

Os ensaios cíclicos de compressão não confinada foram realizados com uma prensa dinâmica (Servosis ME-402/20), para um nível de tensão de desvio de 55% da tensão de rotura (q_{u-max}), a qual foi previamente definida em ensaios monotónicos UCS. No caso solos A, B e C, foi imposta uma

excitação sinusoidal de 0,25 Hz com uma amplitude ($q_{\max}-q_{\min}$) de $\pm 7,5\% \times q_{u-\max}$ até 3000 ciclos de carga. Os ensaios cíclicos do solo D foram efetuados para uma excitação sinusoidal de 0,5 Hz, uma amplitude ($q_{\max}-q_{\min}$) de $\pm 7\% \times q_{u-\max}$, para 625, 1250, 2500, 5000 e 10000 ciclos de carga. Estas condições garantem um fator de segurança mínimo de 1,6 ($q_u / [(0,55+0,075) \times q_{u-\max}]$). Após a fase cíclica, os provetes foram submetidos a ensaios monotónicos UCS para analisar as repercussões da fase cíclica nas propriedades mecânicas.

A generalidade dos ensaios foi repetida pelo menos duas vezes para assegurar a fiabilidade da metodologia e a qualidade dos resultados obtidos (Quadro 4).

2.5 – Plano de ensaios

No Quadro 4 apresenta-se o plano de ensaios, composto por 2 séries. A primeira série envolve ensaios monotónicos de compressão não confinada (UCS) e de compressão diametral (CD) com utilização exclusiva do Solo D, e que visam estudar o efeito do tipo de fibra (metálica/polipropileno) e a dosagem de ligante (125 e 375 kg/m³). A segunda série visa estudar as repercussões da aplicação de solitação cíclica no comportamento dos solos A, B, C e D estabilizados sem fibras, quando reforçados com fibras de polipropileno (solos A, B e C) e fibras metálicas (Solo D). Os ensaios cíclicos realizados com o solo D visam fundamentalmente analisar o efeito da variação do número de ciclos no comportamento pós-cíclico.

Quadro 4 – Plano de ensaios (baseado em Cajada, 2017; Venda Oliveira et al., 2016, 2018; Teles 2013; Custódio, 2013)

Solo	Ligante		Fibras		Nº de ensaios			
	Tipo	D(kg/m³)	Tipo	D(kg/m³)	UCS	CD	Cíclicos	UCS _{pc}
A	CEM I 42,5 R	175	--	--	2	--	2	2
B			Pp	10	2	--	2	2
			--	--	2	--	2	2
			Pp	10	2	--	2	2
			--	--	2	--	2	2
C			Pp	10	2	--	2	2
D	CEM I 42,5 R (75%) + Esc(25%)	125	--	--	2	2	--	--
			Pp	50	2	2	--	--
			Met	50	2	2	--	--
		375	--	--	2	2	--	--
			Pp	50	2	2	--	--
			Met	50	2	2	5 ^(*)	5 ^(*)

D – dosagem; Esc – escória granulada de alto-forno; CD – Ensaio de compressão diametral;

UCS_{pc} – ensaio UCS após a fase cíclica;

(*) ensaios realizados com diferente número de ciclos (625, 1250, 2500, 5000 e 10000).

3 – ENSAIOS MONOTÓNICOS (SOLO D) - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

3.1 – Comportamento tensão-deformação

A influência do reforço e do tipo de fibra utilizada no comportamento tensão-deformação do solo D estabilizado é ilustrado na Figura 2 para os ensaios UCS e CD. Os resultados mostram que a adição de fibras sintéticas (polipropileno) e metálicas ao solo estabilizado origina a alteração de comportamento do material estabilizado (não reforçado), de frágil, com perda total e brusca da resistência pós-pico, para um material de maior ductilidade, com menor perda de resistência pós-

pico, exibindo uma resistência residual não negligenciável que advém da mobilização da resistência à tração das fibras com o aumento da deformação. Na Figura 2 também se observa que a utilização de fibras de Pp é mais eficaz na diminuição da fragilidade que a utilização de fibras metálicas. De facto, a inclusão de fibras metálicas no solo estabilizado induz uma perda parcial de resistência pós-pico, enquanto a generalidade dos provetes reforçados com fibras de Pp exhibe um comportamento claramente dúctil, traduzido por inexistência de diminuição de resistência pós-pico. Este comportamento é coerente com observado por outros autores, nomeadamente no que se refere ao aumento da ductilidade com a utilização de fibras Pp (Consoli et al., 2009; Olgun 2013; Correia et al., 2015), e perda parcial de resistência pós-pico com a utilização de fibras metálicas, tanto em solos estabilizados (Sukontasukkul e Jamsawang 2012) como em betão (Kaïkea et al., 2014; Khaloo et al., 2014).

Na Figura 2 também se constata que o efeito do reforço com fibras no comportamento tensão-deformação depende fortemente da dosagem de ligante utilizado na estabilização química. De facto,

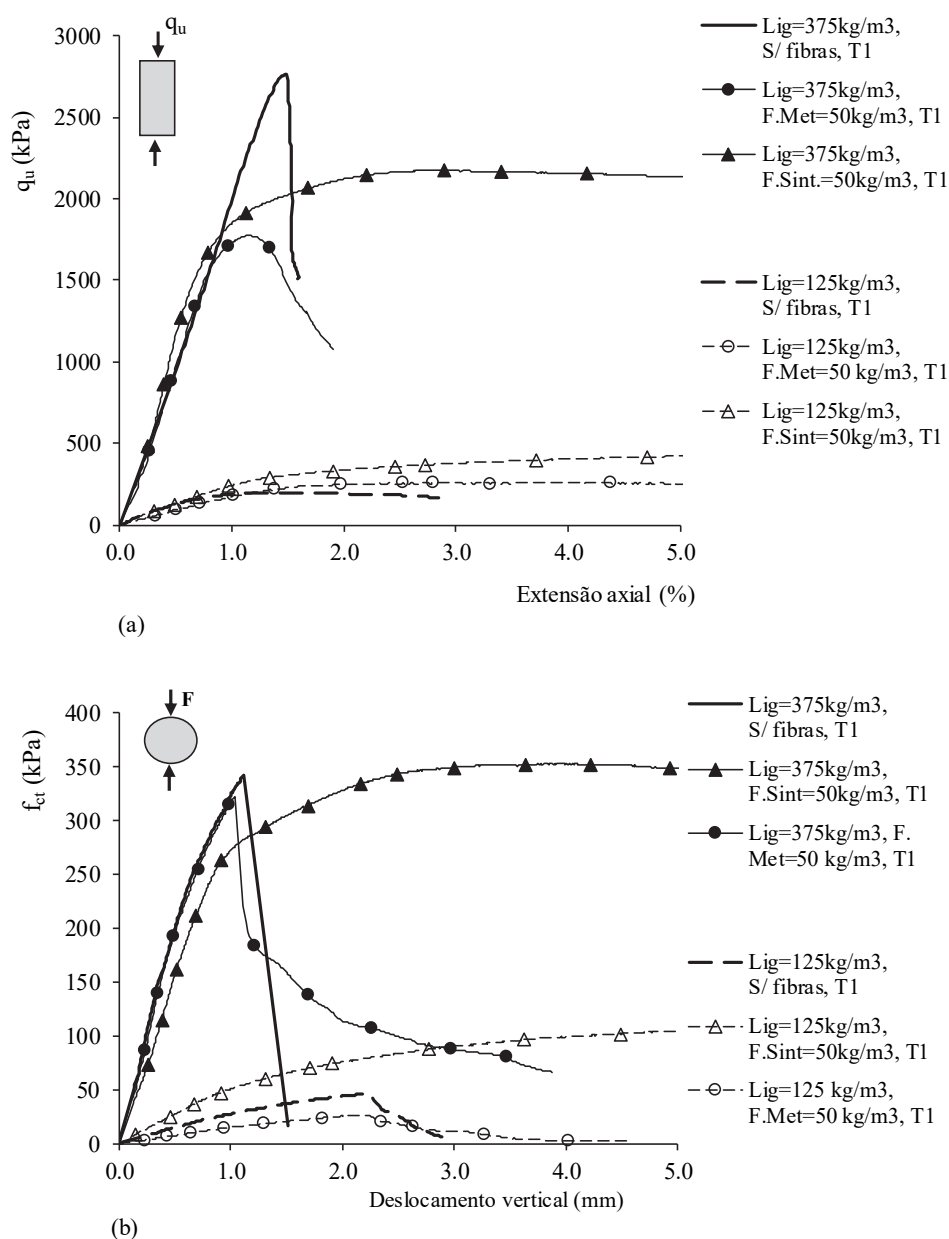


Fig. 2 – Comportamento tensão-deformação do solo D estabilizado com ligante, reforçado e não reforçado com fibras. a) Ensaio UCS; b) Ensaio de compressão diametral (CD) (baseado em Teles, 2013; Custódio, 2013).

