



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Guilherme Rebelo Anunciação

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM  
SOLO ARENOSO ESTABILIZADO E REFORÇADO COM  
FIBRAS SOB INFLUÊNCIA DE CARREGAMENTOS  
MONOTÓNICOS E CÍCLICOS

Dissertação de Mestrado 2º Ciclo em Mecânica dos Solos e Engenharia  
Geotécnica, orientada pelo Professor Doutor Paulo José da Venda de  
Oliveira e pelo Professor Doutor António Alberto Santos Correia  
e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da  
Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade de Coimbra

Março de 2020



**FCTUC** DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Guilherme Rebelo Anunciação

# **Análise do comportamento mecânico de um solo arenoso estabilizado e reforçado com fibras sob influência de carregamentos monotónicos e cíclicos**

## **ANALYSIS OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF A STABILIZED SANDY SOIL REINFORCED WITH FIBERS UNDER MONOTONIC AND CYCLIC LOADING**

Dissertação de Mestrado 2º Ciclo em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica,  
orientada pelo Professor Doutor Paulo José da Venda de Oliveira e pelo Professor Doutor António Alberto Santos Correia

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.  
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer  
responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões  
que possa conter.

Coimbra, Março de 2020

## AGRADECIMENTOS

Finalizado este trabalho, tenho muito a agradecer a todos que de alguma maneira me ajudaram para que este sonho pudesse ser concretizado. E assim quero também expressar minha enorme gratidão:

- à minha família, principalmente aos meus pais, José Rubem Carvalho da Anunciação e Maria Celina Rebelo Anunciação, meus irmãos, Joanna Rebelo Anunciação e Aialisson Anunciação, por sempre me apoiarem nesta jornada. Em memória das minhas avós e em especial do meu avô Guilherme Pereira da Anunciação, grande propulsor, inconsciente, da escolha do tema deste trabalho. Ao meu avô Melquiades Rebelo, minha referência;
- aos meus professores e orientadores, Professor Doutor António Alberto Santos Correia e ao Professor Doutor Paulo José da Venda de Oliveira, pelos inúmeros conhecimentos transmitidos ao longo do curso e decorrer deste trabalho. Em especial ao Coordenador e Professor do curso, Doutor Jorge Nuno Veiga de Almeida e Sousa, por todos os ensinamentos, sua luta e disponibilidade por nós alunos do Mestrado em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica;
- aos meus grandes amigos deixados no Brasil, porém trazidos comigo em meu coração. Aos colegas de curso e de laboratório, em especial Daniel Goulart por toda amizade e companheirismo em todos os momentos no desenvolvimento desse trabalho, Nicole Santos, Artur Cavalcante, David Massicano, David Camacho, Flávio Rogério, Filipe Tavares e Jorge Ortega, pessoas que nunca mediram esforços em ajudar. Ao técnico do laboratório de Geotecnia DEC-UC, Sr. José António, por toda sua disponibilidade em ajudar;
- à CIMPOR, pela cedência do ligante utilizado;
- à Biu Internacional, pela cedência das fibras de polipropileno utilizadas;
- à COTESI, pela cedência das fibras de Sisal utilizadas;
- ao laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra, na pessoa do Engenheiro Carlos Leitão, pela disponibilidade e prontidão em que nos atenderam e nos ajudaram a realizar ensaios.

Dedico este trabalho à minha família, minha saudade e meu elo mais forte. A minha fonte de força e motivação diária é saber que hoje o reencontro está mais perto que ontem.

“Escutai!  
Um vento morreu.  
Não vos dais conta?  
Somos jardineiros  
E não flores.”  
Autor Desconhecido

## RESUMO

A estabilização química dos solos tem vindo a afirmar-se como uma das principais metodologias alternativas para melhorar as propriedades do solo de fundação de obras de engenharia civil, permitindo suprir as exigências do crescimento populacional acelerado e desordenado, que traz consigo a procura por novos ambientes habitacionais para adequar e gerar conforto à população. Zonas constituídas por solos de baixa capacidade resistente para receber as exigências da construção civil têm sido objeto de investigação constante visando encontrar soluções eficientes e economicamente viáveis para suprir as limitações encontradas. Daí o setor de construção civil ser obrigado a se reinventar constantemente.

Relativamente à inclusão de novos elementos responsáveis por sanar as limitações encontradas na estabilização química dos solos, as fibras e suas diversas variabilidades são elementos eficientes, inovadores e recentes no que diz respeito às possibilidades de contribuição. Por possuírem grande variabilidade, é fundamental a caracterização do comportamento do solo reforçado com fibras, tendo em consideração os diversos tipos de fibras e a vasta variabilidade de solos e condições geotécnicas.

Diante dessas exigências, este trabalho procura contribuir para o progresso das técnicas utilizadas no melhoramento ou estabilização de solos atendendo à mistura *in situ* com materiais de propriedades aglomerantes e reforçados ou não com fibras. No estudo foi analisada a capacidade resistente, bem como a deformabilidade, para dois tipos de fibras, Polipropileno e Sisal, e duas dosagens de ligante cimentício. O estudo tem por base ensaios UCS realizados com carregamento monotónico e cíclico.

De acordo com os resultados obtidos, a inclusão de fibras é responsável pela alteração do comportamento do material compósito, levando este a possuir uma ruptura mais dúctil e maior capacidade resistente, tanto em carregamento monotónico como cíclico, sendo sua influência mais evidente quando a dosagem de ligante é reduzida, variando o comportamento em função do tipo de fibra utilizado.

**Palavras-Chave:** Solo estabilizado, Fibras de Sisal, Fibras de Polipropileno, Ensaio UCS, Ensaio Cíclico, Solo reforçado, Solo-Cimento

## ABSTRACT

The chemical stabilization of soils has been asserting itself as one of the main alternative methodologies to improve the properties of the foundation soil of civil engineering works, allowing to meet the demands of accelerated and disordered population growth, which brings with it the search for new environments to adapt and generate comfort for the population. Areas consisting of soils with a low resistant capacity to receive the requirements of civil construction have been the object of constant research aiming to find efficient and economically viable solutions to overcome the limitations found. Hence the civil construction sector is forced to constantly reinvent itself.

Regarding the inclusion of new elements responsible for remedying the limitations found in chemical stabilization, fibers and their various variabilities are efficient, innovative and recent elements with regard to their possibilities of contribution. As they have great variability, it is essential to characterize the behavior of soil reinforced with fibers, taking into account the different types of fibers and the vast variability of soils and geotechnical conditions.

In view of these requirements, this work seeks to contribute to the progress of the techniques used in soil improvement or stabilization, given the in situ mixture with materials with agglomerating properties and reinforced or not with fibers. In the study it was analyzed the resistant capacity, as well as the deformability, for two types of fibers, Polypropylene and Sisal, and two dosages of cementitious binder. To obtain these results, UCS tests were carried out with monotonic and cyclic loading.

According to the results obtained, the inclusion of fibers is responsible for altering the behavior of the composite, causing it to have a more ductile rupture and greater resistant capacity, both in monotonic and cyclic loads, its influence being more evident when the binder dosage is reduced, varying the behavior depending on the type of fiber used.

**Keywords:** Stabilized soil, Sisal fibers, Polypropylene fibers, UCS test, Cyclic test, Reinforced soil, Soil-Cement

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	iii
ABSTRACT .....	iv
ÍNDICE.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vii
ÍNDICE DE Quadros.....	xi
Simbologia.....	xiii
Abreviaturas.....	xiii
1 inTRODUção.....	1
1.1 Relevância do tema.....	1
1.2 Estrutura da Dissertação .....	1
2 revisão bibliográfica .....	3
2.1 Estabilização Química de Solo .....	3
2.1.1 Reações hidráulicas e pozolânicas.....	4
2.1.2 Estabilização de solos com ligantes cimentícios .....	4
2.2 Solo estabilizado e reforçado com fibras.....	7
2.2.1 Fibras Naturais.....	9
2.2.2 Fibras de Polipropileno.....	11
2.2.3 Interação Solo Fibra.....	12
2.3 Estabilização cimentícia com adição de fibras .....	13
2.4 Estabilização cimentícia com adição de fibras sob solicitações dinâmicas.....	17
3 Caracterização dos Materiais.....	20
3.1 Introdução.....	20
3.2 Caracterização do Solo .....	20
3.2.1 Composição Granulométrica .....	20
3.2.2 Densidade das Partículas Sólidas .....	21
3.2.3 Ensaio de Proctor.....	21
3.2.4 Limites de Consistência.....	22
3.2.5 Teor de Matéria Orgânica.....	22
3.2.6 Medição do pH .....	23
3.3 Cimento Portland tipo I .....	23
3.4 Fibras .....	23
3.4.1 Sisal .....	23
3.4.2 Polipropileno .....	24
3.5 Equipamentos .....	24
4 Procedimento experimental .....	26

---

4.1	Introdução .....	26
4.2	Preparação, armazenamento e cura das amostras .....	26
4.2.1	Preparação das amostras .....	26
4.2.2	Armazenamento, cura e procedimento final das amostras .....	32
4.3	Plano de ensaios .....	33
4.4	Ensaio de provetes e respectivo procedimento laboratorial .....	35
4.4.1	Ensaio de Compressão Simples (UCS) .....	36
4.4.2	Ensaio Cíclicos (CIC) .....	39
5	Análise e Discussão de resultados .....	41
5.1	Introdução .....	41
5.2	Ensaio de Compressão Simples Monotônicos .....	41
5.2.1	Caracterização do Comportamento do solo não estabilizado .....	41
5.2.2	Solo estabilizado não reforçado .....	43
5.2.3	Solo estabilizado e reforçado .....	44
5.2.4	Influência do tempo de cura .....	47
5.3	Ensaio de Carga Cíclica .....	54
5.3.1	Condições base .....	55
5.3.2	Variações Cíclicas .....	56
5.4	Ensaio de Compressão Simples Monotônicos Pós Cíclicos .....	60
5.4.1	Provetes ensaiados nas condições base .....	60
5.4.2	Provetes ensaiados para várias frequências .....	64
5.4.3	Comparativo da influência das variações de frequências .....	68
6	Conclusões e trabalhos futuros .....	73
6.1.1	Considerações finais .....	73
6.1.2	Trabalhos Futuros .....	74
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	75
	ANEXO A – ENSAIO À TRAÇÃO DAS FIBRAS DE SISAL .....	80
	ANEXO B – EFEITO DE MOLHAGEM DAS FIBRAS .....	81
	ANEXO C – ENERGIA DE COMPACTAÇÃO DOS PROVETES .....	83
	Ensaio de Proctor Leve .....	83
	Provetes do ensaio .....	83

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Efeito da quantidade de cimento sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cimento Portland e curados por 7 dias (adaptado de Ingles & Metcalf, 1972 em Marques, 2016) .....	6
Figura 2.2 – Efeito das fibras numa matriz atuando como reforço (John et al., 1999) .....	9
Figura 2.3 – Fibras Fibriladas (Falorca, 2002) .....	11
Figura 2.4 – (a) Comportamento tensão-deformação de areia não reforçada e reforçada com fibras com variação de teores de fibra (b) Comportamento tensão-deformação de areia não reforçada e reforçada com fibras com variação do comprimento das fibras (Adaptada Noozard & Zarinkolaei, 2015).....	12
Figura 2.5 – Esquema de interação entre fibra e solo (Adaptada Hejazi et al., 2012) .....	13
Figura 2.6 – Curvas tensão-extensão representantes do ensaio UCS de referência para solo cimento com e sem adição de fibras (Cajada, 2017).....	15
Figura 2.7 – Efeito do reforço com fibras na tensão de pico desviatória com relação à dosagem de fibras (adaptada Consoli et al., 2009).....	16
Figura 2.8 – Curvas representativas da deformação vertical acumulada ao longo do número de ciclos do ensaio cíclico (Cajada, 2017) .....	18
Figura 2.9 – Comparação das curvas tensão-extensão dos provetes de referência e provetes pós-cíclico (Cajada, 2017).....	18
Figura 2.10 – Evolução da deformação axial permanente acumulada com o número de ciclos de carga (Venda Oliveira et al., 2017).....	19
Figura 2.11 – Efeito do número de ciclos de carga nas curvas tensão-deformação dos ensaios UCS realizados após o estágio cíclico (Venda Oliveira et al., 2017).....	19
Figura 3.1 – Curva granulométrica completa .....	21
Figura 3.2 – Representação gráfica dos resultados do ensaio de Proctor para determinação do teor ótimo de água para o solo em estudo .....	22
Figura 3.3 – Características geométricas das fibras de polipropileno Fonte - Catálogo da empresa Bekaert (2010).....	24
Figura 4.1 – Processo de homogeneização e peneiramento de todo corpo terroso: a)Homogeneização b)Solo ainda in natura, fração inserida no peneiro c) Solo peneirado + especificação do peneiro .....	26
Figura 4.2 – Processo de preparação dos provetes: a) Material pesado e separado antes do início das misturas b) Mistura entre água e cimento, preparação de uma pasta c) Adição das fibras à mistura durante o primeiro tempo de três. d) Uniformização manual com o auxílio de uma espátula. e) Pás misturadoras utilizadas. f) Tubo pvc, funil e alonga. g) Utensílios preparados para montagem dos provete. h) Compactação das camadas de material compósito. i) Escarificação da superfície da camada. j)	

---

Ajuste do topo do provete. k) Exemplo antes e depois da retificação. l) Pesagem dos provetes antes de irem à câmara termohigrométrica.....	30
Figura 4.3 – Relação de materiais utilizados na preparação dos provetes. ....	31
Figura 4.4 – Processo de extração do provete (a) e aferição das medidas (b) antes da realização do ensaio.....	33
Figura 4.5 – Prensa Tristar 5000kg Stepless Compression Test Machine .....	36
Figura 4.6 – Comparação entre curvas tensão-extensão com e sem correcção do “ <i>bedding error</i> ”, para o provete UCS_175_28_PP_1.....	38
Figura 4.7 – Prensa ELDYN: a) Aparelhagem completa. b) Prensa (célula de carga com capacidade de 10 kN e 5 Hz).....	39
Figura 4.8 – Curva tipo de carregamento cíclico força-tempo para o provete CIC_175_2_140	
Figura 4.9 – Curva tipo deslocamento-tempo para o provete CIC_175_2_1 .....	40
Figura 5.1 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre amostras de solo não reforçado e solo reforçado com fibras de sisal e polipropileno (descritas no Quadro 5.1).....	42
Figura 5.2 – Variação de $q_{u\_max}$ entre os ensaios UCS realizados sobre amostras de solo não reforçado e solo reforçado com fibras de sisal e polipropileno.....	43
Figura 5.3 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre amostras de solo estabilizado com ligante C142,5 R, aplicado em dosagens 125 e 175 kg/m <sup>3</sup> . ....	44
Figura 5.4 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre amostras de solo estabilizado com ligante C142,5 R, dosagem 125kg/m <sup>3</sup> , sem e com reforço de fibras de sisal. ....	45
Figura 5.5 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre amostras de solo estabilizado com ligante C142,5 R, dosagem de 175kg/m <sup>3</sup> , sem e com reforço de fibras de sisal. ....	46
Figura 5.6 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre amostras de solo estabilizado com ligante C142,5 R, aplicado com dosagens de 125 e 175 kg/m <sup>3</sup> , sem e com reforço de fibras de sisal. ....	47
Figura 5.7 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre amostras de solo estabilizado com ligante C142,5 R, dosagem de 175kg/m <sup>3</sup> , sem e com reforço de fibras de polipropileno.....	47
Figura 5.8 – Resistência à compressão não confinada ( $q_{u\_max}$ ) com o logaritmo do tempo de cura de solo estabilizado com ligante, dosagem de 125kg/m <sup>3</sup> sem reforço. ....	49
Figura 5.9 – Resistência à compressão não confinada ( $q_{u\_max}$ ) com o logaritmo do tempo de cura de solo estabilizado com ligante, dosagem de 125kg/m <sup>3</sup> com reforço de fibras de sisal.....	50
Figura 5.10 – Resistência à compressão não confinada ( $q_{u\_max}$ ) com o logaritmo do tempo de cura de solo com ligante, dosagem de 175kg/m <sup>3</sup> sem reforço. ....	51

---

Figura 5.11 – Resistência à compressão não confinada ( $q_{u\_max}$ ) com o logaritmo do tempo de cura de solo com ligante, dosagem de $175\text{kg/m}^3$ com reforço de fibras de sisal. .	52
Figura 5.12 – Resistência à compressão não confinada ( $q_{u\_max}$ ) com o logaritmo do tempo de cura de solo com ligante, dosagem de $175\text{kg/m}^3$ com reforço de fibras de polipropileno. ....	53
Figura 5.13 – Evolução da resistência à compressão ( $q_{u\_max}$ ) para as variações de materiais compósitos de acordo com o tempo de cura.....	54
Figura 5.14 – Curvas deformação axial permanente - número de ciclos de ensaios Cíclicos, com frequência de 1Hz, realizados sobre amostras de solo estabilizado com ligante, dosagem de $125\text{kg/m}^3$ , sem e com reforço de fibras de sisal. ....	55
Figura 5.15 – Curvas deformação axial permanente - número de ciclos de ensaios Cíclicos, com frequência de 1Hz, realizados sobre amostras de solo estabilizado com ligante, dosagem de $175\text{kg/m}^3$ , sem e com reforço de fibras de sisal e polipropileno.....	55
Figura 5.16 – Evolução da deformação axial permanente para a frequência de 1Hz e aplicação de 5000 ciclos. ....	56
Figura 5.17 – Curvas deformação axial permanente - número de ciclos de ensaios Cíclicos, com frequência de 0,25Hz, realizados sobre amostras de solo estabilizado com ligante, dosagem de $175\text{kg/m}^3$ , sem e com reforço de fibras de sisal e polipropileno. ....	57
Figura 5.18 – Evolução da deformação axial permanente para a frequência de 0,25Hz e aplicação de 5000 ciclos.....	57
Figura 5.19 – Curvas deformação axial permanente - número de ciclos de ensaios Cíclicos, com frequência de 2Hz, realizados sobre amostras de solo estabilizado com ligante, dosagem de $175\text{kg/m}^3$ , sem e com reforço de fibras de sisal e polipropileno.....	58
Figura 5.20 – Evolução da deformação axial permanente para a frequência de 2Hz e aplicação de 5000 ciclos. ....	58
Figura 5.21 – Curvas deformação axial permanente - número de ciclos de ensaios Cíclicos, com frequência de 4Hz, realizados sobre amostras de solo estabilizado com ligante, dosagem de $175\text{kg/m}^3$ , sem e com reforço de fibras de sisal e polipropileno.....	59
Figura 5.22 – Evolução da deformação axial permanente para a frequência de 4Hz e aplicação de 5000 ciclos. ....	59
Figura 5.23 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCSpc comparativa entre Solo estabilizado ( $125\text{kg/m}^3$ ), reforçado e não reforçado de fibras de Sisal e frequência de 1Hz. ...	62
Figura 5.24 – Comparativo da evolução da deformação axial entre cada fase de carregamento monotônico de referência, cíclico e pós cíclico do solo estabilizado ( $125\text{kg/m}^3$ ), reforçado e não reforçado com fibras de Sisal. ....	62
Figura 5.25 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCSpc comparativa entre Solo estabilizado ( $175\text{kg/m}^3$ ), reforçado e não reforçado de fibras de Sisal e Polipropileno e frequência de 1Hz.....	63

Figura 5.26 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCSpc comparativa entre Solo estabilizado (175kg/m <sup>3</sup> ), reforçado e não reforçado de fibras de Sisal e Polipropileno e frequência de 0,25Hz.....	65
Figura 5.27 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCSpc comparativa entre Solo estabilizado (175kg/m <sup>3</sup> ), reforçado e não reforçado de fibras de Sisal e Polipropileno e frequência de 2Hz.....	66
Figura 5.28 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCSpc comparativa entre Solo estabilizado (175kg/m <sup>3</sup> ), reforçado e não reforçado de fibras de Sisal e Polipropileno e frequência de 4 Hz.....	67
Figura 5.29 – Comparativo da influência da variação da frequência através das curvas tensão-extensão de ensaios UCSpc e UCSref de solo estabilizado (175kg/m <sup>3</sup> ), reforçado e não reforçado de fibras de Sisal e Polipropileno. ....	68
Figura 5.30 – Comparativo da evolução da deformação axial de todos os materiais compósitos ensaiados, entre cada fase de carregamento cíclico e monotônico de referência e pós cíclicos, para as variações de frequência. ....	69
Figura 5.31 – Comparativo da evolução da resistência ( $q_{u\_max}$ ) relacionada com as frequências cíclicas aplicadas entre os ensaios UCSref e UCSpc, para todos os materiais compósitos.....	71
Figura 5.32 – Comparativo da evolução do módulo de deformabilidade ( $E_u$ ) relacionado com as frequências cíclicas aplicadas entre os ensaios UCSref e UCSpc, para todos os materiais compósitos. ....	71
Figura 5.33 – Imagens comparativo do comportamento pós ruptura dos provetes em suas variadas composições: a) Solo natural b) Solo Cimento c) Solo + Cimento + Sisal d) Solo + Cimento + Polipropileno.....	72
Figura A.1 – Equipamento SHIMADZU AG-X, célula de carga com capacidade para 5KN80	
Figura A.2 – Ensaios de resistência à tração medidos pela força (N) .....	81
Figura B.1.– a) Fibras reservadas antes da imersão. b) Fibras imersas em 15 mililitros de água.....	98

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Características físicas e mecânicas das fibras vegetais e polipropileno (adaptado de Savastano Jr, 2000).....	9
Quadro 2.2 – Parâmetros de força de pico para areia cimentada não reforçada e reforçada com fibra (Adaptado Consoli et al., 2009).....	16
Quadro 3.1 – Composição química do Cimento Portland I.....	23
Quadro 3.2 – Propriedades gerais das fibras .....	24
Quadro 3.3 – Descrição dos equipamentos utilizados.....	25
Quadro 4.1 – Planos de ensaios de referência (UCS).....	34
Quadro 4.2 – Parâmetros base utilizados nos ensaios cíclicos .....	34
Quadro 4.3 – Plano de ensaios Cíclicos (CIC) .....	35
Quadro 4.4 – Plano de ensaios Pós Cíclicos (PC).....	35
Quadro 5.1 – Resumo dos resultados obtidos da caracterização do solo natural e reforçado com diferentes tipos de fibras.....	41
Quadro 5.2 – Estabilização do solo com CI42,5 R aplicado com dosagens de 125 e 175 kg/m <sup>3</sup> (tempo de cura =28 dias).....	43
Quadro 5.3 – Estabilização do solo com CI42,5 R aplicado com dosagens de 125 e 175 kg/m <sup>3</sup> reforçados com fibras de Sisal e Polipropileno (DF=10Kg/m <sup>3</sup> ; tempo de cura =28 dias).....	45
Quadro 5.4 – Resultados dos solos estabilizados com ligante, dosagem de 125kg/m <sup>3</sup> sem reforço, tempo de cura como variante.....	48
Quadro 5.5 – Resultados dos solos estabilizados com ligante, dosagem de 125kg/m <sup>3</sup> com reforço de fibras de sisal, tempo de cura como variante. ....	49
Quadro 5.6 – Resultados dos solos estabilizados com ligante, dosagem de 175kg/m <sup>3</sup> sem reforço, tempo de cura como variante.....	50
Quadro 5.7 – Resultados dos solos estabilizados com ligante, dosagem de 175kg/m <sup>3</sup> com reforço de fibras de sisal, tempo de cura como variante. ....	51
Quadro 5.8 – Resultados dos solos estabilizados com ligante, dosagem de 175kg/m <sup>3</sup> com reforço de fibras de polipropileno, tempo de cura como variante.....	52
Quadro 5.9 – Caracterização dos materiais compósitos estabilizados e reforçados.....	54
Quadro 5.10 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios UCS pós-ciclos referente aos materiais compósitos com adição de ligante de 125 e 175 Kg/m <sup>3</sup> , com e sem reforço de fibras de sisal e polipropileno e aplicação de frequência de 1Hz.....	61
Quadro 5.11 – Diferença entre os resultados obtidos nos ensaios UCS pós-ciclos e UCS referência, alusiva aos materiais compósitos com adição de ligante de 125 e 175 Kg/m <sup>3</sup> , com e sem reforço de fibras de Sisal e Polipropileno, e frequência de 1Hz.61	

Quadro 5.12 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios UCS pós-ciclos referente aos materiais compósitos com adição de ligante ( $175 \text{ Kg/m}^3$ ), com e sem reforço de fibras de sisal e polipropileno e aplicação de frequência de $0,25\text{Hz}$ .....	64
Quadro 5.13 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios UCS pós-ciclos referente aos materiais compósitos com adição de ligante ( $175 \text{ Kg/m}^3$ ), com e sem reforço de fibras de sisal e polipropileno e aplicação de frequência de $2\text{Hz}$ .....	65
Quadro 5.14 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios UCS pós-ciclos referente aos materiais compósitos com adição de ligante ( $175 \text{ Kg/m}^3$ ), com e sem reforço de fibras de sisal e polipropileno e aplicação de frequência de $4\text{Hz}$ .....	67
Quadro B.1 – Resumo dos resultados obtidos na pesagem das fibras.....	82

## SIMBOLOGIA

$Al_2O_3$  – Alumina

$A_{corr}$  – Área transversal do provete corrigida tendo em conta a deformação experimentada

$c'$  – Coesão (em tensões efetivas)

CaO – Óxido de cálcio ou cal viva

CIC – Ensaio de carregamento cíclico

DF – Dosagem de fibras

$E_{u50}$  – Módulo de Deformabilidade para 50% da carga de rotura

$E_{u50\_med}$  – Módulo de Deformabilidade médio para 50% da carga de rotura

$\epsilon_a$  – Extensão axial

$\epsilon_{a\_rot}$  – Extensão axial de rotura

$Fe_2O_3$  – Óxido de Ferro

G – Densidade das partículas Sólidas

$K_2O$  – Óxido de potássio

MgO – Óxido de magnésio

$Na_2O$  – Óxido de Sódio

$q_u$  – Resistência à compressão obtida em ensaios UCS

$q_{u\_max}$  – Resistência máxima ou tensão de rotura obtida para ensaios UCS

$q_{u\_med}$  – Resistência máxima média ou tensão de rotura obtida para ensaios UCS

rpm – Rotações por minuto

$SiO_2$  – Sílica ou Dióxido de silício

$SO_3$  – Óxido Sulfúrico

UCSref – Ensaio de compressão simples não confinado de referência

UCSpc – Ensaio de compressão simples não confinado após carregamento cíclico

w – Teor em água

$W_f$  – Teor em água ao final do ensaio

## ABREVIATURAS

ASTM – American Society for Testing and Materials

DEC-UC – Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra

EM – Norma Europeia

FCTUC – Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade de Coimbra

NP – Norma Portuguesa

UCS – Compressão Simples ou Uniaxial (Unconfined Compressive Strength)

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Relevância do tema

O crescimento populacional traz consigo a necessidade da ocupação de novos espaços, desafiando a construção civil a procurar alternativas seguras e economicamente viáveis para a adequação e conforto das pessoas. Dentre as dificuldades encontradas pelos profissionais na área da construção civil, o meio ambiente e suas incertezas estão entre as suas maiores limitações, e dessas as fracas características geotécnicas tem restringido a ocupação destas formações. Porém, a engenharia geotécnica tem desenvolvido alternativas capazes de sanar seus problemas, e dentre essas alternativas voltadas para as limitações geotécnicas está o melhoramento ou estabilização química de solos.

Visando a melhorias das técnicas de estabilização, procura-se com a inclusão de fibras aos materiais compósitos de solos melhorados com ligante cimentício a abrangência de novas capacidades resistentes, alteração do comportamento frágil e soluções de economia. A inclusão de fibras ainda é um estudo limitado, pela vasta variabilidade em termos de matéria prima e ainda desconhecimento do comportamento em diversos tipos de solo.

A incorporação de fibras depende muito da interação entre o solo e a fibra, essa pode ser capaz de induzir no solo um aumento da ductilidade e uma redução da fissuração. Porém tal capacidade varia de acordo com os tipos de fibras e de solo utilizado, além das suas reações na presença do ligante cimentício. O atual trabalho é responsável pela caracterização do comportamento de um tipo de solo arenoso com a adição de ligante cimentício e fibras de Sisal e Polipropileno.

Dado existirem algumas limitações nos estudos publicados sobre esta temática, o presente trabalho procura abordar a problemática de solos estabilizados e reforçados com fibras sujeitos a carregamentos monotônicos e cíclicos. Tal problemática está presente no mundo inteiro e com ela procura-se obter uma melhoria nos aterros e reforço de fundações de obras viárias e ferroviárias, estabilidade de taludes, redução das vibrações causadas por comboios de elevada velocidade, mitigação da liquefação (Terashi, 2005; Terashi e Kitazume, 2009).

## 1.2 Estrutura da Dissertação

Essa dissertação é subdividida em seis capítulos, e dentre estes o atual possui carácter introdutório como apresentação da abordagem que será feita ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica, capítulo responsável pela abordagem dos temas em análise no trabalho, sendo estes divididos em estabilização química de solos, seguidos de reações hidráulicas e pozolânicas, como maneira de trazer um entendimento geral do tema, posteriormente abordado a estabilização química de solos com ligantes cimentícios, estabilização física com reforço de fibras, abordagem sobre os tipos de fibras, sendo fibras naturais e fibras de polipropileno, assim como a interação entre solo e fibra. Segue-se o conceito de estabilização cimentícia com adição de fibras e, por fim, o comportamento dessas sob solicitações dinâmicas.

Capítulo 3 – Caracterização dos materiais, este responsável pela apresentação dos materiais utilizados na realização do trabalho e características dos mesmos. Do solo ao nível da granulometria, teor de matéria orgânica, compactação, densidade das partículas sólidas. Além dos outros componentes da mistura, ligante cimentício, fibras de sisal e polipropileno.

Capítulo 4 – Procedimento Experimental, neste são descritos os procedimentos realizados desde a preparação do solo, passando pela montagem dos provetes para ensaio e desenvolvimento do programa de ensaios e finalmente a descrição dos ensaios realizados.

Capítulo 5 – Análise e discussão dos resultados, onde são expostos e analisados todos os resultados obtidos a partir dos ensaios UCS, monotônicos, cíclicos e pós-cíclicos.

Capítulo 6 – Conclusões e trabalhos futuros, onde se expõe as principais conclusões e diante das mesmas abrem-se oportunidades de complemento para o trabalho com a sugestão de realização de trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Estabilização Química de Solo

Concomitante ao crescimento da população surge à exigência da utilização de locais que possuem, por característica própria, deficiências geotécnicas referentes às exigências impostas pela construção civil, dessa forma torna-se necessário a melhoria dos maciços terrosos, garantindo a estabilidade exigida pelas estruturas (Cardoso, 1987).

A necessidade de transporte de materiais quando se trata de longas distâncias origina degradação ambiental devido à extração de material, consumo de energia, água, combustível e geração de poluentes (John; Agopyan & Sjöström, 2001).

Cordeiro (2007) ressalta a grande mobilização de solos na indústria construção, com maior ênfase na pavimentação rodoviária, setor que necessita muitas vezes de grandes quantidades de solos com características únicas para este tipo de obra, logo, se tornam cada vez mais escassos, por ser um tipo de matéria prima não renovável.

A perspectiva de sustentabilidade está diretamente relacionada com a durabilidade, se há maior durabilidade nas construções conseqüentemente exige-se menos recurso natural para renovação e menor geração de resíduos (DeSimone & Poppof, 1998).

Em simultâneo com o desenvolvimento da indústria no século XX nos EUA nasceu o conceito de estabilização química de solos. Tal desenvolvimento permitiu a melhoria das infraestruturas rodoviárias e aeronáuticas, assim impulsionando a evolução de técnicas de melhoramento de solos ligados à utilização de materiais com propriedades aglomerantes. Assim também se fez na Europa, durante e após a segunda guerra mundial, onde se prolongou a investigação sobre o assunto (Cristelo, 2001).

Estabilização química de solos trata-se da associação do material à agentes com propriedades aglomerantes ou cimentícias, mais conhecidos como ligantes, como exemplo destes, cimento, cal, betume, dentre outras tecnologias. Após a adição de água ocorrem ligações químicas na, conseqüentemente temos a interação entre solo, ligantes e água. Dessa associação surge um novo material com novas características mecânicas, diferentes do solo natural (Cajada, 2017).

Para que sejam tomadas decisões sobre a escolha do ligante a ser utilizado é necessário avaliar as características naturais do solo e de cada ligante, de modo a otimizar a solução a utilizar na estabilização. Os ligantes possuem três tipos de interações, reações de hidratação, reações pozolânicas e troca iônica, sendo as duas primeiras as responsáveis pelas melhorias no comportamento mecânico dos solos estabilizados (Correia, 2011).

### **2.1.1 Reações hidráulicas e pozolânicas**

A adição de ligantes produz no solo uma alteração nas suas características iniciais, relacionadas com a resistência mecânica, deformabilidade, durabilidade e permeabilidade. Independente do tipo de ligante usado (cimento, cal ou materiais betuminosos) a estabilização dos solos é de natureza físico-química. (INGLES & Metcalf, 1972).

Segundo Correia (2011), são totalmente dependentes do tipo de ligante utilizado, as reações de hidratação e pozolânicas para que ocorra o processo de estabilização. Essas reações dependem da reatividade do ligante quando ocorre o contato com a água, a partir deste contato é que se desenvolvem as reações hidráulicas e pozolânicas. Sendo que os ligantes denominados como hidráulicos (Cimento Portland e Cal viva) possuem uma alta reatividade quando em contato com a água, já os ligantes pozolânicos (Cinzas volante, da pozolana natural e sílica de fumo) possuem uma reatividade quase nula.

É característica das reações hidráulicas, a libertação de calor, denominada reação exotérmica, essa responsável por iniciar as reações pozolânicas. Nota-se no comportamento das reações hidráulicas um ganho de resistência rápido, e já no terceiro dia é possível se obter 50% da reasistência, enquanto que para as reações pozolânicas o tempo é fator preponderante para obtenção de resistência (Coutinho 1988; Johansson, 2002 apud Correia, 2011).

A utilização de ligantes alternativos ao cimento tem sido adotada em diversos projetos, dentre eles, proteção de taludes de barragens de terra, pavimentação de rodovias, terminais para trilhos, base de baixo custo para ruas, estacionamentos, canais e revestimentos de reservatórios, dentre outros diversos (FIROOZI et al., 2017).

### **2.1.2 Estabilização de solos com ligantes cimentícios**

Uma das principais alternativas para melhorar os solos é a utilização de cimento como ligante, formando a combinação solo cimento, como pode ser ilustrado na figura 2.1. Este é geralmente mais utilizado no tratamento de solos de características arenosas. A água é adicionada à mistura solo/cimento iniciando assim o processo de hidratação, em seguida formam-se os compostos de hidrato de silicato de cálcio e hidrato aluminato de cálcio, com isso o hidróxido de cálcio é libertado. (RONOH et al., 2014).

Para Cristelo (2001), existe uma variabilidade nos resultados encontrados na estabilidade de solos com cimento a qual está diretamente relacionada com fatores de extrema importância, nomeadamente tipo do solo e quantidade de aditivos utilizada, a uniformização da mistura, o tempo de cura ou hidratação e a relação peso/volume da mistura após processo de compactação.

Pitta (1984) refere que um solo-cimento consiste, em geral, num material arenoso alterado misturado com cimento em proporções que podem variar nas casas de 110 – 200 kg/m<sup>3</sup> (5 a 10% em massa), levando ao aumento da durabilidade e da resistência à compressão simples. O solo melhorado com cimento difere do solo-cimento, onde a opção de melhoramento corresponde à adição de cimento em proporções que variam entre 50 - 100 kg/m<sup>3</sup> (2 a 5% em massa).

Fortunato (2008) elencou algumas das vantagens oferecidas pela melhoria de solo a partir do cimento, dentre elas são, a minimização da degradação ao meio ambiente e minimização dos custos referentes à exploração e necessidade de depósitos de solos em grandes obras de terra, redução dos custos de transporte do material extraído ou emprestado, a possibilidade de execução de aterros e terraplenagem sobre solos antes não adequados, ganhando assim tempo na execução e redução nos custos de obra.

O processo de estabilização com ligantes cimentícios, com solos de características granulares traz consigo certa semelhança com a produção de betão, o que varia na verdade é a granulometria do solo utilizado, sendo que na mistura com o solo granular a pasta de cimento formada não é capaz de preencher todos os espaços vazios. Assim como no concreto, a reação inicia-se a partir da mistura entre a água e o cimento Portland (Silva, 2011).

No comportamento de solos melhorados é relevante, a relação entre os vazios do solo e a adição na mistura, já que a mesma é responsável por decisões como dosagem de cimento e energia de compactação aplicada naquele solo de forma a se obter a resistência exigida (Marques, 2016).

Para solos estabilizados com cimento, essa adição não é capaz de causar alterações significativas no teor de umidade e no peso específico máximo. Costumam haver alterações, no caso de solos arenosos, no peso específico (kézedi, 1979).

É de ressaltar que quando se trata de resistência à compressão do solo melhorado com cimento, essa depende diretamente da orientação, tamanho e formato das partículas de solo, assim também como da eficiência do processo de cimentação (Lopes, 2002).