o aumento da dosagem de ligante de 125 para 375 kg/m³, além de naturalmente originar um aumento significativo da resistência e rigidez, também tende a amplificar os efeitos anteriormente mencionados, ou seja, o comportamento frágil do solo estabilizado não reforçado e a perda parcial de resistência pós-pico registada nos provetes reforçados com fibras metálicas. A maior perda de resistência pós-pico associada à utilização de fibras metálicas é, provavelmente, devida ao reduzido número de fibras metálicas que potencialmente atravessam a superfície de rotura, as quais são incapazes de suportar a carga aplicada após a quebra das ligações cimentícias. Com a utilização de fibras de Pp, a perda de resistência é significativamente menor, uma vez que, para a mesma dosagem de fibras (dado que o peso unitário das fibras Pp é menor), o número de fibras Pp que potencialmente atravessam a superfície de rotura é significativamente maior do que com as fibras metálicas, pelo que existe a mobilização de um elevado número de fibras para suportarem parte da carga aplicada, o que se reflete na mobilização de uma resistência residual não desprezável.

A variação da fragilidade (ou ductilidade) pode ser analisada pelo índice de fragilidade (I_B) (Venda Oliveira et al., 2016), definido pelas equações:

$$I_B = 1 - \frac{q(\varepsilon/\varepsilon_f=2)}{q_u} \quad [\text{Resistência à compressão}] \quad (1)$$

$$I_B = 1 - \frac{f(\varepsilon/\varepsilon_f=2)}{f_{ct}} \quad [\text{Resistência à tração}] \quad (2)$$

sendo q_u a resistência à compressão não confinada e f_{ct} a resistência à tração, e $q(\varepsilon/\varepsilon_f=2)$ e $f(\varepsilon/\varepsilon_f=2)$ representam, respetivamente, a resistência à compressão e à tração para uma deformação dupla da deformação correspondente à rotura (ε_f). I_B igual a um corresponde a um comportamento completamente frágil, ou seja, com perda total de resistência pós-pico. Por outro lado, quando I_B diminui para zero, o comportamento torna-se cada vez mais dúctil, ou seja, a fragilidade diminui. A Figura 3 ilustra a variação do índice de fragilidade, com e sem adição de fibras, para os ensaios UCS e CD. Os resultados corroboram a análise anterior (Figura 2) em termos de comportamento tensão-deformação, ou seja, a inclusão de ambos os tipos de fibras diminui a fragilidade (I_B diminui) em relação ao material não reforçado, embora o efeito seja muito mais significativo com a adição de fibras Pp, com uma alteração drástica do comportamento do material composto, de frágil para dúctil, com uma forte redução de I_B .

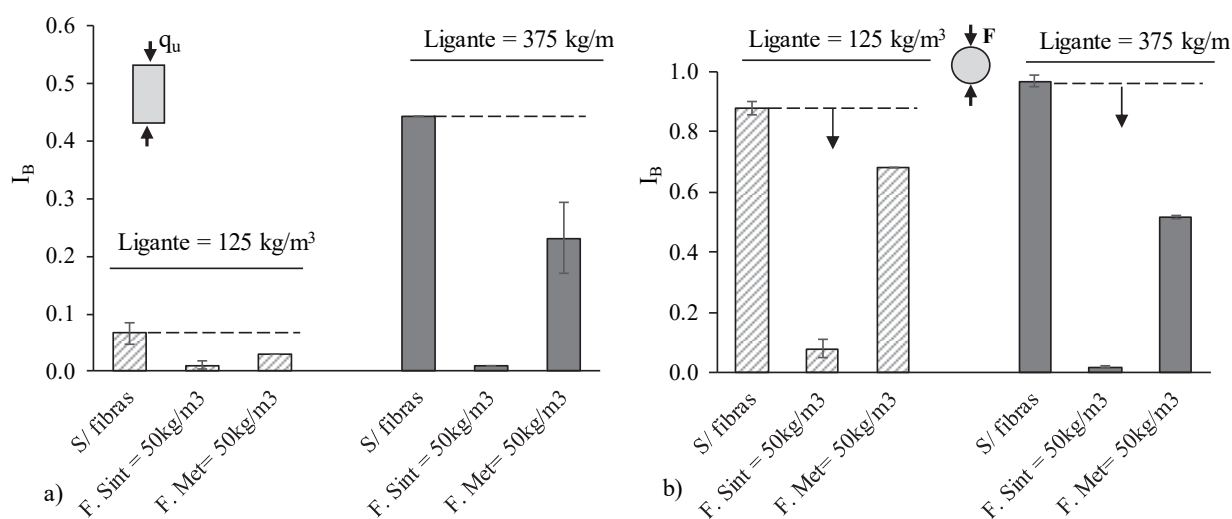


Fig. 3 – Índice de fragilidade do solo D estabilizado com ligante, reforçado e não reforçado com fibras. a) fibras de polipropileno (12 mm); b) fibras metálicas.

3.2 – Características mecânicas

A Figura 4 ilustra o efeito do tipo de fibra utilizado como reforço na resistência à compressão não confinada (q_u) e no módulo de Young correspondente a 50% da resistência de pico (E_{u50}). Em linha com o observado na Figura 2, esta figura realça o efeito da dosagem de ligante e do tipo de fibra nas propriedades mecânicas do material compósito. Assim, constata-se que para uma reduzida dosagem de ligante (125 kg/m^3) a inclusão de ambos os tipos de fibras origina um ligeiro aumento da resistência à compressão (tendo as fibras de Pp um maior impacto). Com o aumento da dosagem de ligante para 375 kg/m^3 a adição de ambos os tipos de fibras passa a ter um efeito contraproducente em termos de resistência à compressão não confinada, induzindo uma diminuição de resistência em relação aos provetes não reforçados, a qual é superior para a inclusão de fibras metálicas. Em termos de E_{u50} (Fig. 4b) o impacto da adição de fibras é pouco expressivo, uma vez que a rigidez é fundamentalmente controlada pela matriz cimentícia, registando-se um efeito ligeiramente negativo da presença de fibras para a menor dosagem de ligante e um efeito moderadamente positivo para teores em ligante de 375 kg/m^3 .

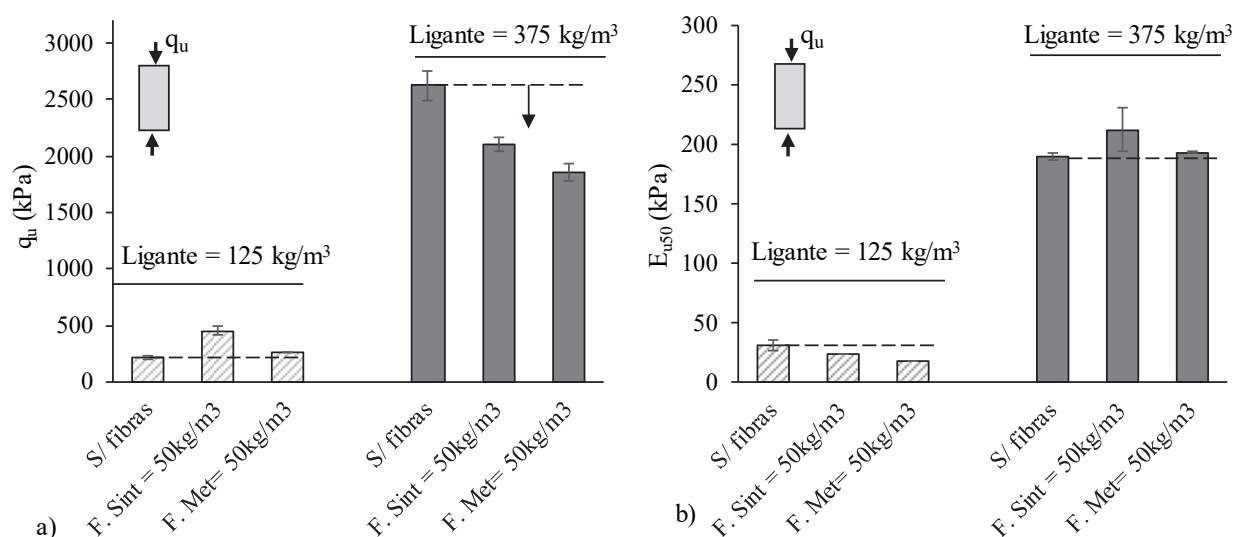


Fig. 4 – Resultados de ensaios UCS do solo D estabilizado com ligante, reforçado e não reforçado com fibras. a) q_u ; b) E_{u50} (baseado em Teles, 2013; Custódio, 2013).

O efeito da dosagem de ligante e do tipo de fibra na resistência à tração obtida em ensaios de compressão diametral (CD), apresentado na Figura 5, permite constatar que independentemente da dosagem de ligante a inclusão de fibras de Pp na mistura solo-ligante origina um aumento de resistência à tração em relação ao solo não reforçado, enquanto que a inclusão de fibras metálicas origina um efeito ligeiramente negativo.

Em geral, os resultados parecem indicar que o efeito do tipo de fibra sobre a resistência à compressão e tração depende da associação cumulativa de dois fatores com efeitos opostos: *i*) por um lado, a redução do número de ligações cimentícias induzida pela adição de fibras tende a diminuir a resistência do material compósito; *ii*) e por outro lado, o grau de mobilização da resistência à tração das fibras depende do nível de deformação e do mecanismo de rotura imposto, o qual varia com o tipo de ensaio (UCS e CD). Assim, para elevadas dosagens de ligante, o mecanismo de rotura imposto no ensaio UCS não permite a mobilização efetiva da resistência à tração das fibras, pelo que a redução das ligações cimentícias inerente à adição de fibras não é totalmente "compensada" pela mobilização da resistência à tração das fibras; assim o efeito da inclusão de fibras é negativo. Contudo, tal não acontece na estabilização com 125 kg/m^3 de ligante, dado que esta dosagem não é suficiente para promover um fortalecimento efetivo da matriz cimentícia, pelo que a rotura ocorre

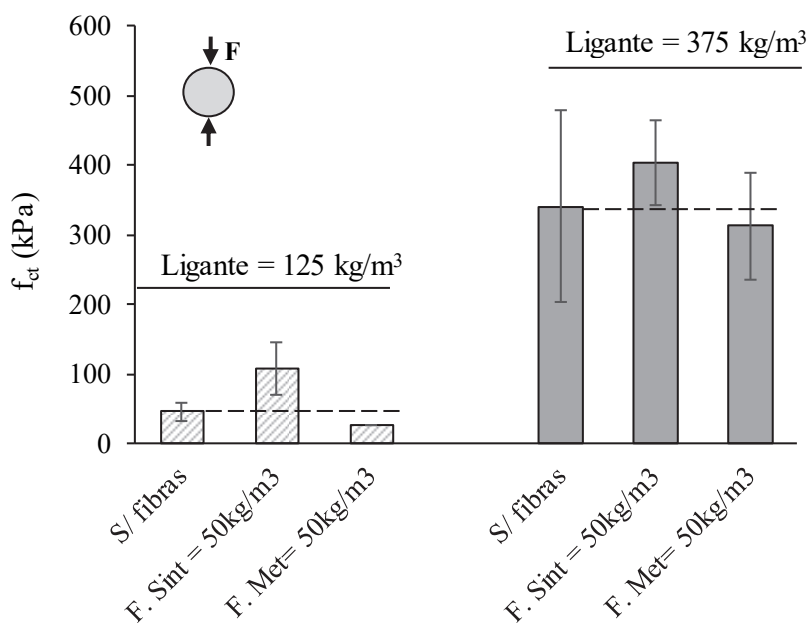


Fig. 5 – Resistência à tração (f_{ct}) obtida em ensaios CD com o solo D estabilizado com ligante, reforçado e não reforçado com fibras (baseado em Teles, 2013; Custódio, 2013).

para níveis de deformação elevados (Fig. 2a) que permitem a efetiva mobilização da resistência à tração das fibras, com o consequente aumento de resistência. Por outro lado, o mecanismo de rotura imposto no ensaio CD origina uma fissura vertical no provete que se propaga do topo até à base, induzindo diferentes níveis de deformação ao longo desta superfície. Assim, a resistência à tração das fibras localizadas junto ao topo do provete é mobilizada imediatamente após o início do ensaio, levando a que o efeito da adição de fibras não seja fortemente condicionado pela rigidez do esqueleto sólido. O menor desempenho das fibras metálicas em relação às fibras de Pp deve-se, provavelmente, à existência de uma menor quantidade de fibras na superfície de rotura (para um teor constante de fibras), pelo que nestas tendem a concentrar-se elevados níveis de tensão de tração, que podem originar a sua rotura ou o arrancamento por deficiente ancoragem.

3.3 – Relação entre a resistência à compressão e à tração

A Figura 6 ilustra o efeito do tipo de fibra e da dosagem de ligante na relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão, f_{ct}/q_u . Com o aumento da dosagem de ligante de 125 para 375 kg/m^3 constata-se a diminuição da relação f_{ct}/q_u no solo não reforçado (de 0,22 para 0,13) e no solo reforçado com a inclusão de fibras de Pp (de 0,24 para 0,19). Com a adição de fibras metálicas observa-se o oposto (aumento de 0,10 para 0,17). Nos provetes estabilizados com maior dosagem de ligante (375 kg/m^3) e independentemente do tipo de fibra utilizada no reforço, observa-se que o reforço com ambos os tipos de fibras origina o aumento da relação f_{ct}/q_u em relação ao solo não reforçado, ou seja, quando o nível de cimentação é mais elevado o impacto do reforço na resistência à tração tende a ser mais significativo.

Os resultados da Figura 6 também mostram que, independentemente do teor em ligante utilizado, a adição de fibras de Pp em relação às fibras metálicas promove uma mobilização mais eficaz da resistência à tração, o que repercute em maiores valores da relação f_{ct}/q_u .

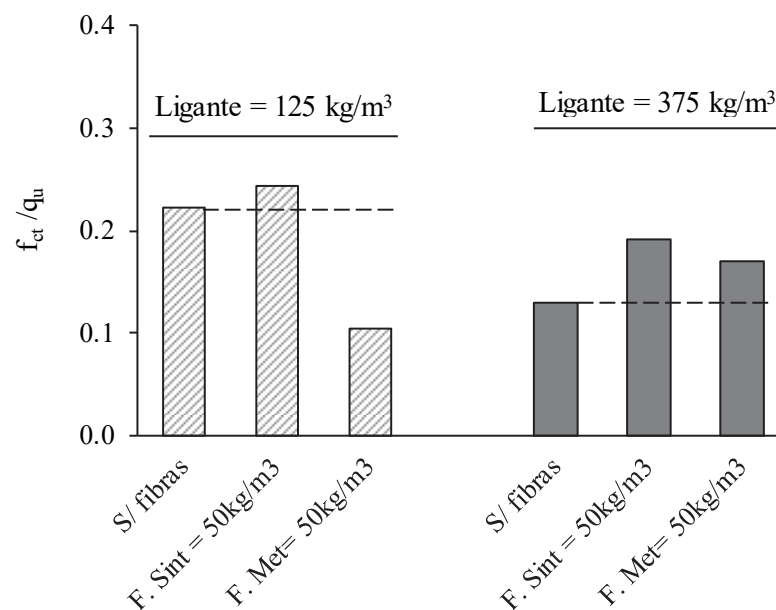


Fig. 6 – Relação f_{ct}/q_u com o solo D estabilizado, reforçado e não reforçado com fibras.

4 – ENSAIOS CÍCLICOS - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1 – Efeito da variação do número de ciclos – Solo D

Na Figura 7 apresenta-se a evolução das deformações axiais permanentes ($\epsilon_{ax-perm}$) com o número de ciclos de carga obtida em ensaios cíclicos realizados com o solo D estabilizado e reforçado com fibras metálicas. Apesar da elevada dispersão observada, os resultados médios revelam um aumento claro e significativo de $\epsilon_{ax-perm}$ até cerca de 2500 ciclos, tendendo a estabilizar para um número de ciclos superior a 5000. Este comportamento está em linha com o obtido por Dall'Aqua et al. (2010) com uma argila estabilizada reforçada com fibras de polipropileno. O aumento de $\epsilon_{ax-perm}$ com o número de ciclos é devido à rotura local de algumas ligações cimentícias, com a consequente transferência de tensões para as fibras metálicas, que, devido à sua elevada