Dos fatores de maior importância na melhoria de solos, cimento é o agente fundamental, sendo este responsável por um ganho rápido de resistência, já que quando se trata de reação, o cimento Portland alcança cerca de 50% de resistência até o seu terceiro dia e 60% até o sétimo, diferente das reações a partir da Pozolana, que se caracterizam pelos aumentos de resistência ao longo do tempo (Coutinho 1988; Johansson, 2002; Correia, 2011).

Quando se trata da dosagem do teor de cimento referente à estabilização de solos, Cristelo (2001) destaca a dificuldade em chegar a um valor adequado, já que mesmo sabendo que um aumento de dosagem pode significar um aumento da resistência, este mesmo pode gerar fatores negativos de ordem econômica e técnica.

Além da dosagem, existem outros fatores que também influenciam o processo e um deles é a relação água/cimento. Para Pereira (1970) essa relação é satisfeita antes de ser atingido o teor ótimo de compactação, logo, quando é feita a adição da quantidade água visando alcançar o teor ótimo de umidade já é garantida a completa hidratação das partículas cimentícias, sendo apenas importante o controle com a perda durante a aplicação. Cristelo (2001) menciona a importância de se haver qualidade na homogeneização da mistura e alerta para as divergências entre as misturas feitas em laboratório e in-situ, já que em laboratório é possível se obter um maior controle devido às baixas quantidades facilitando a sua homogeneização. O autor elenca como fatores preponderantes na homogeneização, o grau de pulverização no solo, a maneira com que se executa a mistura e por quanto tempo foi feita.

Entre as medidas mais comuns na estabilização de solos com a utilização de cimento, está a resistência à compressão simples (Ingles & Metcalf, 1972). Marques (2016) constatou que a resistência à compressão simples aumenta com o aumento da dosagem de cimento, porém o autor alerta para a influência dos tipos de solo em análise, como pode ser visto na Figura 2.1.

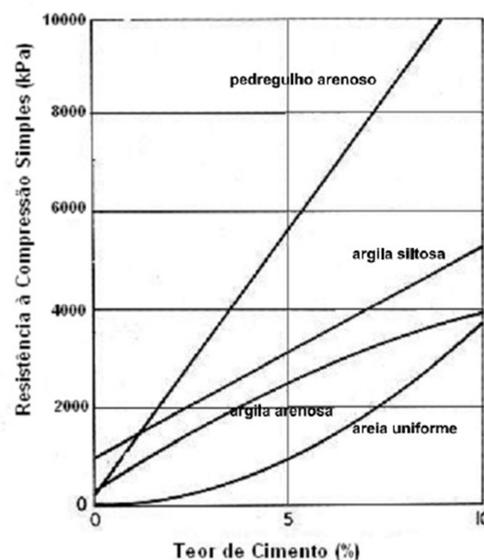


Figura 2.1 – Efeito da quantidade de cimento sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cimento Portland e curados por 7 dias (adaptado de Ingles & Metcalf, 1972 em Marques, 2016)

Huang & Airey (1993) elenca fatores que são modificados de forma positiva com o aumento da dosagem de cimento, são eles a resistência de pico, a rigidez, a dilatação, entre outros.

Quando se trata de coesão e ângulo de atrito, Clough et al. (1981) alega que de uma areia artificialmente cimentada resulta uma mistura que possui dois elementos de resistência, um devido à resistência cimentícia e outro devido ao ângulo de atrito, que corresponde ao que o solo já possuía, já que estes autores referem não haver alterações no ângulo de atrito após a adição do cimento.

São também fatores preponderantes no comportamento mecânico do solo estabilizado, as condições de cura, sendo responsáveis pelo desenvolvimento das interações físico-químicas. Dependendo do ambiente e das condições em que é executada a cura do material, podem ocorrer interrupções das reações de hidratação e pozolânicas. Dessa forma é importante levar em consideração o ambiente onde será realizada a melhoria do solo (Carlsten & Ekström, 1997; EuroSoilStab, 2001; EM 14679, 2005; Correia, 2011).

Correia (2011) ainda faz uma ressalva para as variações encontradas nas misturas realizadas em laboratório e *in-situ*, e sinaliza a importância de se ajustar as condições de laboratório em função das condições de campo.

## **2.2 Solo estabilizado e reforçado com fibras**

A utilização de fibras na construção é o resultado de muitos anos de experiência e estudo, existindo registros da sua utilização em texto bíblicos, onde é citado o seu uso na produção de tijolos de barros como técnica de reforço. Quando se trata de solos reforçados com fibras de materiais naturais, países como China, Itália (Roma) e em regiões da África tropical e Ásia meridional, além de encontrarmos em Portugal exemplos de construções antigas onde foram executados reforço de solos com fibras (Falorca & Pinto, 2004).

Cajada (2017) Cita algumas técnicas de reforço, entre elas a inserção de estacas de madeira, adição de palha ou sabugos em solos incapazes.

Para Gregory & Chill (1998), Pinto (2000) e Falorca (2002), há uma subdivisão nas técnicas de reforço com fibras, essas passam a ser distinguidas entre Macrorreforço e Microrreforço do solo. Onde o Macrorreforço trata-se do que conhecemos também como terra armada, a utilização de elementos de reforço em orientações e espaçamentos planejados de forma a haver uma maior mobilização de terra, já que estes reforços possuem maiores dimensões, logo é exigido um menor número de elementos de reforço. O Microrreforço trata-se de elementos de menores dimensões que são misturados ao solo de forma uniforme e aleatória, assim cada um destes reforços é responsável por uma porção de solo à sua volta, dessa maneira é necessária uma quantidade muito maior para que sejam alcançados os resultados. Estes

elementos de microrreforço podem variar em suas origens, sendo eles de fontes naturais ou sintéticas, assim como recortes de geossintéticos, materiais reutilizáveis, entre outros.

Entre as principais vantagens na aplicação das fibras em microrreforço são o fato de que, com essa forma de utilização consegue-se minimizar a existência de planos de fraqueza. Tal formato de utilização se assemelha aos enraizamentos de árvores, responsável pela melhoria da estabilidade de camadas próximas à superfície. Devido a essas vantagens, nas últimas três décadas viu-se aumentar exponencialmente a utilização de fibras no melhoramento de solos, principalmente quando se trata do formato de microrreforço (Noorzad & Zarinkolaie, 2015).

A inserção de fibras traz como fatores positivos, o acréscimo de resistência e ductilidade à mistura, isso principalmente quando se trata de solos granulares (Heineck et al., 2005). Por se tratar de um material dúctil e com grande competência em absorção de energia, é importante salientar a capacidade resistente das fibras às ações de natureza dinâmica (Falorca e Pinto, 2004). As áreas de aplicação na geotecnia hoje em dia no mundo são muito amplas, essas melhorias variam desde aterros e fundações, passando por estabilidade de taludes, redução de vibrações causadas por meios de transportes, entre outros (Terashi, 2005; Terashi & Kitazume, 2009).

Casagrande (2005) observa que, para que seja viável a utilização de fibras, exige-se o preenchimento de alguns requisitos, fatores de extrema importância, são eles, neutralidade entre as fibras, para que não haja trocas químicas com o meio, não deterioráveis, não serem influenciadas por ataques de fungos, bactérias e outros, e não ser prejudicial à saúde humana de forma que haja contaminação no meio. Casagrande ainda elenca classes de fibras, dividindo-as em quatro grupos: naturais, poliméricas, minerais e metálicas, sendo dois destes abordados neste trabalho.

Para Taylor (1994) as fibras são capazes de controlar a fissuração, apesar de não ser capaz de impedir que elas aconteçam, induzem a mobilização da resistência à tração, que é uma deficiência da mistura solo-cimento. Se tratando da orientação das fibras é importante ressaltar que as fibras responsáveis pela mobilização à resistência citada são as que se encontram perpendiculares ao plano de fraqueza, a fissuração (Johnston 1994).

Dentre os fatores influentes das fibras no desempenho das estabilizações Taylor (1994) cita o teor em fibra, o módulo de elasticidade da fibra, a aderência à matriz, a resistência e o comprimento, lembrando que as propriedades destes fatores são atingidas independentes entre si. Estes fatores citados são completamente dependentes das características de comportamento, do tipo de material e do processo de fabricação das fibras (Casagrande, 2005).

John et al. (1999) ilustra a atuação das fibras em uma matriz, como elemento de reforço (Figura 2.2).

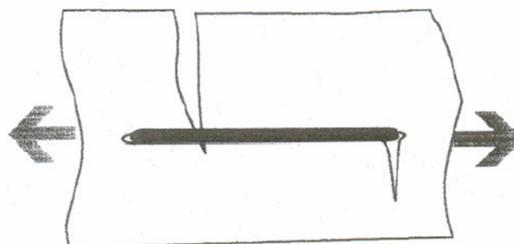


Figura 2.2 – Efeito das fibras numa matriz atuando como reforço (John et al., 1999)

Além da capacidade de suporte existem outras características vantajosas para a utilização de fibras na estabilização de solos, Cajada (2017) cita como outros fatores decisivos a maior capacidade de absorção de energia, para impactos, a queda na redução da resistência pós-pico, no caso de materiais frágeis, e maior capacidade de absorção de deformações.

Dessa forma entende-se que, com o intuito de realizar pesquisas visando à estabilização de solo é importante conhecer e entender sobre todas as características e propriedades dos tipos de fibras a serem utilizadas e suas influências na mistura. Savastano Jr. (2000), apresentou (Quadro 2.1) as principais e mais relevantes propriedades das fibras mais utilizadas na estabilização de solos.

Quadro 2.1 – Características físicas e mecânicas das fibras vegetais e polipropileno (adaptado de Savastano Jr, 2000)

Propriedades	Massa espec. real (Kg./m <sup>3</sup> )	Absorção máxima (%)	Alongamento na ruptura (%)	Resistência à tração (Mpa)	Módulo de elastic. (GPa)
Coco	1177	93,8	23,9 a 51,4	95 a 118	2,8
Sisal	1370	110,0	4,9 a 5,4	347 a 378	15,2
Malva	1409	182,2	5,2	160	17,4
Celulose	1200 a 1500	400	nd	300 a 500	10 a 40
Bambu	1158	145	3,2	73 a 505	5,1 a 24,6
Juta	nd	214	3,7 a 6,5	230	Nd
Piaçava	1054	34,4 a 108	6	143	5,6
Banana	1031	407	2,7	384	20 a 51
Polipropileno	913	-	22,3 a 26,0	250	2,0

### 2.2.1 Fibras Naturais

As fibras naturais foram as pioneiras nos métodos de estabilização, entre elas o bambu, juta, cana de açúcar, coco, sisal, entre outras. Característica das fibras naturais é a alta capacidade resistente a esforços de tração. (Hannant, 1994).

Silva (2007) descreve as principais vantagens e desvantagens para a utilização de fibras naturais. Vantagens essas como, grande abundância e variabilidade disponível, o baixo custo, baixa densidade, o fato de não ser prejudicial à saúde, a conservação de energia, e o investimento na economia agrícola, já como desvantagens, o baixo tempo de vida útil devido à decomposição, à fraca adesão às matrizes quando não modificada sua forma natural e a grande variabilidade das propriedades.

As fibras naturais estudadas neste trabalho (Sisal) tiveram um auge de produção no ano de 1888, propagadas em regiões tropicais e subtropicais (Nilsson, 1975). É importante ressaltar que as principais regiões produtoras de Sisal no mundo são Brasil, Indonésia e Leste da África, sendo que no Brasil a região nordeste é a principal responsável por essa produção durante muitos anos (Vale, 1991).

Estudos apontam que a utilização das fibras de sisal num teor de 4% leva ao aumento da ductilidade e aumento da resistência à compressão (Ghavami et al., 1999). Prabakar & Sridhar (2002) realizaram um estudo variando as percentagens e comprimentos das fibras utilizadas no reforço de um solo, e estes concluíram uma redução do peso volúmico seco do solo, assim também como um crescimento não linear da tensão de corte, quando com comprimentos até 20 mm, sendo que com o aumento do comprimento reduz-se a tensão de corte. Essa tensão também é aumentada em simultâneo com o aumento do teor de fibra, sendo que existe um limite de 0,75% neste crescimento, a partir do qual reduz-se a tensão de corte. Foram utilizadas pelo autor, como parâmetros de estudo, os teores de 0,25%, 0,5%, 0,75% e 1% de fibras de sisal e comprimentos de 10, 15, 20 e 25 mm. O autor comenta ainda que a resistência à tensão de corte deriva do formato da superfície e rugosidade da fibra, quando acontece o encolhimento do solo, efeito da compactação, são ativadas forças atritivas de compressão, além disso, as propriedades coesivas são responsáveis pela adesão entre a fibra e o solo. Estes fatores são também influenciados pelas alterações dimensionais da fibra e oscilam de acordo com a umidade e temperatura do ambiente.

É importante também ressaltar o comentário a respeito da relação entre período de mistura e secagem, onde a fibra possui uma natureza hidrofílica, essa responsável pela absorção de parte da água, para durante o período de cura perder a mesma causando um encolhimento da fibra e geração de vazios ao redor da mesma, estes vazios se tornam pontos de fraqueza (Prabakara & Sridhar, 2002).

Sob o ponto de vista ambiental as fibras de sisal levam uma vantagem quando comparadas às fibras de matéria prima sintética, porém aquelas são fortemente influenciadas e agredidas por reações químicas que possam existir no meio (Cajada, 2017).

### 2.2.2 Fibras de Polipropileno

As fibras de polipropileno são formadas por termoplástico, que quando submetidos às altas temperaturas adquirem uma consistência plástica. Como característica dos termoplásticos está o fato de por serem formados por séries de longas cadeias de moléculas polimerizadas e separadas umas das outras, possuem capacidade de deslizar entres si (Hollaway, 1994).

Por se tratarem de geossintéticos, as fibras não representam risco para o meio ambiente e são por muitas vezes utilizadas na fabricação de geotexteis. O formato das fibras que serão utilizadas no presente trabalho é denominado por Falorca (2002) de fibras fibriladas (Figura 2.3), a autora descreve que esse tipo de fibras recebe cortes distribuídos ao longo do seu comprimento durante a sua produção fabril.



Figura 2.3 – Fibras Fibriladas (Falorca, 2002)

A autora ainda cita o método de mistura das fibras ao solo *in-situ*, processo efetuado com a ajuda de equipamentos que promovem a abertura das fibras no solo, conseqüentemente formam uma modelo de rede ou grelha, dessa forma o resultado é uma maior interação entre as partículas do solo e as fibras.

Taylor (1994) elenca como fatores preponderantes para a utilização de fibras de polipropileno, as suas grandes capacidades, já que possuem grande flexibilidade e tenacidade, um dos módulos de elasticidade mais baixos quando comparados com as outras fibras e alta resistência à tração, essa podendo atingir valores de 400 MPa. Traz consigo como já mencionado, uma maior resistência ao ataque de substâncias químicas e álcalis, gerando assim uma menor degradação e conseqüentemente um maior tempo de vida útil.

Para Casagrande et al. (2002) a utilização de fibras de polipropileno na melhoria de solos traz consigo um reforço na resistência e ductilidade do solo, para além disso, é responsável por um acréscimo de resistência sob grandes deformações impostas. Em estudo feito por Noozard &

Zarinkolaei (2015) comparando ensaios de corte direto e triaxiais para variados teores e comprimentos de fibras de polipropileno e de confinamento do solo, obteve-se um aumento no pico de resistência com o aumento do teor e comprimento de fibras e confinamento do solo. O autor refere ainda um aumento também na resistência residual com o aumento do teor e comprimento das fibras e confinamento do solo, assim também acontece com relação à tensão de ruptura, porém nesta, o ensaio triaxial revela uma diferença mais pronunciada como ilustrado na Figura 2.4.

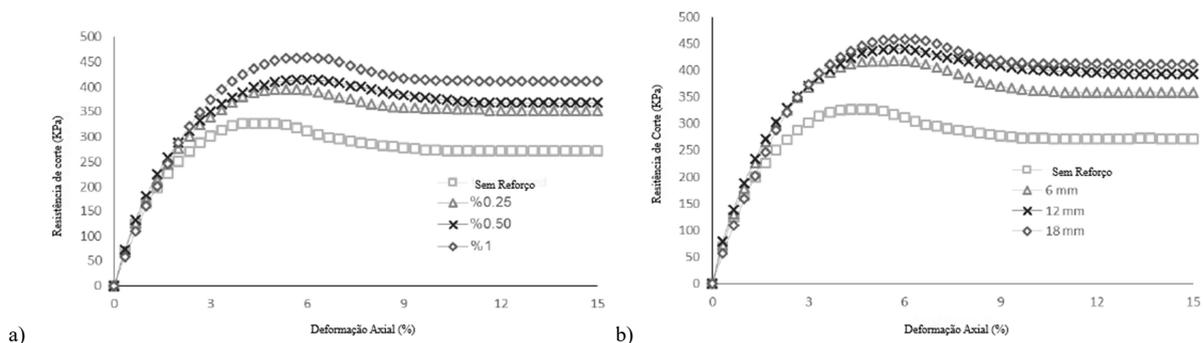


Figura 2.4 – (a) Comportamento tensão-deformação de areia não reforçada e reforçada com fibras com variação de teores de fibra (b) Comportamento tensão-deformação de areia não reforçada e reforçada com fibras com variação do comprimento das fibras (Adaptada Noozard & Zarinkolaei, 2015)

Para Consoli et al. (2009) a utilização de fibras de polipropileno combinadas na estabilização solo-cimento é mais relevante quando utilizada em misturas com menor rigidez, já que com a redução da rigidez se alcança maiores níveis de deformação, logo a resistência à tração das fibras são mobilizadas.

### 2.2.3 Interação Solo Fibra

Feuerharmel (2000) elenca os fatores influenciados pela inclusão das fibras e comenta para quais as alterações sofridas:

- I. Compactação: Para os solos reforçados com fibras, a inclusão das mesmas altera o processo de compactação (mantida a mesma energia) já que agora, as fibras são responsáveis por aumentar o índice de vazios do solo, e isso é totalmente dependente do atrito criado entre o solo e as fibras de reforço.
- II. Mobilização da fibra sob carregamentos externos: O autor ressalta a importância da interação entre fibra e solo, já que a mobilização dos esforços de tração, responsáveis pela deformação da fibra, depende antes que haja uma deformação do solo, e essa deformação é quem determinará a atuação da fibra em intensidade. As fibras são responsáveis pela redistribuição dos esforços de tração para o solo,

assim forma-se uma nova distribuição de tensões e conseqüentemente uma nova distribuição de deformações no interior no solo.

- III. Dimensões da Fibra: A relação entre o comprimento e o diâmetro das fibras é também fator preponderante às conseqüências, já que esta relação é responsável pelas foças de corte, que acontecem na interface entre o solo e a fibra, assim também como para as forças de tração, essas se desenvolvem na seção transversal das fibras.
- IV. Parâmetros de resistência (Coesão e Ângulo de Atrito): O autor menciona dois estados para que haja modificações nos parâmetros de resistência, estes estados são influenciados pela tensão confinante. Em baixa tensão de confinamento a inclusão de fibras interfere de forma direta a parcela atritiva. Já para altas tensões de confinamento o que se nota é uma alteração do comportamento apenas na coesão, enquanto a parcela atritiva atinge o mesmo escalão do solo natural.