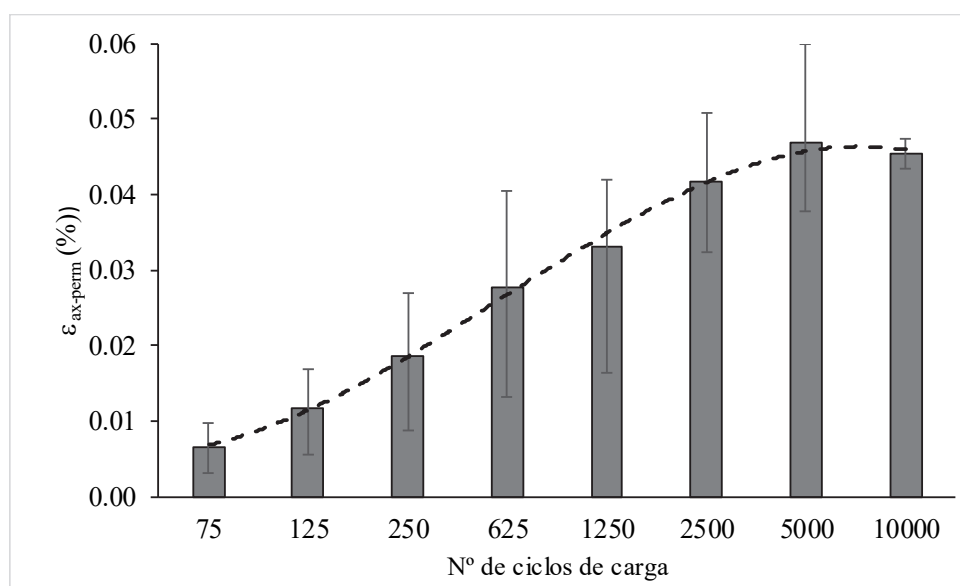


Fig. 7 – Ensaio UCS cíclicos do solo D estabilizado e reforçado com fibras metálicas. Evolução das deformações plásticas com o nº de ciclos (baseado em Venda Oliveira et al., 2017).

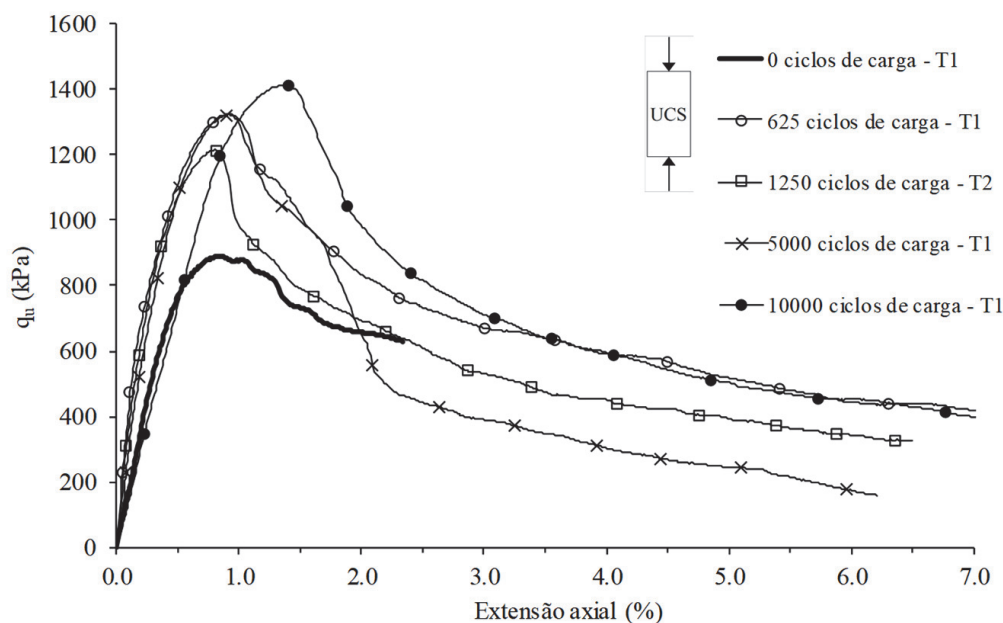


Fig. 8 – Ensaio UCS pós-cíclicos do solo D estabilizado e reforçado com fibras metálicas. Comportamento tensão-deformação (baseado em Venda Oliveira et al., 2017).

rigidez axial, são mobilizadas para baixos níveis de deformação. Para além dos 5000 ciclos, os resultados sugerem que as cargas cíclicas são fundamentalmente suportadas pelas fibras, que se encontram a funcionar em regime elástico, pelo que as $\varepsilon_{ax-perm}$ mantêm-se constantes.

O efeito do número de ciclos de carga sobre o comportamento tensão-deformação obtido em ensaios UCS, ilustrado na Figura 8, permite constatar o aumento da resistência de pico do material compósito com o incremento do número de ciclos de carga em comparação com o ensaio monotónico (0 ciclos). Todavia, o impacto do número de ciclos de carga na resistência pós-pico é mais reduzido, observando-se uma tendência semelhante à obtida no ensaio monotónico. Estes resultados resultam do facto de se ter utilizado o mesmo teor de fibras em todos os provetes, estando a resistência residual conectada com a mobilização da resistência à tração nas fibras para níveis de deformação elevados. A evolução da resistência à compressão não confinada (q_u) com o número de

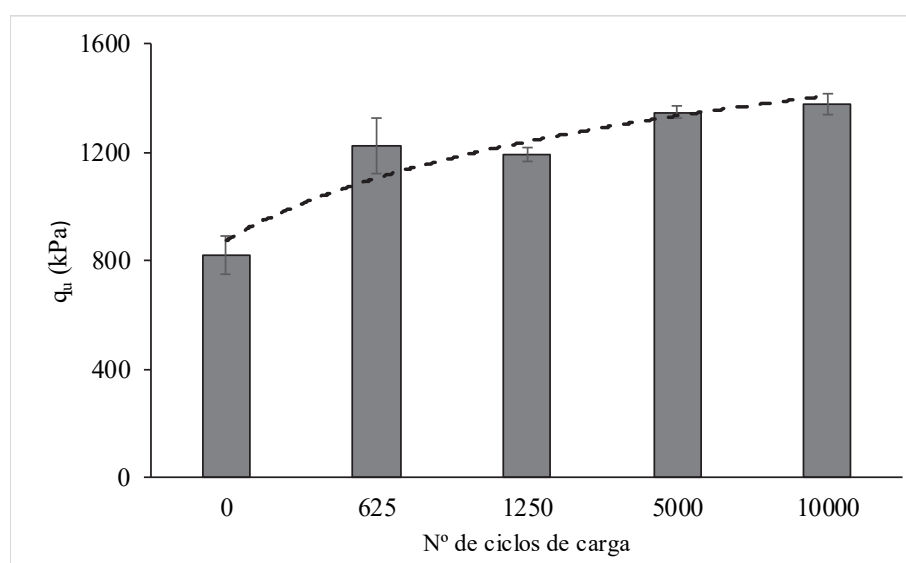


Fig. 9 – Ensaio UCS pós-cíclicos do solo D estabilizado e reforçado com fibras metálicas. Evolução de q_u com o nº de ciclos (baseado em Venda Oliveira et al., 2017)

ciclos (Figura 9) revela uma tendência de aumento de q_u com o número de ciclos de carga, parecendo haver estabilização a partir dos 5000 ciclos.

Estes resultados mostram que quando o solo D estabilizado e reforçado com fibras é submetido a cargas cíclicas a sua resistência à compressão tende a aumentar, não refletindo a expectável quebra de ligações cimentícias e o consequente decréscimo de resistência promovido pela ação cíclica. Estes resultados parecem indicar que a quebra de algumas ligações durante a fase cíclica (confirmada pelo aumento do $\varepsilon_{ax-perm}$) é suficiente para mobilizar a resistência à tração das fibras metálicas (com elevada rigidez axial), que, por sua vez, absorvem e redistribuem as tensões internas do material compósito. De facto, os resultados indiciam que o efeito da mobilização da resistência à tração das fibras compensa largamente a degradação do esqueleto sólido, o que justifica o aumento da resistência à compressão observado nas Figuras 8 e 9.

4.2 – Efeito do tipo de solo

4.2.1 – Comportamento cíclico – Deformações permanentes

Na Figura 10 apresenta-se a evolução da deformação axial permanente acumulada ($\varepsilon_{ax-perm}$) com o número de ciclos de carga para os solos A, B e C não reforçados e reforçados com uma dosagem de fibras de polipropileno de 10 kg/m³. Em consonância com o observado na bibliografia (Kahttak e Alrashidi, 2006; Venda Oliveira et al., 2017), os resultados mostram um aumento acentuado de $\varepsilon_{ax-perm}$ no início da fase cíclica, seguido de uma diminuição da velocidade de deformação com o evoluir do número de ciclos de carga.

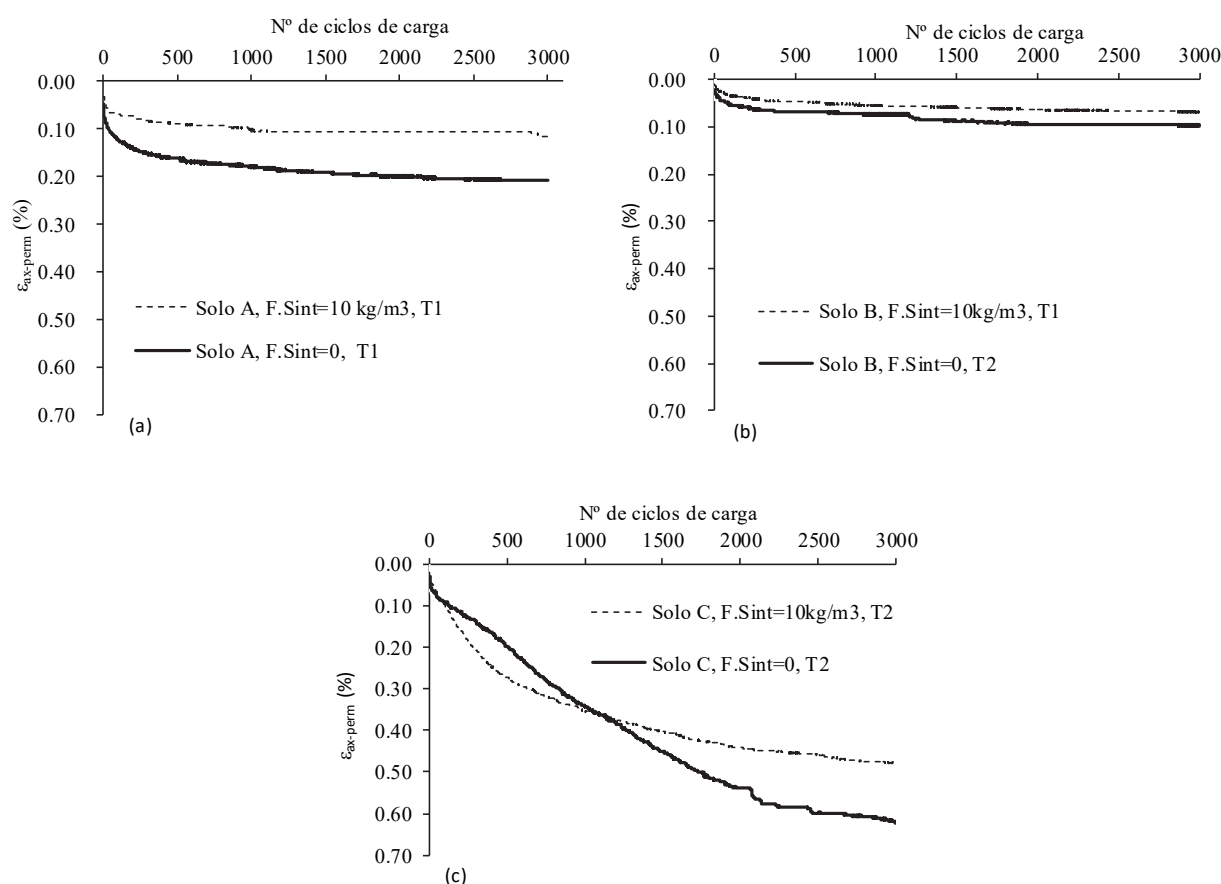


Fig. 10 – Ensaios UCS cíclicos dos solos A, B e C estabilizados e reforçados com fibras de polipropileno. Evolução das deformações axiais permanentes com o nº de ciclos (baseado em Cajada, 2017).

Independentemente do tipo de solo, os resultados evidenciam um efeito positivo do reforço do material compósito com fibras, traduzido pela diminuição de $\varepsilon_{ax-perm}$. No caso do solo C este efeito é observado quando o número de ciclos de carga é superior a 1000.

De facto, para um número elevado de ciclos de carga, o nível de deformação imposto é suficiente para mobilizar a resistência à tração das fibras, sendo a carga aplicada parcialmente suportada pelas fibras, atenuando a expectável desestruturação do esqueleto sólido. Curiosamente, o solo C, mais deformável, mostra no início da fase cíclica um impacto ligeiramente negativo da inclusão das fibras, ou seja, para um número reduzido de ciclos a perda das ligações de cimentação devido à presença das fibras não é totalmente compensada pela mobilização da resistência à tração das fibras. Para os solos com um esqueleto sólido mais rígido (solos A e B), a mobilização da resistência à tração das fibras tende a ser mais precoce, provavelmente, em consequência de uma ancoragem mais eficaz das fibras.

Comparando as $\varepsilon_{ax-perm}$ dos solos A, B e C (Figura 11) para 3000 ciclos de carga, constata-se que o solo C apresenta um aumento mais significativo de $\varepsilon_{ax-perm}$, refletindo o efeito negativo do elevado teor de matéria orgânica (associado à elevada plasticidade), induzindo $\varepsilon_{ax-perm}$ muito mais elevadas. Como referido anteriormente, a presença de fibras contribui para mitigar as $\varepsilon_{ax-perm}$, independentemente do tipo de solo analisado (Figura 11), sendo este efeito mais significativo no solo mais deformável (solo C).

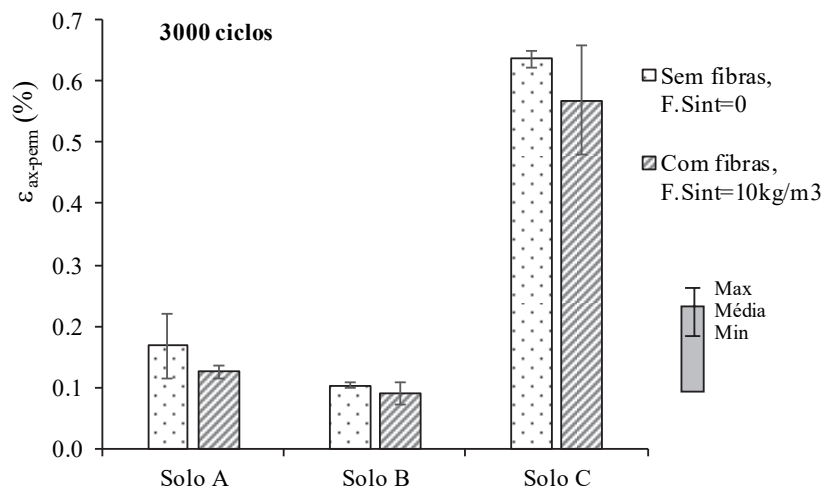


Fig. 11 – Deformações axiais permanentes acumuladas obtidas após 3000 ciclos em ensaios UCS cíclicos dos solos A, B e C estabilizados e reforçados com fibras de polipropileno.

4.2.2 – Comportamento tensão-deformação

O efeito do reforço com fibras no comportamento tensão-deformação é ilustrado na Figura 12 para os solos A, B e C. Para os três solos estudados, e independentemente dos provetes terem ou não sido submetidos a carregamento cíclico, constata-se que a inclusão de 10 kg/m³ de fibras de polipropileno altera o comportamento de frágil (solos estabilizados não reforçados) com drástica diminuição das resistência pós-pico, para um comportamento mais dúctil (solos estabilizados reforçados com fibras) com mobilização de resistência residual significativa. Estes resultados encontram-se em linha com os resultados apresentados na seção 3.1 e na literatura (Correia et al., 2015; Venda Oliveira et al., 2016; Olgun, 2013).

Em linha com os resultados apresentados na Figura 8 (solo D), a Figura 12 também revela uma melhoria das características mecânicas dos solos estabilizados após carregamento cíclico, induzindo um aumento de resistência e rigidez, não refletindo a expectável quebra de algumas ligações cimentícias e a consequente deterioração das propriedades mecânicas.