Feuerharmel (2000) ainda alerta para as variações entre solos e fibras, essas são responsáveis por diferentes características e conseqüências geradas pela técnica de reforço. Hejazi et al. ilustra (Figura 2.5) a interação entre o solo e as fibras quando submetida esforços que mobilizam a resistência à tração das fibras.

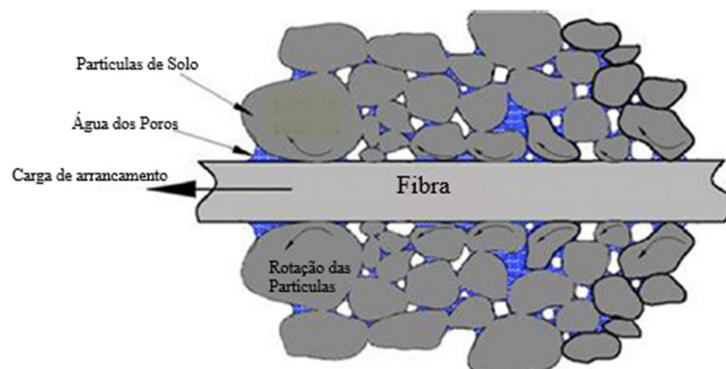


Figura 2.5 – Esquema de interação entre fibra e solo (Adaptada Hejazi et al., 2012)

### 2.3 Estabilização cimentícia com adição de fibras

Os grandes desafios a serem solucionados nas estabilizações cimentícias estão no fato de possuírem baixa resistência quando submetidas a esforços de tração e flexão, além de possuírem como característica marcante da mistura o comportamento frágil. Sob comportamento de compressão, a cimentação causa ao solo efeitos diversos como, aumento da resistência, este proporcional à componente cimentícia, aumento da rigidez inicial e fragilidade, ruptura brusca para pequenos níveis de deformações impostas, após a ruptura a

tensão atinge valor nulo rapidamente. (Tang et al. 2007; Correia et al. 2015; Venda Oliveira et al. , 2015).

A inserção de fibras é fator importante, já que as mesmas são responsáveis pelo aumento da deformação de ruptura, da resistência de pico e a redução da queda de resistência pós-pico, essa agora passa a acontecer de forma gradual. (Consoli et al. 1998; Tang et al. 2007).

Johnston (1994) elenca os principais efeitos da adição de fibras no reforço de uma estabilização cimentícia, ressaltando o fato de que sua finalidade está no reforço aos esforços de tração, sendo eles, tração indireta, flexão, corte e, além disso, são responsáveis também por melhorias na ductilidade e tenacidade da matriz, que é considerada de característica frágil.

Num consenso em comum, Taylor (1994) e Hannant (1994) chegaram à conclusão de que a maior contribuição na inclusão das fibras está na resistência do material no processo após a ruptura, quando ocorrem as fissurações. Nesta ocasião as fibras são responsáveis por aumentar a capacidade do conjunto na absorção de energia. Essa diferença é devido ao fato de as fibras resistirem mais que a matriz cimentada às deformações. Taylor (1994) menciona ainda o fato de que para se obter uma maior resistência pós fissuração é necessário a introdução de uma fibra mais rígida que a matriz cimentícia, assim também como uma maior aderência entre eles, evitando movimentos variados entre os mesmos. Porém o autor também refere que a funcionalidade da fibra não impede fissuras, mas permite o controle da propagação das mesmas.

Consoli et al. (1998), faz a observação a partir de estudos realizados em misturas solo-cimento-fibra, de que quanto maior o teor de cimento utilizado na mistura, menor é o acréscimo de resistência derivado da inclusão de fibras, a figura 2.7 ilustra tal comportamento.

Taylor (1994) elenca os parâmetros responsáveis pelo desempenho das misturas solo-cimento-fibra e ressalta o fato de total independência entre estes fatores citados abaixo:

- I. Teor de fibra: Admitindo a capacidade de absorção das fibras às cargas adicionais originadas pela fissuração, é consequência do aumento do teor de fibras uma menor dimensão das fissuras e maior resistência no pós-fissuração.
- II. Módulo de Elasticidade das fibras: Este fator é diretamente proporcional à possibilidade de arrancamento das fibras.
- III. Aderência matriz-fibra: Este é um dos fatores mais importantes na mistura, já que a aderência é capaz de influenciar a resistência, deformação e nas condições de

ruptura. As dimensões das fissuras são diretamente influenciadas por este fator, quanto maior a aderência, maior a capacidade de distribuição pelos provetes.

IV. Resistência da Fibra: O aumento da resistência da fibra está diretamente relacionado com a ductilidade do material compósito, porém, é importante ressaltar que para isso é necessário que não ocorra rotura das ligações de aderência.

V. Comprimento da fibra: O maior comprimento das fibras diminui a probabilidade de elas serem arrancadas.

Pinto (2008) realizou ensaios de compressão para dois diferentes tipos de fibras (Sisal e Curauá) com comprimentos de 25 e 35 mm e teores de ordens 0,5 e 1%, e solos (Argiloso e Arenoso) compactados e estabilizados com cimento em proporção de 6% e obteve diferentes resultados, sendo mais eficiente em simultâneo à utilização de sisal, o solo de tipo arenoso. Essa alcançou maiores valores de resistência, tais ganhos chegaram a 104,8% se comparado a matriz sem reforço.

Em estudo feito por Cajada (2017), onde o mesmo analisou a influência de fibras de polipropileno e cimento em diferentes tipos de solo, incluindo um solo tipo areia, sob carregamentos de tração em ensaios monotônicos e dinâmicos, o autor comenta seus resultados citando as alterações de comportamento após a inclusão de fibra, deixando o comportamento anteriormente caracterizado como frágil (sendo característica deste uma queda brusca da resistência após a ruptura) para dúctil e uma mobilização de significativa resistência residual, o autor comenta ainda o fato de a resistência pós-pico para provetes com ausência de fibras perder totalmente tal resistência antes mesmo da extensão axial atingir 2%. A Figura 2.6 ilustra os resultados obtidos por Cajada (2017) para o solo tipo arenoso com e sem inclusão de fibras de polipropileno.

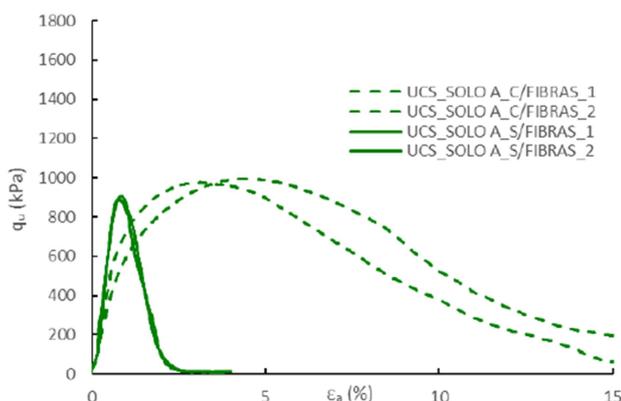


Figura 2.6 – Curvas tensão-extensão representantes do ensaio UCS de referência para solo cimento com e sem adição de fibras (Cajada, 2017)

Em estudo realizado por Consoli et al. (2009) onde os autores realizaram a introdução de fibras de polipropileno na estabilização de uma areia com uma variação no teor de cimento na mistura e obtiveram uma série de resultados relevantes que podem reforçar o que foi referido. Os resultados demonstraram uma maior eficiência das fibras quando combinadas a uma utilização de teor de até 4% do ligante cimentício, tornando a mistura com comportamento mais dúctil. Quando se trata da resistência de pico o autor descreve como resultado uma alteração no ângulo de atrito da areia cimentada reforçada com fibras, este alcançando resultados próximos dos resultados obtidos para misturas areia-fibra, à medida que cresce o teor de adição cimentícia. Já se tratando de coesão houve um aumento considerável, quando comparadas à ausência do reforço (Quadro 2.2).

Quadro 2.2 – Parâmetros de força de pico para areia cimentada não reforçada e reforçada com fibra (Adaptado Consoli et al., 2009)

Teor de cimento (%)	Areia Não reforçada		Areia reforçada com Fibras	
	C'(KPa)	$\phi'$ (Graus)	C'(KPa)	$\phi'$ (Graus)
<b>Zero</b>	Zero	36.7	14.5	48.5
<b>1</b>	19.5	30	56	45
<b>4</b>	84	39	132	44
<b>7</b>	146.5	52	193.5	46.5
<b>10</b>	328	48.5	225	51.5

No que se refere à resistência ao corte, o autor apresenta resultados onde a inserção de fibras como reforço à mistura areia-cimento não é benéfica (Figura 2.7). Como esclarecimento para este fato o autor cita que a mobilização da resistência das fibras só acontece após deformações do solo ao redor das mesmas.

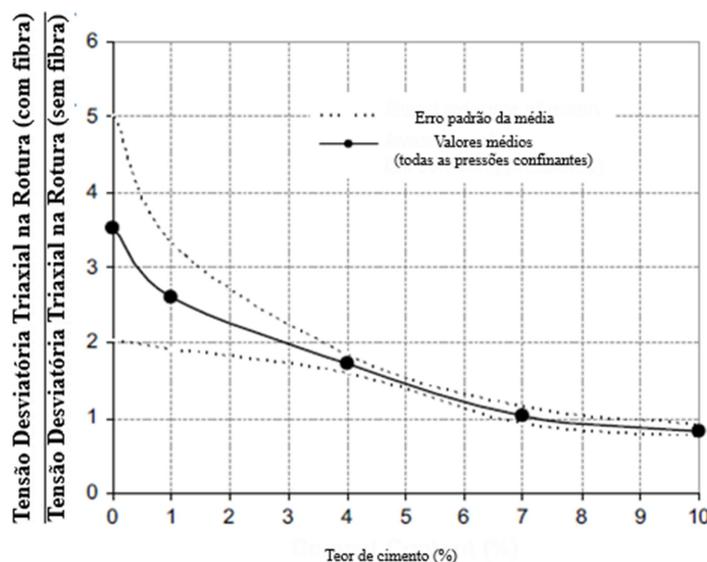


Figura 2.7 – Efeito do reforço com fibras na tensão de pico desviatória com relação à dosagem de fibras (adaptada Consoli et al., 2009)

Consoli (2010) ainda ressalta que diante de uma gama de estudos realizados a influência das fibras é mais influente em solos do tipo arenoso, isso pelo fato de solos com essas características necessitarem de menores tores de cimento. Quanto maior a dosagem de cimento, mais essa é influente e responsável pelos resultados de resistência.

## **2.4 Estabilização cimentícia com adição de fibras sob solicitações dinâmicas**

As solicitações dinâmicas podem ser originadas de varias maneiras, como pela ação de máquinas rotativas em edifícios, meios de transportes, cargas de impacto, cargas explosivas, entre outras, sem esquecer as excitações geradas por terremotos, que atuam nos solos através de ondas sísmicas (Wolf, John P. 1985).

Bahrekazemi (2004) separa os métodos de mitigação das vibrações em três grupos, o primeiro trata-se das medidas que resultam em uma menor geração de vibrações na fonte de emissão, o segundo grupo são as medidas que mitigam as propagações das vibrações no caminho que ela percorre até a estrutura receptora em análise e por último o grupo responsável pela redução dos efeitos da vibração no receptor. O autor cita a estabilização de solos sob o aterro receptor das vibrações como um método de mitigação no receptor.

Desta forma é importante a análise da estabilização de solos por adição de cimento e fibras quando submetidos também a esforços dinâmicos, tanto mais que esta análise não tem sido suficientemente abordada em estudos recentes.

Cajada (2017), com a inclusão de ensaios cíclicos executados com características de 3000 ciclos, nível de tensão de 50% da carga de rotura ( $q_{u\_max}$ ), amplitude em média de 7,5% e frequência de 0,25 Hz, para uma variedade de solos estabilizados com e sem adição de fibras, para um solo tipo arenoso (solo A, Figura 2.8) obteve resultados muito próximos para variações tangentes às deformações finais quando na utilização ou não de fibras, apesar de um comportamento variado durante o ensaio e uma estabilização ao inicio do ensaio (por volta dos 500 ciclos).

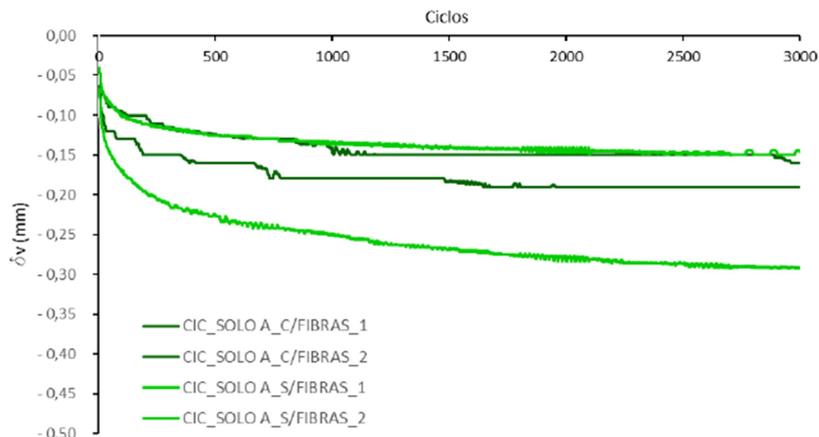


Figura 2.8 – Curvas representativas da deformação vertical acumulada ao longo do número de ciclos do ensaio cíclico (Cajada, 2017)

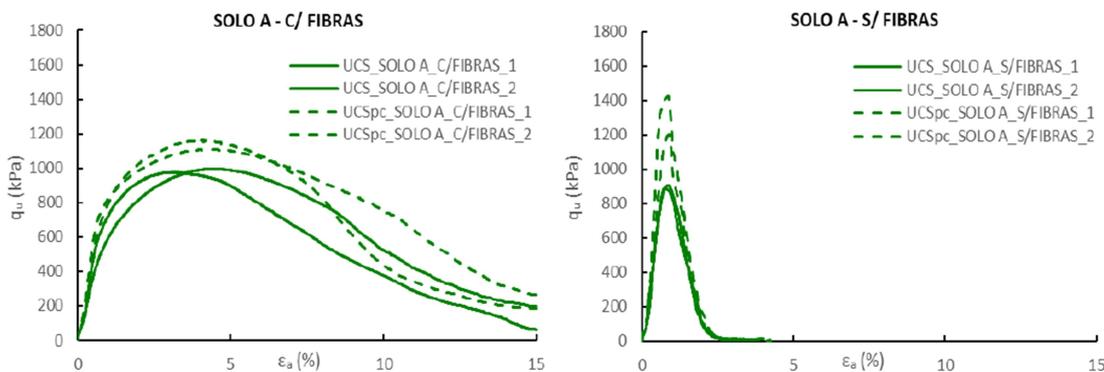


Figura 2.9 – Comparação das curvas tensão-extensão dos provetes de referência e provetes pós-cíclico (Cajada, 2017)

O autor faz ainda a análise dos resultados de compressão simples executados após a fase cíclica, onde foi notado um aumento geral da resistência ( $q_{u\_max}$ ) como mostrado na Figura 2.9. Cajada (2017) explica que apesar da deterioração da estrutura dos provetes no ensaio cíclico, acontece então a mobilização da resistência das fibras através do atrito nas superfícies de rotura, o que mobiliza as zonas vizinhas e conseqüentemente aumenta a resistência (Figura 2.9).

Em estudo feito por Venda Oliveira et al. (2017) com características parecidas ao anteriormente mencionado, obtiveram o aumento da deformação axial acumulada com o número de ciclos, este fato limita-se a casa dos 5000 ciclos quando a deformação axial se torna um valor constante(Figura 2.10).

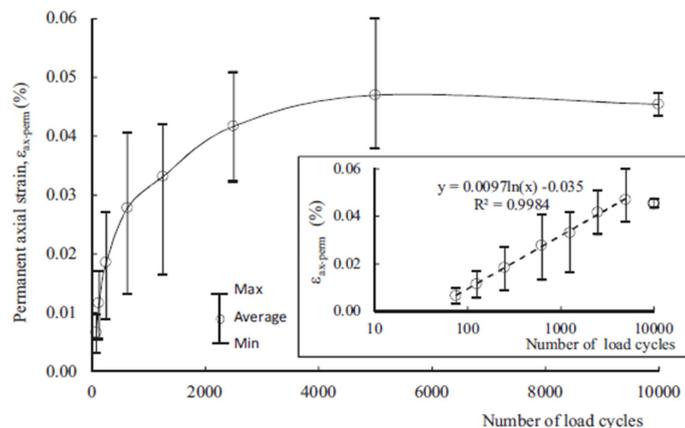


Figura 2.10 – Evolução da deformação axial permanente acumulada com o número de ciclos de carga (Venda Oliveira et al., 2017)

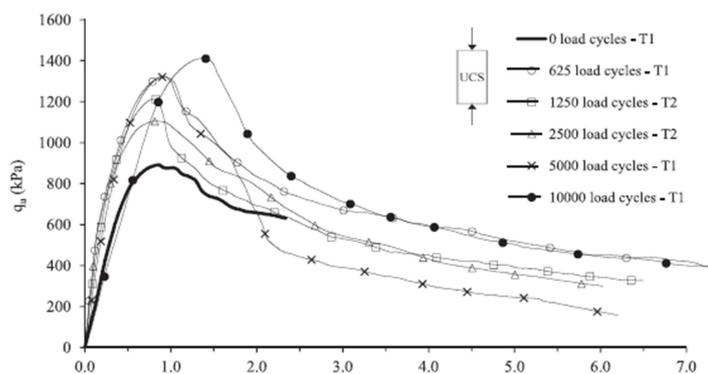


Figura 2.11 – Efeito do número de ciclos de carga nas curvas tensão-deformação dos ensaios UCS realizados após o estágio cíclico (Venda Oliveira et al., 2017)

No que se refere à resistência à compressão não confinada, os autores obtiveram um aumento da resistência diretamente proporcional ao aumento do número de ciclos, ilustrado na Figura 2.11. Assim como o já mencionado em outros estudos, os autores concluem que o acréscimo da resistência está ligado à deformação axial acumulada, responsável por mobilizar a resistência à tração das fibras.

## **3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS**

### **3.1 Introdução**

O atual trabalho tem como principal alvo caracterizar o comportamento mecânico de um material terroso proveniente da zona periférica de Leiria (Portugal), região onde predomina formações sedimentares detríticas. Serão analisados a repercussão nas características mecânicas do solo, o melhoramento do solo com adição de Cimento Portland do tipo I e o reforço com fibras naturais e sintéticas, respectivamente Sisal e Polipropileno.

### **3.2 Caracterização do Solo**

#### **3.2.1 Composição Granulométrica**

Gantus Oliveira et al. 2016 alerta para as dificuldades encontradas no método de caracterização granulométrica convencional, citando o fato de o ensaio separar as partículas em diferentes frações, sem levar em consideração a interação entre elas durante o processo de sedimentação.

Para determinar a distribuição granulométrica do solo em estudo, recorreu-se ao ensaio em granulometro laser. Oliveira et al. (2016) faz um estudo comparativo entre os ensaios e conclui uma similaridade entre os resultados e admitindo o granulometro à laser como um método satisfatório. Apesar de não haver uma norma recomendando a realização do ensaio granulométrico a laser para solos, adota-se comumente como referência o procedimento descrito pela norma ISO 13320-1 (1999), com as especificidades para o material solo consideradas no procedimento interno do Laboratório de Sedimentologia do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra (LS-DCTUC). Para ser aceite é requisitada uma reprodutibilidade dos ensaios, apenas sendo válidos após reproduzidos por três vezes e aferidos de forma visual ou parâmetros estatísticos.

O equipamento utilizado foi requerido e disponibilizado pelo Laboratório de Sedimentologia do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra, de especificação Coulter LS-230. Através da análise granulométrica determinou-se a composição do material terroso como propriamente uma areia, alcançando valores de 97,82%, possuindo 0,41% de argila e 1,77% de silte (Figura3.1).

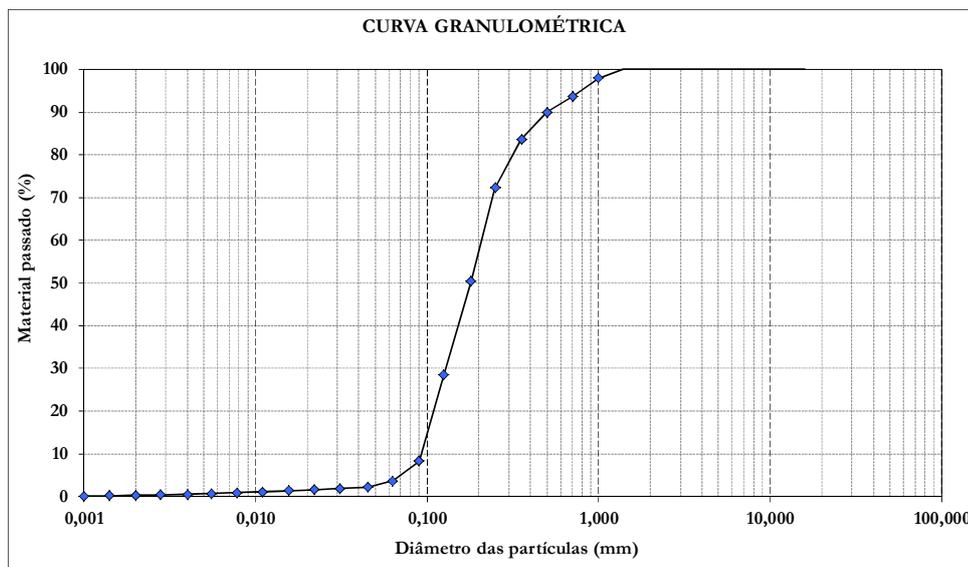


Figura 3.1 – Curva granulométrica completa

É possível também observar através da Figura 3.1 que as dimensões das partículas em maiores proporções possuem diâmetros entre 0,1 e 1 mm. Este domínio em que o solo se encontra compreendido corresponde a uma areia de média a grossa, limpa e mal graduada segundo as determinações da ASTM 2487 (1998) e especificação E 196-1966 do LNEC.

### 3.2.2 Densidade das Partículas Sólidas

A densidade das partículas sólidas, determinada como ( $G$ ) é obtida através do quociente entre o peso volúmico das partículas sólidas ( $\gamma_s$ ) e o peso volúmico da água ( $\gamma_w$ ), essa destilada à 20°C. Tal determinação foi realizada tomando como base a norma NP 83 (1965). Foi realizado um total de três amostras e a partir dos resultados das mesmas retirou-se o valor médio para determinação da densidade das partículas do solo em estudo sendo essa de  $G=2,66$ .

### 3.2.3 Ensaio de Proctor

Para determinar a relação entre o teor em água e o peso volúmico seco dos solos foi realizado o ensaio de compactação leve em molde pequeno, seguindo as orientações da especificação E 197-1966 e (descrito no Anexo C).

Na Figura 3.2 apresentam-se os resultados obtendo-se valores de  $w_{opt} = 14,2\%$  e um peso volúmico máximo ( $\gamma_{dmáx}$ ) de 16,3 KN/m<sup>3</sup>, a tipologia da curva corresponde ao comportamento referente aos solos de tipo areia limpa.

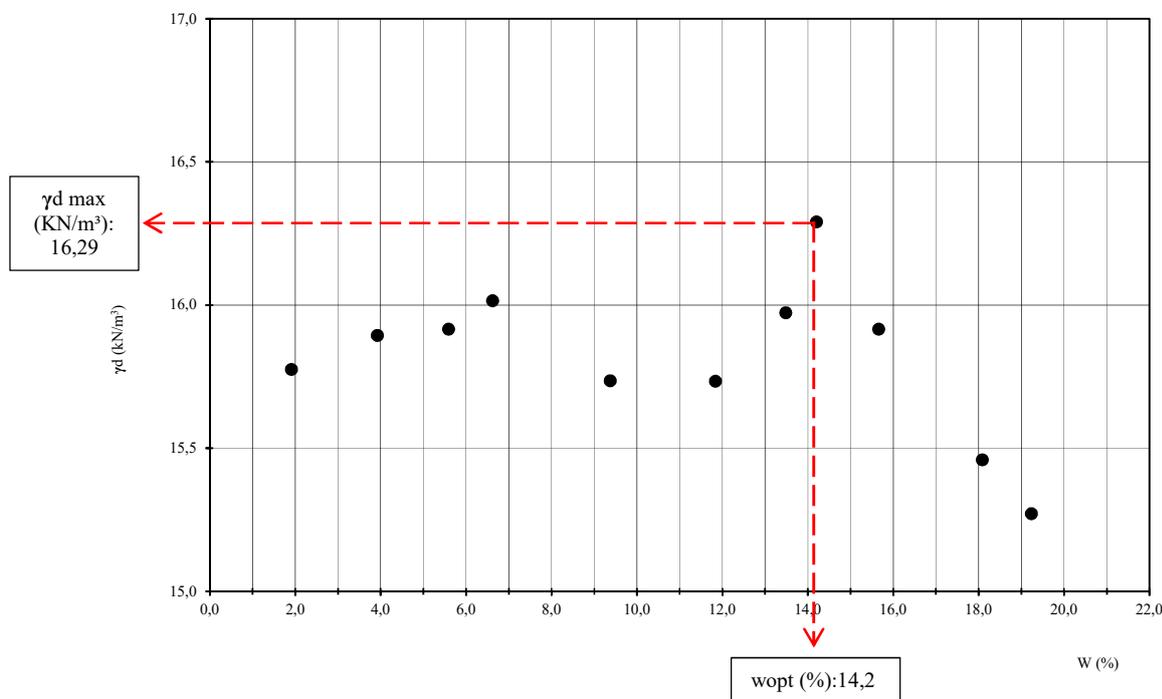


Figura 3.2 – Representação gráfica dos resultados do ensaio de Proctor para determinação do teor ótimo de água para o solo em estudo

### 3.2.4 Limites de Consistência

A determinação dos limites de consistência segundo a norma NP-143 1969 exige um limite de aplicação para solos com cerca de 30%, ou mais, em massa, de partículas de dimensões inferiores a 0,05mm. Dessa maneira exclui os solos predominantemente arenosos, já que tal ensaio se torna insignificante. Logo, este ensaio não é aplicável ao solo em estudo.

### 3.2.5 Teor de Matéria Orgânica

De maneira a avaliar o teor de matéria orgânica (OM) presente no solo em estudo, foram retiradas 4 amostras de campo. Com essas foram seguidas as determinações fixadas pelo BS 1377-3 (1990).

O método aplicado na sua determinação foi o das perdas na ignição, tomando-se por temperatura de referência os 50°C e por temperatura de ignição os 400°C, aplicados às amostras durante períodos normalizados de 24h. O teor em matéria orgânica médio (OM) obtido foi de 0,24%, variando entre os 0,22 e os 0,24%, sendo valores relativamente baixos de presença de matéria orgânica.

### 3.2.6 Medição do pH

Para a determinação do pH do solo foram também seguidas as determinações da British Standart 1377-3 de 1990. Após realização de todos os procedimentos necessários foi retirado o valor médio de pH = 7,21 (valor definido como solo neutro).

### 3.3 Cimento Portland tipo I

Como matéria prima fundamental na mistura o cimento, responsável pelas interações físico-químicas entre as partículas de água envolvente e o solo, com a intenção de traduzir sob o material composto uma melhoria nas capacidades resistentes quando submetidos a carregamentos mecânicos.

A produção de cimento é realizada a partir da moagem, mistura e fragmentação de calcários, argila ou xisto argiloso, ou a partir de margas ou calcários margosos, dessa forma deriva-se o clínquer, este mais tarde é pulverizado de forma a se obter o cimento. A composição do cimento tem a presença de forma destacada, cal viva (CaO), sílica (SiO<sub>2</sub>), alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). O cimento Portland (CEM I 42,5 R) utilizado neste trabalho possui composição química descrita no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Composição química do Cimento Portland I

Componentes	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Blaine
Conteúdo (%)	19,00	5,15	3,19	62,88	2,16	3,14	1,29	0,10	3263

### 3.4 Fibras

#### 3.4.1 Sisal

Para o processo de realização dos ensaios foram selecionadas as fibras de Sisal no seu tamanho original, disponibilizado pelo fabricante COTESI, sendo utilizado o modelo caracterizado pela empresa como “sem transformação”, e a partir dessas, feitos cortes de forma a uniformizar seus comprimentos em um valor único e 12 mm. Este valor corresponde ao mesmo comprimento das fibras de Polipropileno fornecidas pelo fabricante dessas, de maneira a analisar e comparar os resultados sob mesmas condições. Após a realização dos cortes, as fibras foram armazenadas em vasilhames plásticos de maneira a manter suas propriedades. O Quadro 3.2 apresenta as propriedades geométricas e mecânicas das fibras de sisal utilizada, sendo que, nos Anexos A e B apresentam-se os ensaios de laboratório realizados para se determinar estas propriedades.

### 3.4.2 Polipropileno

As fibras de tipo sintéticas escolhidas para a realização dos ensaios são compostas por multifilamentos de polipropileno de propriedade dimensional extremamente fina. Foram fornecidos pelo fabricante BEKAERT, sendo utilizado o tipo de fibra DUOMIX M12 de características apresentadas na Figura 3.3, com comprimento de 12 mm e cerca de 110 milhões de fibras/Kg. Como indicação no catálogo do fabricante, a utilização das fibras para inclusão em betão armado com a finalidade de minimizar os problemas de fendilhação, e o mesmo faz referência à maneira fácil com que são misturadas, através de bombeamento ou spray. O Quadro 3.2 apresenta as propriedades geométricas e mecânicas das fibras de polipropileno utilizadas.

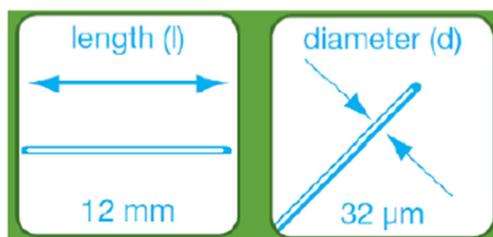


Figura 3.3 – Características geométricas das fibras de polipropileno  
Fonte - Catálogo da empresa Bekaert (2010)

Quadro 3.2 – Propriedades gerais das fibras

Caracterização das Fibras		
Tipo	Polipropileno	Sisal
Comprimento (mm)	12	12
Diâmetro (µm)	32	140
Densidade (milhões/kg)	110	-
Resistência à tração (N/mm <sup>2</sup> )	250	558
Capacidade de absorção max (%)	-	273
Ponto de fusão (°C)	165	-
Ponto de ignição (°C)	≥ 330	-

### 3.5 Equipamentos

O estudo foi realizado no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil FCTUC. No Quadro 3.3 elencam-se os equipamentos utilizados.

Quadro 3.3 – Descrição dos equipamentos utilizados

<b>Equipamento</b>	<b>Características</b>	<b>Utilização</b>
<b>Misturadora</b>	Sammic BM11	Misturas solo-cimento-fibras
<b>Forno elétrico</b>	Temperatura constante (105°)	Aferição dos controles dos teores de humidade
<b>Extrator hidráulico</b>	-	Desmoldagem dos Provetes
<b>Prensa Tristar</b>	Grande sensibilidade com um limite de carga de até 50 KN	Ensaio de compressão simples
<b>Prensa cíclica</b>	Capacidade limite de carga de 10 KN e limite de frequência de 5 Hz	Ensaio cíclico de compressão simples

## 4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 4.1 Introdução

Neste capítulo serão descritos os procedimentos realizados desde a preparação dos provetes à realização dos ensaios para caracterização do comportamento mecânico e avaliação dos teores de humidade finais. Todos os procedimentos laboratoriais foram realizados seguindo as normas e procedimentos regulamentadores de maneira a se garantir criteriosamente uniformidade.

A preparação inicia-se com a homogeneização do solo, realização da mistura gradual dos componentes (solo-cimento-fibra) após pesagem dos mesmos, mais água, moldagem dos provetes, procedimentos de cura e armazenamento dos provetes, extração e rectificação dos provetes, realização dos ensaios (forma e respectivo plano de ensaios) e aferição e controle dos teores de humidade.

### 4.2 Preparação, armazenamento e cura das amostras

#### 4.2.1 Preparação das amostras

Inicialmente, após a chegada da amostra de solo, com intenção de homogeneizar para garantir a reprodutibilidade dos resultados, foi feita a abertura do agregado e mistura por parcelas através do auxílio de pás como mostrado na Figura 4.1 Posteriormente feito o peneiramento de todo o corpo terroso, pelo peneiro nº 10 de 2 mm de abertura, com o intuito da retirada de toda fração superior e impurezas presentes no solo, a Figura 4.2 mostra seu novo aspecto após os processos realizados.

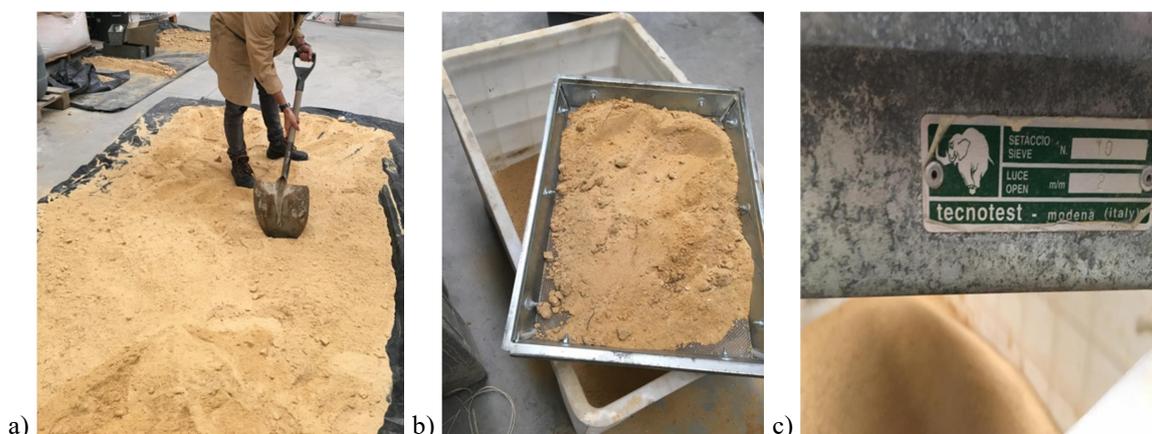


Figura 4.1 – Processo de homogeneização e peneiramento de todo corpo terroso: a)Homogeneização b)Solo ainda in natura, fração inserida no peneiro c) Solo peneirado + especificação do peneiro

Após este processo, com o solo apto ao processo de mistura, foram realizados os seguintes procedimentos experimentais para preparação das amostras, sendo os mesmos realizados com base em métodos utilizados em estudos anteriores (Correia, 2011; Costa, 2012; Cajada, 2017):

- 1) Preparação de moldes em PVC com dimensões de (D=70mm, H=140mm), nestes realiza-se a aplicação de vaselina no interior com a intenção de se obter um melhor desmolde sem que haja danos aos provetes, na base é inserida fita cola (essa sofre pequenos furos repetitivos) e introdução de geotêxtil, este funcionando como filtro para que partículas de solo não sejam perdidas;
- 2) Realização da pesagem dos materiais presentes na mistura (água, ligante e fibras) em função do tipo de mistura pretendido.
  - a) Solo – A porção de solo necessária para a preparação das amostras foi retirada do contentor de forma aleatória. Depois foram pesadas porções menores de solo necessária de acordo com a quantidade de provetes a serem moldados. (Figura 4.2a);
  - b) Água - Foi feita a pesagem da quantidade de água suficiente para se alcançar um teor em água de 14,2% (valor óptimo do ensaio de proctor normal mencionado anteriormente na secção 3) (Figura 4.2a);
  - c) Fibras - Do sisal, após procedimentos realizados (secção 3) foi feita a pesagem da fração de acordo com a quantidade de provetes a serem moldados.  
Do Polipropileno, foram feita a separação das fibras com o auxílio de uma pistola de ar comprimido de maneira a se obter uma maior uniformização dessas na mistura com os demais componentes, após este procedimento foi também realizada a pesagem da fração necessária de acordo com a quantidade de provetes a serem moldados. (Figura 4.2a)
  - d) Ligante Cimento Portland C32,5 - Armazenado sob condições recomendada, em barril devidamente fechado de forma a conservar suas características, eram retiradas porções suficientes de acordo com os requisitos de cada mistura. (Figura 4.2a)
- 3) Realização da mistura dos componentes mencionados no sub-tópico 2).
  - a) Mistura-se a água ao ligante cimentício com auxílio de uma vareta de vidro por 50 movimentos circulares até formar-se uma pasta cimentícia (Figura 4.2b), de forma a promover uma completa homogeneização;
  - b) A pasta cimentícia é misturada ao solo (descrito no sub-tópico 1), com um misturador mecânico com 142rp, fracionada em 3 períodos de 4 min cada, totalizando 12 minutos de mistura. Entre períodos de 4 min é realizada a uniformização manual com o auxílio

de uma espátula, sendo que no primeiro período é feita a inserção das fibras (descritas no sub-tópico 2) de forma gradual e aleatória procurando a formação de um material compósito uniforme (Figura 4.2c e 4.2d). É de ressaltar que o processo de mistura foi realizado com dois diferentes tipos de pás misturadoras, já que a mistura composta por Polipropileno exigiu um maior esforço da mesma, então optou-se pela utilização da pá do tipo “rabo de porco” por ser mais resistente, encontra-se à esquerda na Figura 4.2e;

- c) Após realização do processo b) são retiradas duas amostras da mistura.
- 4) Modelagem faseada do provete dentro dos moldes PVC, realizadas em três camadas com cerca de aproximadamente 390g cada uma, e efetuada a compactação de cada camada de forma idêntica:
- a) Inserida a quantidade do material compósito descrita anteriormente com a ajuda de um funil e um alongador (Figura 4.2f e 4.2g), adotados para facilitar a inserção do solo, é feita a compactação da fração de material compósito com através do pilão de compactação leve, mesma energia utilizada no ensaio de Proctor, mencionado em 3.2.3 8 com um total de 14 pancadas por camada (Figura 4.2h).
  - b) Ao fim da compactação da primeira camada é feita a escarificação da superfície de forma a facilitar a aderência e ligações entre as camadas que são inseridas posteriormente ao realizar-se a repetição do ponto a) (Figura 4.2i);
  - c) Depois de concluído o processo de compactação da terceira e última camada é retirado o alongador e feito o ajuste do topo com uma espátula de forma a rasar o material passante e retificar de maneira a deixa-lo uniformemente liso e ao nível do molde (Figuras 4.2j e 4.2k);
  - d) Por cada preparação são construídos dois provetes, com a mesma composição e para cada tempo de cura. Ambos são executados nos 30 minutos a seguir à primeira mistura de ligante
  - e) Em seguida realiza-se a aferição da massa do provete, o qual é em seguida armazenado (Figura 4.2l).