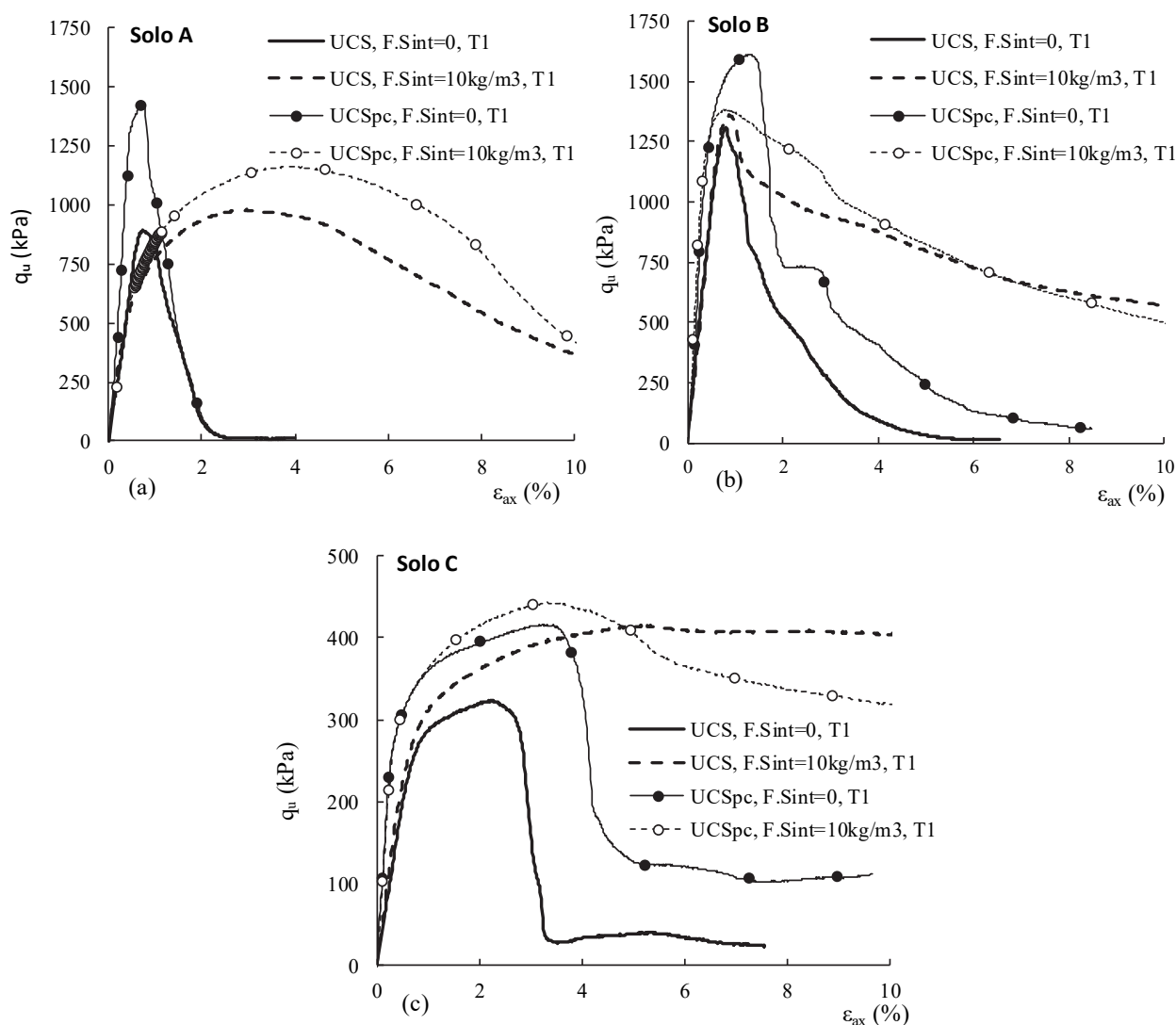


Fig. 12 – Ensaio UCS pós-cíclicos dos solos A, B e C estabilizados e reforçados com fibras de polipropileno. Comportamento tensão-deformação (baseado em Cajada, 2017).

A Figura 13 ilustra o efeito do carregamento cíclico e do reforço com fibras de polipropileno no índice de fragilidade, I_B , nos três solos estudados. Embora com alguma dispersão, os valores do I_B

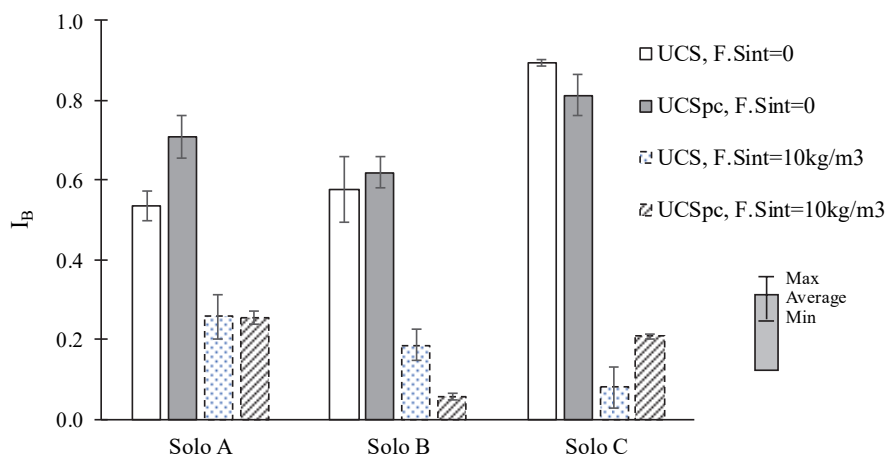


Fig. 13 – Ensaio UCS pós-cíclicos dos solos A, B e C estabilizados e reforçados com fibras de polipropileno. Índice de fragilidade.

estão em linha com o comportamento tensão-deformação, nomeadamente, o aumento da ductilidade (correspondente à redução de I_B) com a inclusão das fibras. O efeito da fase cíclica sobre I_B varia com o tipo de solo e se o mesmo está ou não reforçado com fibras. Assim, enquanto nos solos “sem” matéria orgânica (solos A e B) e não reforçados a fase cíclica aumenta ligeiramente o valor do I_B (a fragilidade aumenta), no solo orgânico (solo C) promove uma ligeira diminuição deste, ou seja, a ductilidade tende a aumentar. Inexplicavelmente, a tendência inverte-se quando os solos são reforçados com fibras de polipropileno.

4.2.3 – Características mecânicas

A Figura 14 enfatiza as repercussões da fase cíclica e do reforço com fibras de polipropileno nas características mecânicas, em termos de resistência à compressão não confinada (q_u) e módulo de Young definido para 50% da resistência de pico (E_{u50}). Os resultados de ensaios monotónicos sem fase cíclica com os solos A, B e C mostram que a inclusão de 10 kg/m³ de fibras de polipropileno nos solos promove o aumento de q_u (Fig. 14a) e de E_{u50} (Fig. 14b), o que concorda com os resultados de outros trabalhos realizados com baixo teor de fibras e ligantes (Olgun, 2013; Kaniraj e Havanji, 2001; Tang et al., 2007; Estabragh et al., 2012). Em linha com o observado na Figura 4, estes resultados indicam que o reforço das fibras tende a ter um efeito positivo para solos estabilizados com reduzida dosagem de ligante (175 kg/m³ no presente caso), sendo menos eficaz, ou mesmo ter um efeito negativo, com maior nível de cimentação.

Em linha com o observado e discutido na seção 3.2, estes resultados indiciam que o efeito do reforço com fibras resulta da combinação de dois efeitos opostos: a presença de fibras na matriz restringe o desenvolvimento de algumas ligações cimentícias entre as partículas do solo e, por outro lado, a mobilização da resistência à tração das fibras dependente do nível de deformação imposto. Assim, um material rígido exibe uma reduzida deformação na rotura, a qual é insuficiente para a mobilização total da resistência à tração das fibras, pelo que as ligações cimentícias que não se estabelecem devido à presença de fibras não são totalmente compensadas pelo incremento de resistência induzido pela mobilização da resistência à tração das fibras, consequentemente, a presença de fibras tem um efeito prejudicial na resistência do material compósito. Por outro lado, um material com um reduzido nível de cimentação atinge o pico para deformações mais elevadas, compatíveis com a mobilização da resistência à tração das fibras, consequentemente, a mobilização da resistência à tração das fibras é suficiente para compensar a perda de resistência devido à diminuição das ligações cimentícias sendo, por conseguinte, o efeito das fibras positivo.

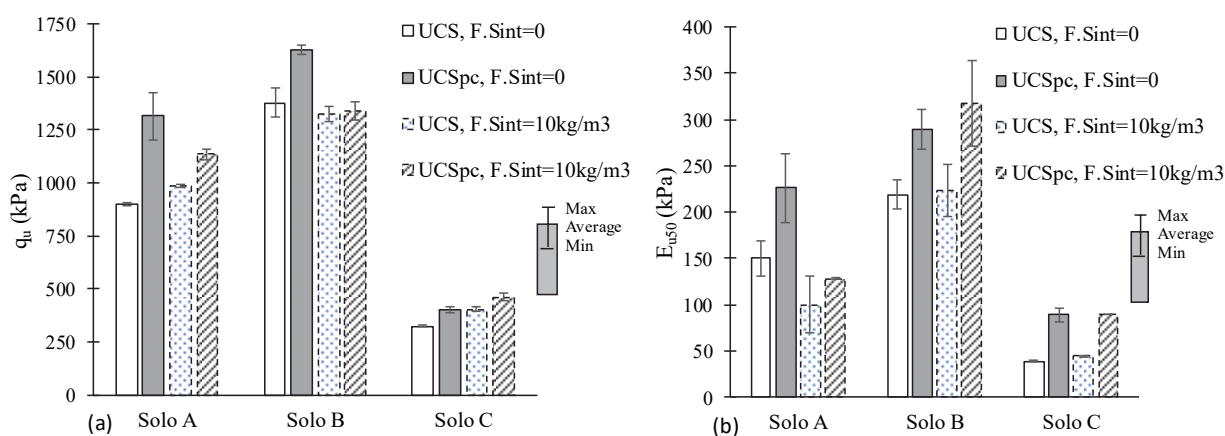


Fig. 14 – Resultados de ensaios UCS monotónicos e pós-cíclicos dos solos A, B e C estabilizados e reforçados com fibras de polipropileno: a) q_u ; b) E_{u50} (baseado em Cajada, 2017).

Em geral e surpreendentemente, os resultados mostram que o benefício do carregamento cíclico é superior em solos não reforçados que em solos reforçados com fibras, sendo mais significativo para E_{u50} do que para q_u . Comparando os três solos, constata-se que o solo arenoso é aquele em que o efeito da aplicação de carregamento cíclico é mais expressivo, independentemente de estar ou não reforçado com fibras.

Nos solos não reforçados o efeito da sollicitação cíclica nas propriedades mecânicas parece estar associado à densificação do esqueleto sólido.

Embora o aumento das características mecânicas induzidas pela fase cíclica corrobore com os resultados de trabalhos de investigação semelhantes com solos reforçados (Festugato et al., 2013; Khattak e Alrashidi, 2006; Venda Oliveira et al., 2017; Maher e Ho, 1993), estes não refletem a deterioração do esqueleto sólido durante a fase cíclica, confirmada pelo aumento das $\varepsilon_{ax-perm}$ com o número de ciclos de carga (Figura 10). Este comportamento, embora não totalmente expectável, pode ser explicado pela mobilização parcial da resistência à tração das fibras durante a fase cíclica, como consequência do aumento das deformações promovido pela quebra de algumas ligações cimentícias. De facto, os resultados parecem indicar que, após a fase cíclica, o efeito benéfico da mobilização da resistência à tração das fibras é superior ao efeito prejudicial induzido pela deterioração da matriz cimentícia, ou seja, a fase cíclica promove o aumento de q_u e E_{u50} .

5 – CONCLUSÕES

O presente trabalho pretende dar uma contribuição para o conhecimento sobre o comportamento à compressão e à tração de solos estabilizados e reforçados com fibras metálicas e de polipropileno, quando submetidos a carregamento monotónico ou cíclico.

Considerando os resultados dos ensaios de compressão não confinada (UCS) e ensaios de compressão diametral (CD) realizados com um solo mole (solo D) estabilizado com 125 e 375 kg/m³ de ligante, num estado não reforçado e reforçado com fibras de polipropileno e metálicas, podem-se elencar as seguintes observações e conclusões:

- i) A inclusão de fibras metálicas e de polipropileno no material compósito aumenta a ductilidade do comportamento tensão-deformação, induzindo a diminuição do índice de fragilidade (I_B) e uma menor perda de resistência pós-pico.
- ii) O efeito da inclusão de fibras no solo estabilizado depende do tipo de fibra, do nível de deformação imposto por cada tipo de ensaio e do grau de cimentação induzido pela estabilização química. Para baixos níveis de cimentação, a inclusão de fibras no compósito promove o aumento de resistência, enquanto nos solos estabilizados com elevado teor em ligante o efeito de reforço com fibras é pequeno ou mesmo contraproducente, uma vez que o nível de deformação na rotura não é suficiente para a mobilização da resistência à tração das fibras.
- iii) O efeito positivo ou negativo da inclusão de fibras sobre a resistência à compressão e à tração depende da associação cumulativa de dois efeitos opostos, a redução do número de ligações cimentícias induzido pela adição de fibras e a mobilização da resistência à tração das fibras que depende do nível de deformação e do mecanismo de rotura imposto por cada tipo de ensaio. Assim, para elevadas dosagens de ligante, o mecanismo de rotura imposto no ensaio UCS não permite a mobilização efetiva da resistência à tração das fibras, pelo que a redução das ligações cimentícias induzida pela adição de fibras não é totalmente "compensada" pela mobilização da resistência à tração destas, sendo o efeito da inclusão de fibras negativo. Contudo, nos solos estabilizados com menor dosagem de ligante a rotura ocorre para níveis de deformação mais elevados, permitindo uma mais efetiva mobilização da resistência à tração das fibras e o consequente aumento de resistência. Por outro lado, o mecanismo de rotura imposto no ensaio CD origina uma fissura vertical no provete com diferentes níveis de deformação ao longo desta.

Assim, a resistência à tração das fibras localizadas junto ao topo do provete é mobilizada imediatamente após o início do ensaio, pelo que nestes casos a rigidez do esqueleto sólido tem reduzida influência na mobilização das fibras.

- iv) Com o aumento da dosagem de ligante de 125 para 375 kg/m³ constata-se a diminuição da relação f_{ct}/q_u tanto nos provetes não reforçados como nos provetes reforçados com fibras de polipropileno. Independentemente do teor em ligante utilizado, a adição de fibras de Pp em relação às fibras metálicas promove uma mobilização mais eficaz da resistência à tração, o que se repercute em maiores valores da relação f_{ct}/q_u .

Comparando os resultados de ensaios UCS monotónicos com ensaios equivalentes realizados após a aplicação de carregamento cíclico, em diversos solos estabilizados não reforçados e reforçados com fibras de polipropileno e metálicas, pode-se concluir o seguinte:

- i) A evolução da deformação axial permanente acumulada apresenta um aumento acentuado no início da fase cíclica, seguido de uma diminuição da taxa de deformação com o aumento do número de ciclos de carga.
- ii) A resistência pós-pico é independente do número de ciclos de carga aplicado, uma vez que após a rotura o nível de deformação imposto permite a mobilização da resistência à tração das fibras, sendo a resistência residual fundamentalmente condicionada pelo teor em fibras.
- iii) A resistência à compressão não confinada aumenta com o incremento do número de ciclos de carga, nomeadamente durante a aplicação dos primeiros ciclos de carga.
- iv) Independentemente do tipo de solo, o reforço com fibras tem um efeito benéfico sobre o comportamento cíclico dos solos estabilizados, induzindo a diminuição das deformações permanentes acumuladas em relação aos solos não reforçados. Este comportamento deve-se provavelmente à mobilização parcial da resistência à tração das fibras durante a fase cíclica.
- v) O aumento da percentagem de argila e de matéria orgânica tem um efeito negativo sobre o comportamento cíclico, induzindo deformações permanentes acumuladas mais elevadas.
- vi) A fase cíclica induz o aumento das características mecânicas (resistência e rigidez) do material compósito. De facto, a expectável deterioração do esqueleto sólido durante a fase cíclica parece ser parcialmente compensada pela mobilização da resistência à tração das fibras.

6 – AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar os seus agradecimentos à CIMPOR e à BEKAERT pelo fornecimento dos ligantes e das fibras, respetivamente, e às instituições que suportaram financeiramente esta investigação: CIEPQPF (UIDB/00102/2020), FCT (POCI-01-0145-FEDER-028382) e Instituto para a Sustentabilidade e Inovação na Engenharia de Estruturas (ISISE), com a referência UIDB/04029/2020. Os autores também expressam os seus agradecimentos aos investigadores João C. A. Cajada, João M.N.P.C. Teles e Dione G. Custódio, cujo trabalho experimental desenvolvido no âmbito de dissertações de mestrado serviu de base ao presente artigo científico.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahmed, A.; Naggar, M. H. (2018). *Effect of cyclic loading on the compressive strength of soil stabilized with basanite-tire mixtures*. Journal of Material Cycles and Waste Management, 20, nº 1, pp. 525-532.