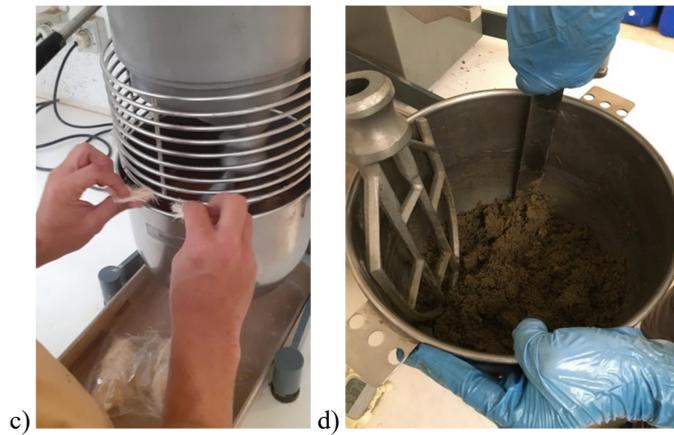
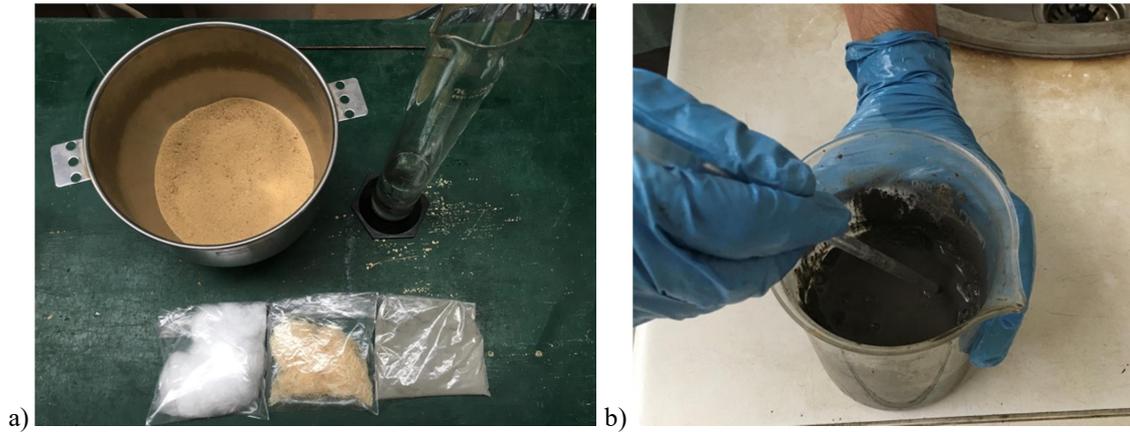




Figura 4.2 – Processo de preparação dos provetes: a) Material pesado e separado antes do início das misturas b) Mistura entre água e cimento, preparação de uma pasta c) Adição das fibras à mistura durante o primeiro tempo de três. d) Uniformização manual com o auxílio de uma espátula. e) Pás misturadoras utilizadas. f) Tubo pvc, funil e alonga. g) Utensílios preparados para montagem dos provete. h) Compactação das camadas de material compósito. i) Escarificação da superfície da camada. j) Ajuste do topo do provete. k) Exemplo antes e depois da retificação. l) Pesagem dos provetes antes de irem à câmara termohigrormétrica.

Utensílios utilizados na preparação das amostras: a) Moldes cilíndricos em PVC; b) Funil; c) Alongas; d) Vaselina; e) Provetas; f) Balanças; g) Pá; h) Vareta de vidro; i) Fita adesiva; j) Geotêxtil; k) Vareta de metal de ponta perfurante; l) Sacos plásticos; m) Espátula.

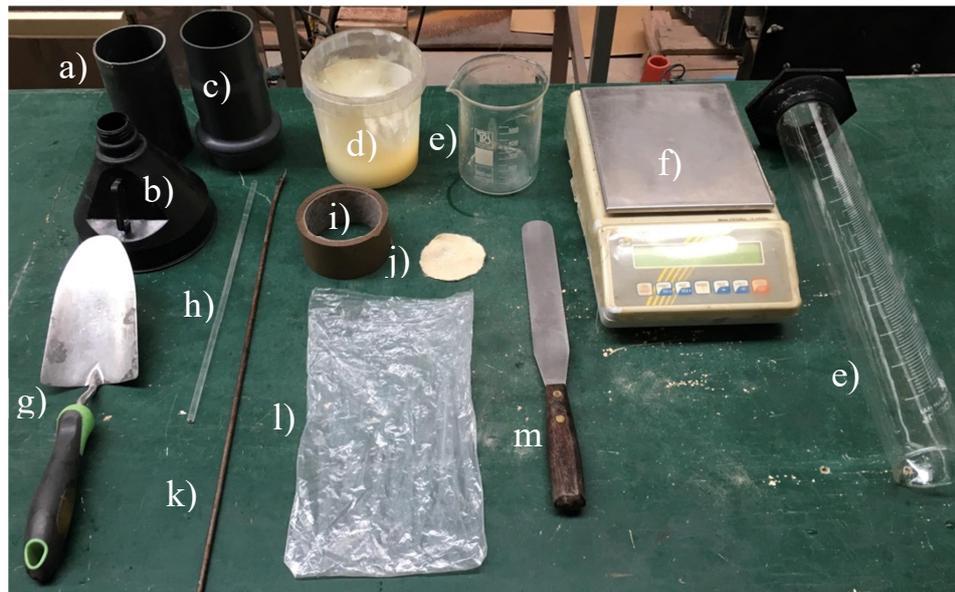


Figura 4.3 – Relação de materiais utilizados na preparação dos provetes.

#### 4.2.2 Armazenamento, cura e procedimento final das amostras

Após realização dos processos descritos anteriormente os provetes são individualmente envolvidos em plástico, de maneira a protegê-los de possíveis trocas de umidade com o ambiente, identificados com uma etiqueta referente à sua composição e segue para uma câmara termohigrométrica à temperatura de  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa de  $95\pm 5\%$ . A organização dos provetes foi realizada de forma etiquetada com datas de preparação e composição da mistura de maneira a facilitar a realização dos ensaios após o tempo de cura (Figura 4.2k).

O fator tempo de cura é preponderante no estudo de maneira a analisarmos a resistência dos provetes ao final de cada período, sendo deste, 4 adotados (3, 7, 14, 28), tal influência do tempo de cura na resistência foi analisada com base em ensaios de compressão simples de ordem monotônica e dinâmica cuja descrição e análise serão feitas posteriormente na seção 4.3.

Após os períodos de cura são retiradas as amostras individualmente da câmara termohigrométrica, aferido a massa do provete para que seja possível a análise do teor em água e das condições de armazenamento e cura, e se necessária é realizada a correção do topo, já que devido reações físico-químicas ocorre a expansão do material compósito contido no interior do molde, a correção é realizada com o auxílio de uma espátula com a intenção de aperfeiçoar a geometria cilíndrica de maneira perpendicular ao eixo vertical do provete e minimizar eventuais excentricidades quando submetido a carregamento axial.

Com amostra já em perfeito estado, foi realizada a extração do molde com o auxílio de um extrator hidráulico, este mencionado na seção 3.5 (Figura 4.4a). Após a extração o provete passa por uma aferição de medidas com o auxílio de um paquímetro e segue para realização dos ensaios. (Figura 4.4b – Provete pronto para ser ensaiado)

Como referido, cada ensaio corresponde a um conjunto de 2 provetes, preparados em simultâneo, procurando-se desta forma assegurar condições de reprodutibilidade, asseguradas através do critério de conformidade especificado na norma NP EN 206-1 (2007). Segundo esta norma, um ensaio é válido se os resultados individuais obtidos por cada amostra se encaixar dentro de um intervalo de variação de  $\pm 15\%$  em relação à média dos resultados. Devido à ausência de documentos que definam os critérios de conformidade para o ensaio do material em estudo, consideram-se como válidos os critérios especificados para o betão.

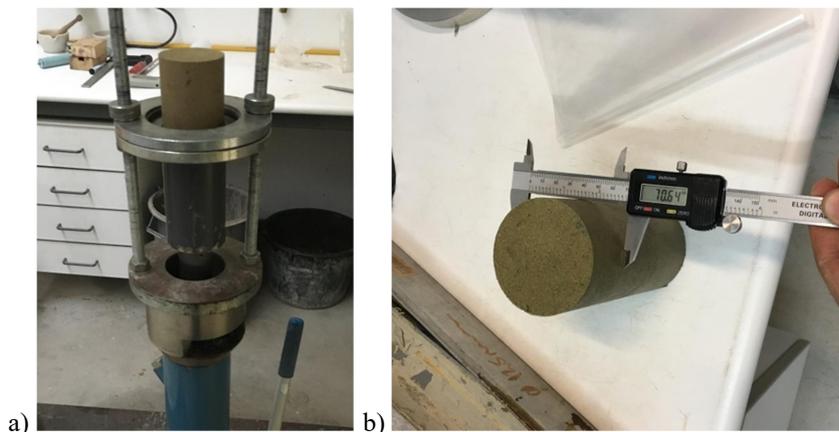


Figura 4.4 – Processo de extração do provete (a) e aferição das medidas (b) antes da realização do ensaio.

### 4.3 Plano de ensaios

Nos quadros 4.1 e 4.2 estão descritas as definições de ensaios que foram realizados com a finalidade de caracterizar os comportamentos dos provetes estabilizados quimicamente com diferentes teores de cimento Portland, quando reforçados com diferentes tipos de fibras, diferentes tempos de cura e sob diferentes tipos de carregamentos, monotônicos e dinâmicos.

No quadro 4.1 são descritos os ensaios de compressão simples não confinados (UCS), onde, de maneira a facilitar a identificação foi adotada uma nomenclatura que contemplasse todos os dados variantes nas misturas, dessa forma fica então da seguinte forma: ‘Ensaio\_Teor de ligante\_Tempo de cura\_Fibra\_Provete’. Ressaltando que será adotada para as fibras de polipropileno a nomenclatura de forma resumida como (PP), para as fibras de Sisal a nomenclatura de forma resumida como (SF) e quando não houver utilização de fibras não haverá descrição para designar. Como designação dos provetes, são descritos conforme o número do provete por par de ensaios, 1 ou 2.

No Quadro 4.2 encontram-se descritos os parâmetros bases dos ensaios cíclicos, sendo que para a definição do nível de tensão ( $q_u/q_{u\_max}$ ) e da amplitude de carga ( $\Delta q_u/q_{u\_max}$ ) foram utilizados os resultados encontrados para resistência à compressão não confinada obtida em ensaios UCS. Após realização do ensaio cíclico o provete é levado à rotura, para que seja possível se analisar seu comportamento após ações dinâmicas, essa ação foi realizada no mesmo equipamento de ensaios de compressão simples não confinada, tal procedimento será descrito posteriormente.

No quadro 4.3 são descritos os ensaios cíclicos (CIC), onde, de maneira a facilitar a identificação foi adotada uma nomenclatura que contemplasse todos os dados variantes nas misturas, dessa forma fica então da seguinte forma: ‘Ensaio\_Teor de ligante\_Frequência aplicada\_Fibra\_Provete’. Nos demais, a nomenclatura seguirá a ordem descrita no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Planos de ensaios de referência (UCS)

Dosagem de ligante (kg/m <sup>3</sup> )	Descrição do Ensaio	Tempo de cura (Dias)	Tipo de fibra	Dosagem da Fibra (kg/m <sup>3</sup> )
175	UCS_175_3_SF_1/2	3	Sisal	10
	UCS_175_7_SF_1/2	7		
	UCS_175_14_SF_1/2	14		
	UCS_175_28_SF_1/2	28		
	UCS_175_0_SF_1/2	0	PP	10
	UCS_175_3_PP_1/2	3		
	UCS_175_7_PP_1/2	7		
	UCS_175_14_PP_1/2	14		
125	UCS_125_3_SF_1/2	3	Sisal	10
	UCS_125_7_SF_1/2	7		
	UCS_125_14_SF_1/2	14		
	UCS_125_28_SF_1/2	28		
0	UCS_125_0_1/2	0		0
	UCS_SF_1/2	0	Sisal	10
	UCS_PP_1/2	0	PP	10
	UCS_SOLO_1/2	0		0

Quadro 4.2 – Parâmetros base utilizados nos ensaios cíclicos

Nº de Ciclos	5000
Frequência de aplicação da carga (Hz)	1
Nível de Tensão, $q_{u\_cic}/q_{u\_max}$ (%)	50%
Amplitude de carga, $\Delta q_u/q_{u\_max}$ (%)	±7,5
Dosagem de ligante (Kg/m <sup>3</sup> )	175/125
Dosagem de fibras (Kg/m <sup>3</sup> )	10
Tempo de cura (Dias)	28

De maneira a caracterizar o comportamento do provete em estudo, após a aplicação de cargas cíclicas foram realizados ensaios de compressão não confinados pós-cíclicos (UCSpc). O quadro 4.4 apresenta a descrição dos ensaios, onde com o intuito de facilitar a nomenclatura foi adotada uma forma que contemplasse todos os dados variantes nas misturas, ‘Ensaio\_Teor de ligante\_Frequência aplicada\_Fibra\_Provete’, o demais seguirá a ordem descrita para o quadro 4.1.

Quadro 4.3 – Plano de ensaios Cíclicos (CIC)

Dosagem de ligante (kg/m <sup>3</sup> )	Descrição do Ensaio	Frequência de aplicação da carga (Hz)	Amplitude de carga (%)	Tempo de cura (Dias)	Tipo de fibra	Dosagem da Fibra (kg/m <sup>3</sup> )
175	CIC_175_0,25_SF_1	0,25	7,5	28	Sisal	10
	CIC_175_1_SF_1/2	1				
	CIC_175_2_SF_1/2	2				
	CIC_175_4_SF_1/2	4				
	CIC_175_0,25_PP_1	0,25	7,5	28	PP	10
	CIC_175_1_PP_1/2	1				
	CIC_175_2_PP_1/2	2				
	CIC_175_4_PP_1/2	4				
	CIC_175_0,25_1/2	0,25	7,5	28		0
	CIC_175_1_1/2	1				
	CIC_175_2_1/2	2				
	CIC_175_4_1/2	4				
125	CIC_125_1_SF_1/2	1	7,5	28	Sisal	10
	CIC_125_1_1/2	1				0

Quadro 4.4 – Plano de ensaios Pós Cíclicos (PC)

Dosagem de ligante (kg/m <sup>3</sup> )	Descrição do Ensaio	Tempo de cura (Dias)	Tipo de fibra	Dosagem da Fibra (kg/m <sup>3</sup> )
175	PC_175_0,25_SF_1/2	0,25	Sisal	10
	PC_175_1_SF_1/2	1		
	PC_175_2_SF_1/2	2		
	PC_175_4_SF_1/2	4		
	PC_175_0,25_PP_1/2	0,25	PP	10
	PC_175_1_PP_1/2	1		
	PC_175_2_PP_1/2	2		
	PC_175_4_PP_1/2	4		
	PC_175_0,25_1/2	0,25		0
	PC_175_1_1/2	1		
	PC_175_2_1/2	2		
	PC_175_4_1/2	4		
125	PC_125_1_SF_1/2	1	Sisal	10
	PC_125_1_1/2	1		

#### 4.4 Ensaio de provetes e respectivo procedimento laboratorial

Como maneira de analisar o comportamento do material compósito sob ações monotónicas e seu desempenho tensão-deformação, além de se estimar o nível de tensão e amplitude de carga a aplicar nos demais ensaios, foram realizados ensaios de compressão simples (UCS) prévios. Posteriormente, foram realizados os ensaios cíclicos num equipamento cíclico. Após

a fase de carregamento cíclico, os provetes são descarregados e posteriormente submetidos a ensaios UCS (ensaio pós-cíclico, UCSpc). Esta sequência de ensaios pretende investigar o efeito do carregamento cíclico no comportamento mecânico do material em estudo.

#### 4.4.1 Ensaios de Compressão Simples (UCS)

Após o período de cura (3, 7, 14 e 28 dias), os provetes são retirados individualmente da câmara termohigrométrica, aferida a massa, desmoldados com auxílio do extrator hidráulico, devidamente retificados para aperfeiçoar a geometria cilíndrica e assim minimizar eventuais excentricidades quando submetido a carregamento axial, por fim determinadas altura e diâmetro dos provetes e segue-se para o ensaio.

Os ensaios de compressão simples (não confinados) monotônicos foram executados numa prensa (Tristar 5000kg Stepless Compression Test Machine do fabricante Wykeham Farrance - England) a uma velocidade de deformação constante de 0,35mm/min (0,25%/min em relação à altura do provete). Este valor foi adotado de forma conservativa, uma vez que as normas ASTM D2166 (2000) e BS 1377-7 (1990) indicam valores entre 0,5 e 2%/min, dado que quanto maior a velocidade de deformação maior a resistência mecânica (Teles, 2013).

Como é possível perceber, o ensaio de compressão simples foi realizado em todos os provetes, tanto os monotônicos de referência como os previamente submetidos à solicitação cíclica (UCSpc). Duas amostras são retiradas de cada provete após a rotura e vão à estufa durante 24 horas para determinação do teor em água final.