- Al-Tabbaa, A.; Barker, P.; Evans, C. W. (2009). *Keynote Lecture: Design of deep mixing in infrastructure applications*. International Symposium of Deep Mixing & Admixture Stabilization. Okinawa, Japan.
- ASTM D2487 (1998). *Standard Classification of Soils for Engineering Purposes* (Unified Soil Classification System). West Conshohocken, PA.
- BS 1377-3 (1990): *Methods of test for soils for civil engineering purposes – part 7: Chemical and electro-chemical tests*. BSI, London, UK.
- Cai, Y.; Shi, B.; Ng, C. W. W.; Tang, C. (2006). *Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayed soil*. Engineering Geology, 87, pp. 230-240.
- Cajada, J. C. A. (2017). *Estabilização química de diferentes solos reforçados com fibras de polipropileno*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.
- Chauhan, M. S.; Mittal, S.; Mohanty, B. (2008). *Performance evaluation of silty sand subgrade reinforced with fly ash and fibre*. Geotextiles and Geomembranes, 26, nº 5, pp. 429-435.
- Coelho, P. A. L. F. (2000). *Caracterização geotécnica de solos moles. Estudo experimental do local da Quinta da Foja*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.
- Consoli, N. C.; Vendruscolo M. A.; Fonini, A.; Rosa, F. D. (2009). *Fibre reinforcement effects on sand considering a wide cementation range*. Geotextiles and Geomembranes, 27, nº 3, pp. 196-203.
- Consoli, N. C.; Bassani, M. A. A.; Festugato, L. (2010). *Effect of fibre-reinforcement on the strength of cemented soils*. Geotextiles and Geomembranes, 28, nº 4, pp. 344-351.
- Consoli, N. C.; Zortéa, F.; Souza, M.; Festugato, L. (2011a). *Studies on the dosage of fibre-reinforced cemented soils*. Journal of Materials in Civil Engineering, 23, nº 12, pp. 1624-1632.
- Consoli, N. C.; Moraes, R. R.; Festugato, L. (2011b). *Split tensile strength of monofilament polypropylene fibre-reinforced cemented sandy soils*. Geosynthetics International, 18, nº 2, pp. 57-62.
- Consoli, N. C.; Bellaver Corte, M.; Festugato, L. (2012). *Key parameter for tensile and compressive strength of fibre-reinforced soil-lime mixtures*. Geosynthetics International, 19, nº 5, pp. 409-414.
- Consoli, N. C.; Scapini B.; Festugato, L. (2013a). *A practical methodology for the determination of failure envelopes of fibre-reinforced cemented sands*. Geotextiles and Geomembranes, 41, pp. 50-54.
- Consoli, N. C.; Moraes, R. R.; Festugato, L. (2013b). *Parameters controlling tensile and compressive strength of fibre-reinforced cemented soil*. Journal of Materials in Civil Engineering, 25, nº 10, pp. 1568-1573.
- Consoli, N. C.; Moraes, R. R.; Festugato, L. (2013c). *Variables controlling strength of fibre-reinforced cemented soils*. Ground Improvement, 166, nº 4, pp. 221-232.
- Correia, A. A. S. (2011). *Aplicabilidade da técnica de deep mixing ao solo mole do Baixo Mondego*. Dissertação de Doutoramento, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.
- Correia, A. A. S.; Venda Oliveira, P. J.; 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, nº 2, pp. 97-106.

- Custódio, D. G. (2013). *Comportamento mecânico do solo mole do Baixo Mondego quimicamente estabilizado com adição de fibras de polipropileno*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.
- Dall'Aqua, G. P.; Ghataora, G. S.; Ling, U. K. (2010). *Behaviour of fibre-reinforced and stabilized clayey soils subjected to cyclic loading*. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 32, nº 3, pp. 3-16.
- EN 197-1 (2000). *Cement e Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements*. European Committee for Standardization.
- Estabragh, A. R.; Namdar, P.; Javadi, A. A. (2012). *Behaviour of cement-stabilized clay reinforced with nylon fibre*. *Geosynthetics International*, 19, nº 1, pp. 85-92.
- Eurosoilstab (2001). *Development of design and construction methods to stabilise soft organic soils. Design guide soft soil stabilization*. CT97-0351, EC Project No. BE 96-3177, Industrial and Materials Technologies Programme (BriteEuRam III), European Commission, pp. 94.
- Festugato, L.; Fourie, A.; Consoli, N. C. (2013). *Cyclic shear response of fibre-reinforced cemented paste backfill*. *Géotechnique Letters*, 3, pp. 5-12.
- Güllü, H.; Khudir A. (2014). *Effect of freeze-thaw cycles on unconfined compressive strength of fine-grained soil treated with jute fibre, steel fibre and lime*. *Cold Regions Science and Technology*, 106-107, pp. 55-65.
- Hernandez-Martinez, F. G.; Sparrevik, M.; Kvalvåg; Eggen, A.; Kvennås, A.; Grini, R. S. (2009). *Stabilization/solidification of two contaminate marine sediments*. International Symposium of Deep Mixing & Admixture Stabilization. Okinawa, Japan.
- Holm, G. (2005). *Keynote Lecture: Towards a sustainable society – recent advances in deep mixing*. International Conference on Deep Mixing – Best Practice and Recent Advances: k13-k24. Swedish Deep Stabilization Centre. Stockholm, Sweden.
- Janz, M.; Johansson, S.-E. (2002). *The function of different binding agents in deep stabilization*. Swedish Deep Stabilization Research Centre, Report 9, Linköping, Sweden.
- Kaïkea, A.; Achoura, D.; Duplan, F.; Rizzuti, L. (2014). *Effect of mineral admixtures and steel fibre volume contents on the behaviour of high performance fibre reinforced concrete*. *Materials and Design*, 63, pp. 493-499.
- Kaniraj, S. R.; Havanaji, V. J. (2001). *Behavior of cement-stabilized fiber- reinforced fly ash-soil mixtures*. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 127, nº 7, pp. 574-584.
- Khaloo, A.; Raisi, E. M.; Hosseini, P.; Tahrisi, H. (2014). *Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibres*. *Construction and Building Materials*, 51, pp. 179-186.
- Khattak, M. J.; Alrashidi, M. (2006). *Durability and mechanistic characteristics of fibre reinforced soil-cement mixtures*. *International Journal of Pavement Engineering*, 7, nº 1, pp. 53-62.
- Maher, M.; Ho, Y. (1993). *Behavior of fiber-reinforced cemented sand under static and cyclic loads*. *Geotechnical Testing Journal*, 16, nº 3, pp. 330-338.
- Olgun, M (2013). *Effects of polypropylene fibre inclusion on the strength and volume change characteristics of cement-fly ash stabilized clay soil*. *Geosynthetics International*, 20, nº 4, pp. 263-275.
- Park, S. (2009). *Effect of fibre reinforcement and distribution on unconfined compressive strength of fibre-reinforced cemented sand*. *Geotextiles and Geomembranes*, 27, nº 2, pp. 162-166.

- Park, S. (2011). *Unconfined compressive strength and ductility of fibre-reinforced cemented sand*. Construction and Building Materials, 25, nº 2, pp. 1134-1138.
- Sarma, S. S.; Fahey, M. (2003). *Degradation of stiffness of cemented calcareous soil in cyclic triaxial tests*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 129, nº 7, pp. 619-629.
- Sukontasukkul, P.; Jamsawang, P. (2012). *Use of steel and polypropylene fibres to improve flexural performance of deep soil-cement column*. Construction and Building Materials, 29, nº 1, pp. 201-205.
- Tang, C.; Shi, B.; Gao, W.; Chen, F.; Cai, Y. (2007). *Strength and mechanical behaviour of short polypropylene fibre reinforced and cement stabilized clayed soil*. Geotextiles and Geomembranes, 25, pp. 194-202.
- Taylor, H. F. W. (1997). *Cement Chemistry*. 2nd edition, Thomas Telford.
- Teles J. M. N. P. C. (2013). Comportamento mecânico do solo mole do “Baixo Mondego” quimicamente estabilizado com fibras metálicas. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.
- Terashi, M.; Kitazume, M. (2009). *Keynote Lecture: Current practice and future perspective of QA/QC for deep-mixed ground*. International Symposium of Deep Mixing & Admixture Stabilization. Okinawa, Japan.
- Terashi, M. (2005). *Keynote Lecture: Design of deep mixing in infrastructure applications*. International Conference on Deep Mixing – Best Practice and Recent Advances: k25-k45. Swedish Deep Stabilization Centre. Stockholm, Sweden.
- Venda Oliveira, P. J.; Correia, A. A. S.; Teles, J. M. N. P. C.; Custódio, D. G. (2016). *Effect of fibre type on the compressive and tensile strength of a soft soil chemically stabilised*. Geosynthetics International, 23, nº 3, pp. 171-182.
- Venda Oliveira, P. J.; Correia, A. A. S.; Teles, J. M. N. P. C.; 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, pp. 122-125.
- Venda Oliveira, P. J.; Correia, A. A. S.; 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, pp. 336-343.
- Viana da Fonseca, A.; Rios, S.; Amaral, M. F.; Panico, F. (2013). *Fatigue Cyclic Tests on Artificially Cemented Soil*. Geotechnical Testing Journal, 36, nº 2, pp. 1–9.
- Yang, C.; Cui, Y. J.; Pereira, J. M.; Huang, M. S. (2008). *A constitutive model for unsaturated cemented soils under cyclic loading*. Computers and Geotechnics, 35, nº 6, pp. 853-859.