Durante o ensaio são registadas, de forma automática, os valores da força (N) e deformação vertical (mm) em intervalos de 3 segundos, com o auxílio de uma célula de carga e de um transdutor de deslocamento, respetivamente. A prensa utilizada para a realização destes ensaios pode ser observada na Figura 4.5.



Figura 4.5 – Prensa Tristar 5000kg Stepless Compression Test Machine

Como os ensaios de compressão simples não confinado (UCS) pretende-se avaliar a resistência à compressão não confinada ( $q_u$ ), extensão axial ( $\varepsilon_a$ ) e módulo de deformabilidade não drenado secante, definido para 50% da carga de rotura ( $E_{u50}$ ). E finalmente, de maneira complementar avalia-se o teor em água final para cada provete ( $w_f$ ).

No ensaio são registrados valores de força (N) e deformação vertical (mm) a partir de leituras realizadas a cada 3 segundos e com isso podemos calcular  $q_u$  através do quociente entre a força aplicada (F) e a área transversal do provete (A), a qual é corrigida em função da deformação axial experimentada pelo provete durante o ensaio (Head, 1985).

$$q_u = \frac{F}{A_{corr}} \text{ KPa} \quad (4.1)$$

Dessa maneira entende-se que ao ser carregada de forma não confinada, a amostra sofrerá deformações radiais, essa resulta numa nova área transversal definida pela equação a seguir.

$$A_{corr} = \frac{\pi * D^2}{4 * (1 - \frac{\varepsilon}{100})} \quad (4.2)$$

A partir da variação do deslocamento vertical ( $\Delta\delta v$ ) e da altura inicial do provete (h), assumindo a hipótese simplificativa de distribuição uniforme da deformação do provete, calcula-se a extensão axial.

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta\delta v}{h} * 100\% \quad (4.3)$$

A partir destes parâmetros calculados representa-se da curva tensão-extensão ( $q_u$ - $\varepsilon_a$ ) para cada provete. O valor máximo de tensão de compressão ( $q_{u\_max}$ ) é que caracteriza rotura do provete. Após a obtenção do gráfico tensão-extensão e para todos eles, foi necessário a correção do erro inicial (bedding error), que acontece devido o ajuste inicial realizado entre a prensa e o provete. A Figura 4.6 é capaz de ilustrar a ação realizada de correção do bedding error.

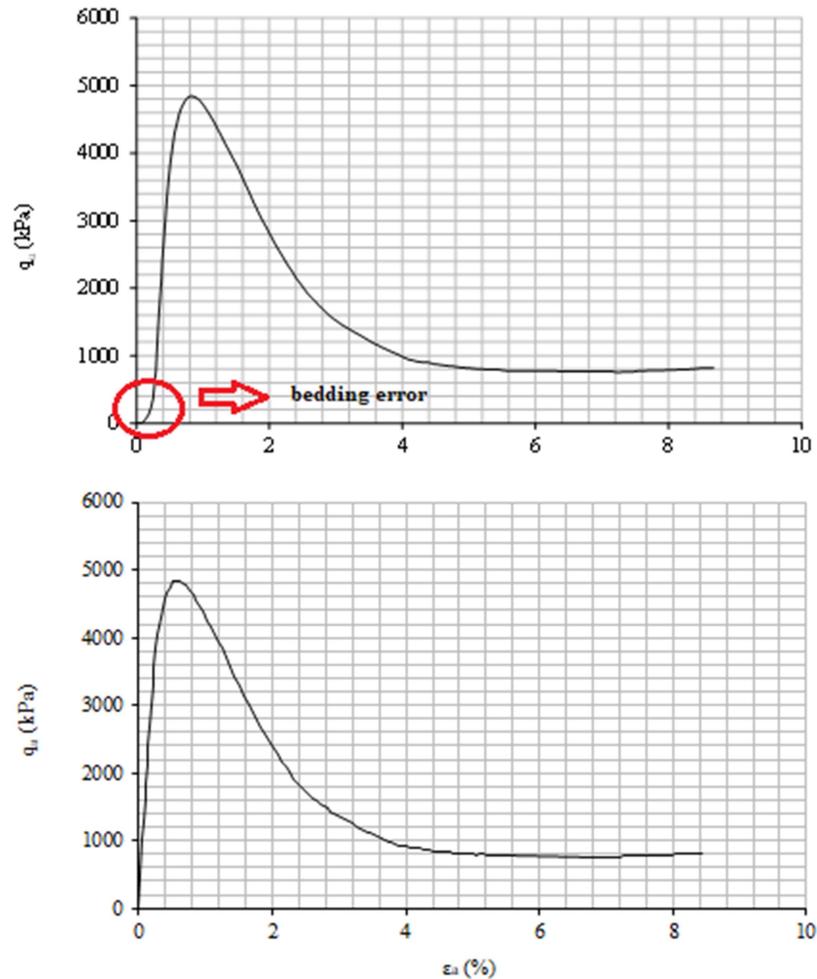


Figura 4.6 – Comparação entre curvas tensão-extensão com e sem correcção do “*bedding error*”, para o provete UCS\_175\_28\_PP\_1

A percepção do bedding error é facilitada no início da curva tensão-extensão devido a não linearidade dos pontos. É importante destacar o fato de essa ação de correção não influir de maneira a alterar a resistência máxima de tensão de compressão ( $q_{u\_max}$ ).

Posteriormente, ao longo da análise de resultados, serão apresentados quadros que resumem os valores encontrados, sejam eles, resistência à compressão não confinada ( $q_{u\_max}$ ), extensão axial de rotura ( $\epsilon_{a\_rot}$ ), módulo de deformabilidade ( $E_{u50}$ ) e o teor em água final ( $w_f$ ). São apresentados os valores obtidos em cada provete e respetiva média, incluindo ainda o desvio percentual face ao valor médio, avaliando-se desta forma o cumprimento do critério de conformidade.

#### 4.4.2 Ensaio Cíclico (CIC)

Passados os 28 dias de cura e após obtenção dos valores de  $q_{u\_max}$  a partir dos ensaios base UCS, os provetes são retirados da câmara termohigrométrica, passam pelo mesmo processo de tratamento e extração e são submetidos a carregamento cíclico, estes executados numa prensa de marca ELDYN com célula de carga com capacidade de 10KN, frequência máxima de 5 Hz e sensibilidade de 0,00010173 mm/contagem.

O procedimento do ensaio cíclico começa pela aplicação de carga no provete até um nível de tensão determinado inicialmente e em seguida inicia-se o carregamento cíclico. A definição dos parâmetros do ensaio, amplitude de carga, frequência de carga, número de ciclos e carregamento inicial antes dos ciclos são definidos através do software GDSLAB. Anteriormente tais valores foram citados e podem ser revistos de forma resumida nos quadros 4.2 e 4.3. O software citado fornece os dados através dos registos de força (KN) e deslocamento vertical (mm) ao longo do tempo. A Figura 4.7 mostra a prensa utilizada no estudo.



Figura 4.7 – Prensa ELDYN: a) Aparelhagem completa. b) Prensa (célula de carga com capacidade de 10 kN e 5 Hz)

Como mencionado nos quadros 4.2 e 4.3, nos ensaios foram fixados valores de níveis de tensão médios em 50% e amplitude de carga de  $\pm 7,5\%$ , estes relativos aos valores de  $q_{u\_max}$  obtidos nos ensaios UCS de referência. Estes provetes foram submetidos a 5000, ciclos, com frequência variando entre 0,25 Hz (ensaio de duração aproximada de 5,30 horas), 1 Hz (ensaio de duração aproximada de 1,5 horas), 2 Hz (ensaio de duração aproximada de 45 min) e 4 Hz (ensaio de duração aproximada de 22 min).

As Figuras 4.8 e 4.9 ilustram a precisão da prensa no controlo da força e deformação vertical durante o carregamento cíclico.

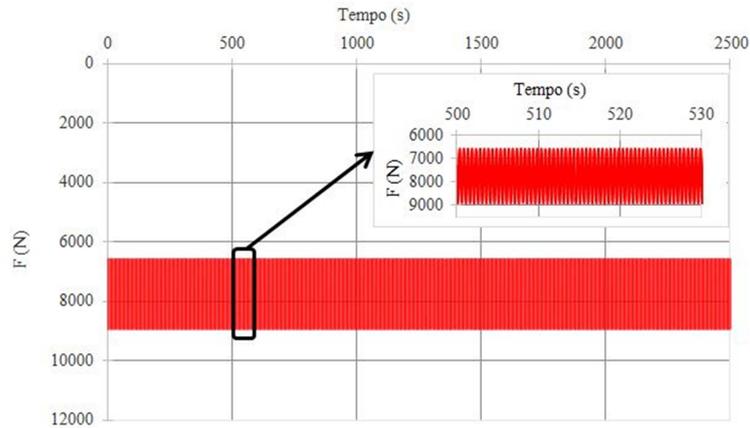


Figura 4.8 – Curva tipo de carregamento cíclico força-tempo para o provete CIC\_175\_2\_1

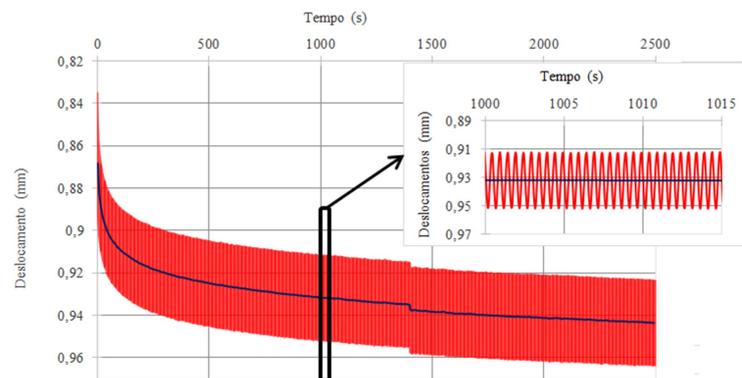


Figura 4.9 – Curva tipo deslocamento-tempo para o provete CIC\_175\_2\_1

De maneira geral entende-se que a prensa teve um bom comportamento nos ensaios cíclicos, apesar de suas limitações referentes à capacidade de carga, limitada nos 10 KN. Nos casos em que este limite foi ultrapassado, após a realização da fase cíclica, os provetes foram submetidos a ensaios UCS numa prensa com capacidade de carga de 50 KN.

## 5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### 5.1 Introdução

No decorrer deste capítulo analisados os resultados de ensaios UCS obtidos referente ao plano de ensaios descritos nos Quadros 4.1 a 4.4. Entre os fatores a serem analisados estão a resistência à compressão não confinada, análise de extensão axial de rotura ( $\epsilon_{a-rot}$ ), módulo de deformabilidade secante para um nível de tensão de 50% da tensão máxima ( $E_{u50}$ ), variação do teor em água final, comportamento durante a fase cíclica e pós-cíclica. Inicialmente analisam-se os resultados obtidos na caracterização do maciço terroso associado à inclusão de fibras. Posteriormente, associada à adição do ligante, comparam-se os resultados de compressão simples de referência com os ensaios de compressão simples pós-cíclicos (UCSp).

Como já mencionado anteriormente (secção 4.3), foram preparados um total de 74 provetes, levando em consideração os ensaios UCS e CIC para material composto de solo, ligante e fibra e suas variações.

### 5.2 Ensaios de Compressão Simples Monotônicos

#### 5.2.1 Caracterização do Comportamento do solo não estabilizado

Inicialmente realizaram-se ensaios para caracterizar o solo e suas variações obtidas através da inclusão das fibras de sisal e polipropileno com dosagem de  $10\text{kg/m}^3$  e na ausência da presença de ligante. O Quadro 5.1 e as Figuras 5.1 e 5.2 resumem os resultados obtidos por pares de provetes ensaiados a serem analisados, sendo evidenciada a grande influência positiva na adição de fibras.

Devido à ausência de ligante na mistura tornou-se desnecessário submeter os provetes à cura.

Quadro 5.1 – Resumo dos resultados obtidos da caracterização do solo natural e reforçado com diferentes tipos de fibras.

Ensaio	$q_{u\_max}$ (KPa)	$q_{u\_med}$ (KPa)	$\epsilon_{arot}$ (%)	$\epsilon_{arot\_med}$ (%)	$E_{u50}$ (MPa)	$E_{u50\_med}$ (MPa)	$W_f$ (%)	$W_{f\_med}$ (%)
UCS_SOLO	14,467	14,155	1,523	1,619	1,5631	1,392	14,12	14,01
	13,844		1,714		1,2211		13,90	
UCS_SF	57,673	55,631	2,372	2,336	3,3507	3,173	12,38	12,50
	53,588		2,300		2,9952		12,61	
UCS_PP	70,410	65,914	3,645	3,415	2,8151	2,934	13,36	12,77
	61,419		3,185		3,0528		12,18	

A Figura 5.1 apresenta os resultados obtidos a partir a adição de fibras de sisal e polipropileno ao solo em estudo.

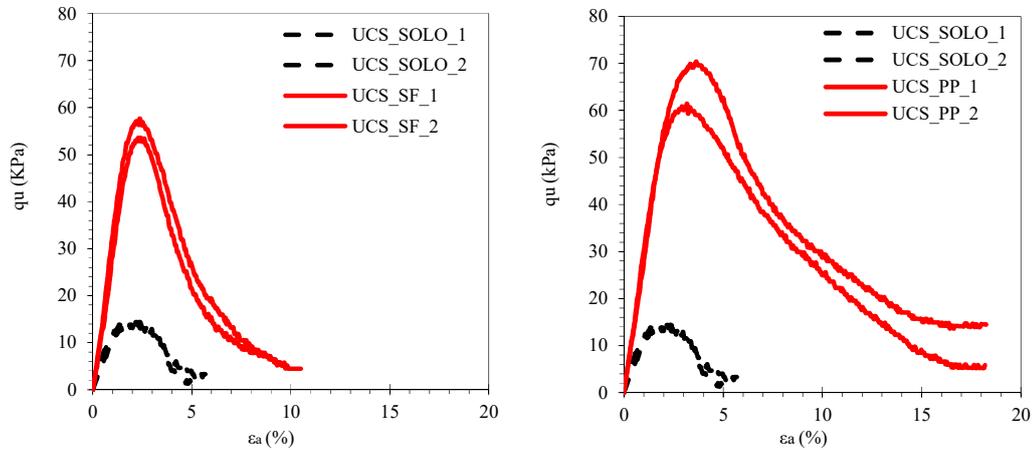


Figura 5.1 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre amostras de solo não reforçado e solo reforçado com fibras de sisal e polipropileno (descritas no Quadro 5.1).

Das curvas de tensão-extensão observa-se que as fibras têm um impacto no aumento da resistência do material à compressão, aumentando o valor da resistência máxima e da resistência residual. Os demais parâmetros em análise, nomeadamente a deformação na rotura, o módulo de deformabilidade não drenado e o teor em água final também sofrem alterações após a adição das fibras, nota-se um ganho para a deformação na rotura e para o módulo de deformabilidade, acompanhado da redução do teor em água final da mistura.

Quanto a análise da resistência pós-pico é possível notar-se que para os provetes sem fibras ( $DF=0\text{Kg/m}^3$ ) há uma perda total da resistência após atingido 5% da extensão axial. Já se tratando do solo como adição de fibras ( $DF=10\text{Kg/m}^3$ ) é perceptível, mesmo nas variações do tipo de fibra, entre Sisal e Polipropileno, um aumento na resistência de pico e na resistência pós rotura, este facto deve-se à mobilização da resistência à tração das fibras. O que acontece é que, com a mobilização da sua resistência, as fibras são capazes de originar uma redistribuição de esforços para zonas vizinhas, incrementando a resistência global.

É possível ainda analisar o comportamento entre os dois tipos de fibras, onde o Polipropileno além de originar um ligeiro aumento da resistência de pico na rotura em relação a utilização das fibras de sisal (Figura 5.2), também contribui para um aumento da resistência residual e do módulo de deformabilidade (Quadro 5.1). Quanto ao teor em água final ( $W_f$ ) não é notória uma capacidade de absorção de água das fibras.

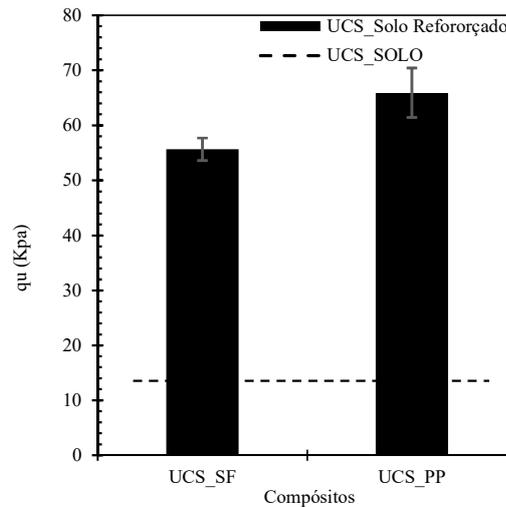


Figura 5.2 – Variação de  $q_{u\_max}$  entre os ensaios UCS realizados sobre amostras de solo não reforçado e solo reforçado com fibras de sisal e polipropileno.

### 5.2.2 Solo estabilizado não reforçado

Nesta seção analisa-se o comportamento do solo estabilizado para dosagens de ligante de  $125\text{Kg/m}^3$  e  $175\text{Kg/m}^3$ , em base nos resultados de ensaios UCS.

O Quadro 5.2 e a Figura 5.3 descrevem os resultados obtidos com as diferentes dosagens de ligante. Preliminarmente e analisando de maneira global é perceptível que há uma relação de proporcionalidade entre a dosagem de ligante e as características mecânicas ( $q_u$  e  $E_{u50}$ ), embora o comportamento tensão-extensão continue frágil.

No que se refere à resistência à compressão não confinada ( $q_{u\_max}$ ) nota-se um ganho substancial, atingindo-se mais que o dobro da resistência com o aumento da dosagem de 125 para  $175\text{ Kg/m}^3$ , além disso, houve um aumento da extensão axial de rotura ( $\epsilon_{arot}$ ) e do módulo de deformabilidade ( $E_{u50}$ ). Tal comportamento é justificado pela ação do aumento de ligante na mistura, o qual é responsável pelo desenvolvimento de um maior número de reações de hidratação, as quais estão associadas a um maior consumo de água, tal como constatado (Quadro 5.2).

Quadro 5.2 – Estabilização do solo com CI42,5 R aplicado com dosagens de 125 e 175  $\text{kg/m}^3$  (tempo de cura =28 dias).

Ensaio	$q_{u\_max}$ (KPa)	$q_{u\_med}$ (KPa)	$\epsilon_{arot}$ (%)	$\epsilon_{arot\_med}$ (%)	$E_{u50}$ (MPa)	$E_{u50\_med}$ (MPa)	$W_f$ (%)	$W_{f\_med}$ (%)
UCS_125_28	2328,131	2288,52	0,623	0,5819	614,168	670,541	11,52	11,33
	2248,907		0,541		726,914		11,13	
UCS_175_28	4715,441	4509,02	0,727	0,7650	970,025	1049,06	11,09	11,13
	4302,600		0,803		1128,10		11,16	

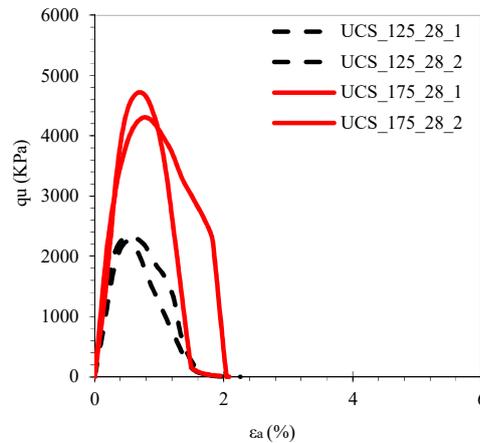


Figura 5.3 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre amostras de solo estabilizado com ligante C142,5 R, aplicado em dosagens 125 e 175 kg/m<sup>3</sup>.

### 5.2.3 Solo estabilizado e reforçado

Como descrito na secção 4.3, foram realizadas ensaios de provetes estabilizados com ligante (125kg/m<sup>3</sup> e 175kg/m<sup>3</sup>) e reforçados com fibras de Sisal (DF=10Kg/m<sup>3</sup>) e de Polipropileno (DF=10Kg/m<sup>3</sup>).

O Quadro 5.3 apresenta os resultados dos ensaios de provetes com adição ligante e fibras, com tempos de cura de 28 dias.

Analisando o Quadro 5.3 observa-se um ganho de resistência à compressão não confinada derivado da inclusão das fibras, sendo este efeito mais pronunciado para o caso de menor dosagem cimentícia (cerca de 10% de aumento), o que confirma o facto de a alta dosagem cimentícia ser fator condicionante em termos de mobilização das fibras. Ainda do Quadro é possível notar o aumento do módulo de deformabilidade ( $E_{u50}$ ) como resultado da inclusão de fibras. Quanto ao teor em água final ( $W_f$ ), não existe variações apreciáveis devido ao tipo de fibra.

Quadro 5.3 – Estabilização do solo com CI42,5 R aplicado com dosagens de 125 e 175 kg/m<sup>3</sup> reforçados com fibras de Sisal e Polipropileno (DF=10Kg/m<sup>3</sup>; tempo de cura =28 dias)

Ensaio	q <sub>u_max</sub> (KPa)	q <sub>u_med</sub> (KPa)	ε <sub>arot</sub> (%)	ε <sub>arot_med</sub> (%)	E <sub>u50</sub> (MPa)	E <sub>u50_med</sub> (MPa)	W <sub>f</sub> (%)	W <sub>f_med</sub> (%)
UCS_125_28	2328,131	2288,52	0,623	0,5819	614,168	670,541	11,52	11,33
	2248,907		0,541		726,914		11,13	
UCS_175_28	4715,441	4509,02	0,727	0,7650	970,025	1049,06	11,09	11,13
	4302,600		0,803		1128,10		11,16	
UCS_125_28_SF	2767,847	2736,49	0,509	0,6024	841,800	779,165	11,74	11,38
	2705,125		0,696		716,529		11,02	
UCS_175_28_SF	5172,297	5111,29	0,381	0,4234	2443,34	2229,810	9,27	10,00
	5050,275		0,466		2016,28		10,73	
UCS_175_28_PP	4646,885	4746,10	0,728	0,6474	1137,88	1416,94	10,29	10,24
	4845,314		0,567		1696,00		10,19	

A Figura 5.5 ilustra a comparação do comportamento tensão-extensão obtido em ensaios UCS dos provetes com uma dosagem de ligante de 125Kg/m<sup>3</sup> não reforçado e reforçados com fibras de sisal (DF=10Kg/m<sup>3</sup>).

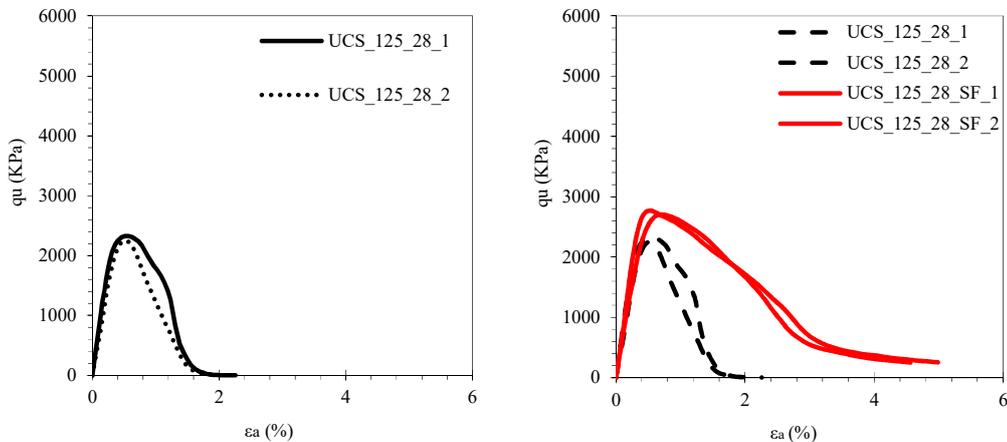


Figura 5.4 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre amostras de solo estabilizado com ligante C142,5 R, dosagem 125kg/m<sup>3</sup>, sem e com reforço de fibras de sisal.

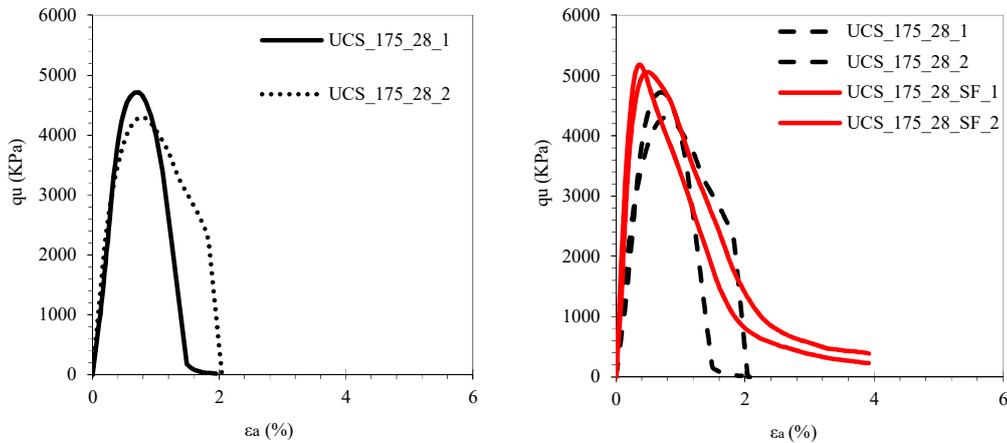


Figura 5.5 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre amostras de solo estabilizado com ligante C142,5 R, dosagem de 175kg/m<sup>3</sup>, sem e com reforço de fibras de sisal.

Em análise aos resultados expressos pelos gráficos na Figura 5.4 e pelo Quadro 5.3, é perceptível que o efeito das fibras de sisal traduz-se num aumento de  $q_{u\_max}$  e da  $q_{u\_residual}$ . Quanto à rigidez inicial, não existe diferenças apreciáveis, dado que esta é fortemente condicionada pela matriz cimentícia, sendo que as fibras apenas entram em funcionamento para um maior nível de deformação, não se notando o seu efeito para níveis de deformação reduzidos.

A Figura 5.5 ilustra o comportamento do material compósito com uma dosagem cimentícia para 175kg/m<sup>3</sup> reforçados ou não com fibras de sisal (DF=10kg/m<sup>3</sup>).

Das curvas de tensão representadas na Figura 5.5 é possível visualizar que o efeito da presença de fibras de sisal é ligeiro, apesar de haver um ganho de resistência, a matriz do material é muito rígida devido a maior dosagem de ligante, como tal, as fibras acabam por não entrar em funcionamento ao nível das pequenas deformações, isto é, até a rotura.

Na Figura 5.6 compara-se o comportamento das fibras de sisal para diferentes dosagens de ligantes. Como referido anteriormente, o aumento da dosagem de ligante condiciona o comportamento da matriz, a qual é mais rígida, impossibilitando a mobilização da resistência à tração das fibras, em oposição ao que acontece para os provetes com menor dosagem, onde é possível notar a influência das fibras, em termos de um comportamento mais dúctil após a rotura.

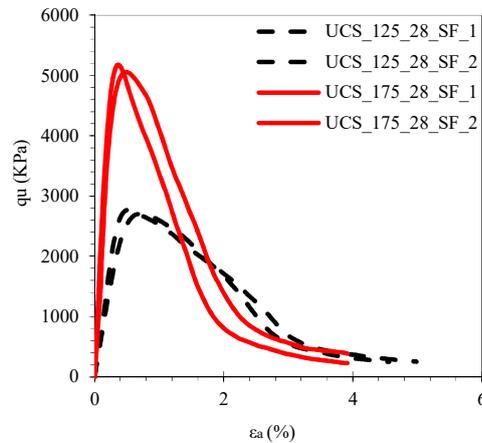


Figura 5.6 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre amostras de solo estabilizado com ligante C142,5 R, aplicado com dosagens de 125 e 175 kg/m<sup>3</sup>, sem e com reforço de fibras de sisal.

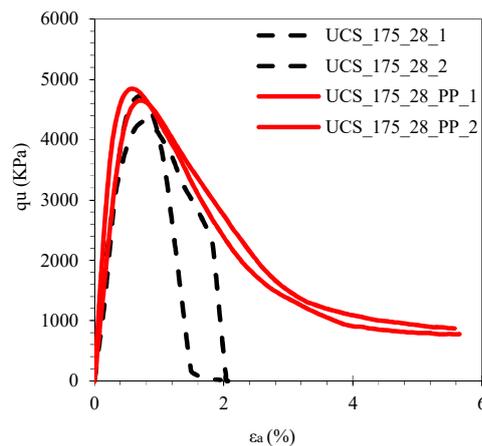


Figura 5.7 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre amostras de solo estabilizado com ligante C142,5 R, dosagem de 175kg/m<sup>3</sup>, sem e com reforço de fibras de polipropileno.

Relativamente à inclusão das fibras de Polipropileno o efeito dessas é negligenciável para a dosagem de ligante (175Kg/m<sup>3</sup>(Figura 5.7)), tal como acontece com as fibras de Sisal. O principal benefício da inclusão das fibras para esta dosagem traduz-se na alteração do comportamento pós-rotura, o qual na presença de fibras de Polipropileno é agora mais dúctil (existe uma resistência residual).

#### 5.2.4 Influência do tempo de cura

No capítulo 2 salientamos a importância do tempo de cura no impacto sob as características mecânicas do solo estabilizado. As reações pozolânicas desenvolvem-se ao longo dos dias,

meses ou até mesmo por anos. Devido a isso, é importante uma análise sobre a influência do tempo na evolução do comportamento mecânico do solo estabilizado.

O efeito do tempo de cura foi estudado para diferentes instantes temporais (3, 7, 14 e 28 dias). Os Quadros 5.4 a 5.8 resumem os resultados obtidos para as amostras.

Numa primeira análise global dos resultados constata-se com o aumento do tempo de cura, a melhoria do comportamento mecânico dos provetes, traduzido por um ganho de resistência à compressão não confinada ( $q_{u\_max}$ ) e um aumento do módulo de deformabilidade ( $E_{u50}$ ). De facto, o aumento do tempo de cura potencializa o desenvolvimento das reações cimentícias, nomeadamente das reações pozolânicas (que ocorrem ao longo do tempo), levando ao aumento das propriedades mecânicas. A variação do teor em água ao longo do tempo é negligenciável.

As Figuras 5.8 a 5.12 mostram a resistência à compressão não confinada ( $q_{u\_max}$ ) com o logaritmo do tempo de cura. A partir destas é possível tirar a conclusão de que a  $q_{u\_max}$  cresce praticamente de forma linear com o logaritmo do tempo de cura. Dessa maneira foi possível se obter diferentes regressões para os materiais compósitos em estudo, podendo essa ser aplicada na previsão da resistência à compressão não confinada no tempo.

Quadro 5.4 – Resultados dos solos estabilizados com ligante, dosagem de 125kg/m<sup>3</sup> sem reforço, tempo de cura como variante.

Ensaio	$q_{u\_max}$ (KPa)	$q_{u\_med}$ (KPa)	$\epsilon_{arot}$ (%)	$\epsilon_{arot\_med}$ (%)	$E_{u50}$ (MPa)	$E_{u50\_med}$ (MPa)	$W_f$ (%)	$W_{f\_med}$ (%)
UCS_125_3	1729,620	1606,65	0,681	0,5486	291,021	379,325	12,21	11,79
	1483,673		0,416		467,630		11,37	
UCS_125_7	2029,721	1897,81	0,670	0,6840	483,274	401,385	11,37	11,36
	1765,905		0,698		319,496		11,35	
UCS_125_14	2196,572	2151,35	0,589	0,6417	541,820	477,809	11,63	11,33
	2106,137		0,695		413,797		11,02	
UCS_125_28	2328,131	2288,52	0,623	0,5819	614,168	670,541	11,52	11,33
	2248,907		0,541		726,914		11,13	

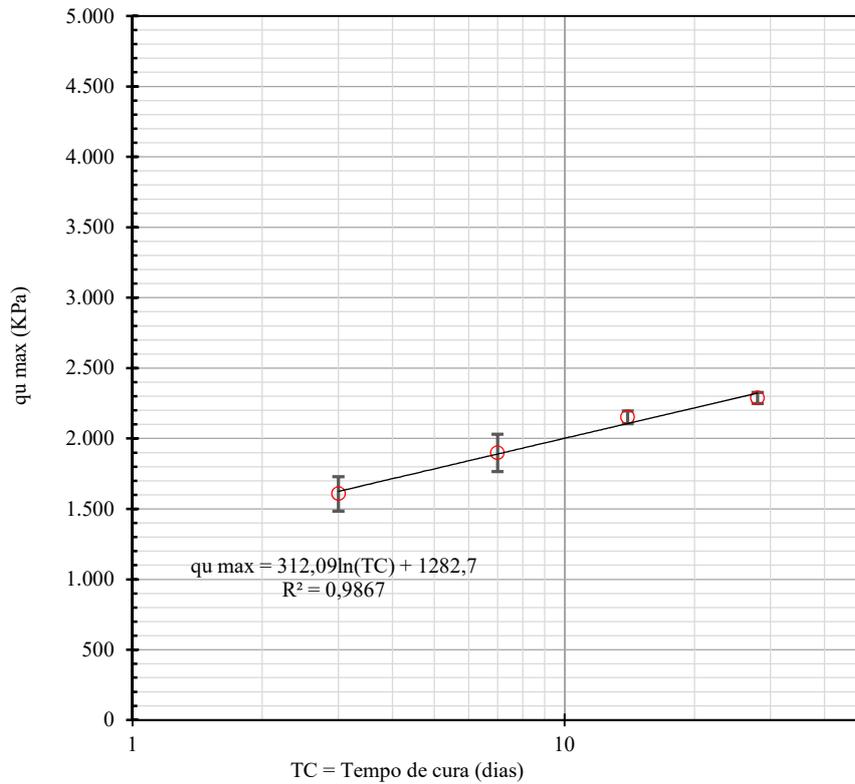


Figura 5.8 – Resistência à compressão não confinada ( $q_{u\ max}$ ) com o logaritmo do tempo de cura de solo estabilizado com ligante, dosagem de 125kg/m<sup>3</sup> sem reforço.

Quadro 5.5 – Resultados dos solos estabilizados com ligante, dosagem de 125kg/m<sup>3</sup> com reforço de fibras de sisal, tempo de cura como variante.

Ensaio	$q_{u\ max}$ (KPa)	$q_{u\ med}$ (KPa)	$\epsilon_{arot}$ (%)	$\epsilon_{arot\ med}$ (%)	$E_{u50}$ (MPa)	$E_{u50\ med}$ (MPa)	$W_f$ (%)	$W_{f\ med}$ (%)
UCS_125_3_SF	760,717	834,63	1,443	1,2665	185,518	286,183	12,26	12,14
	908,545		1,080		386,849		12,03	
UCS_125_7_SF	1471,892	1494,65	0,771	0,7466	359,582	357,792	11,33	11,49
	1517,402		0,7223		356,002		11,65	
UCS_125_14_SF	2591,667	2620,92	0,555	0,5834	841,918	798,365	11,74	11,44
	2650,183		0,6114		754,813		11,15	
UCS_125_28_SF	2767,847	2736,49	0,509	0,6024	841,800	779,165	11,74	11,38
	2705,125		0,696		716,529		11,02	

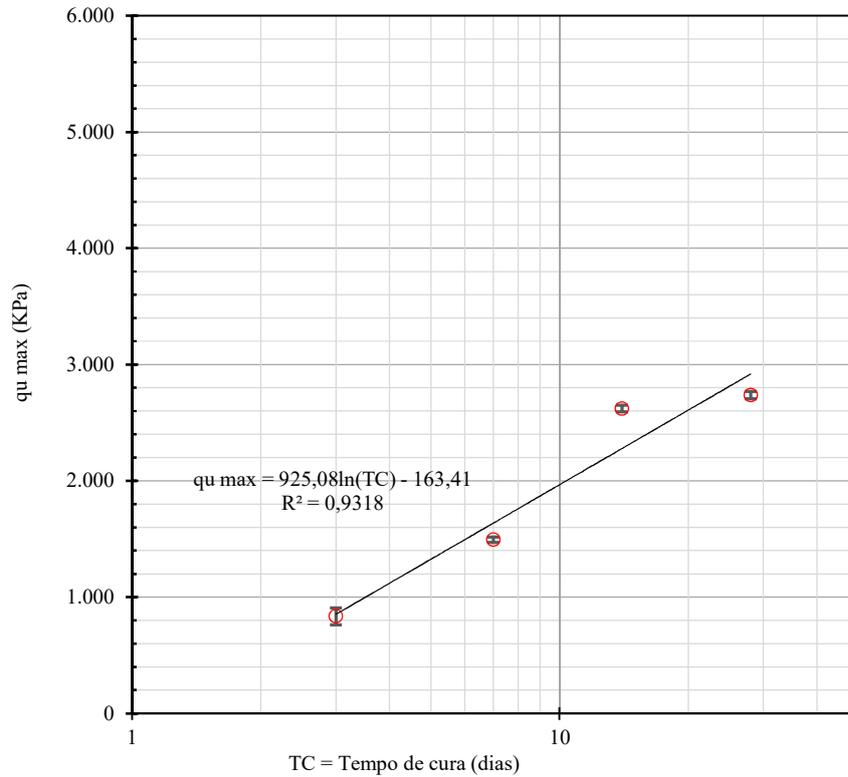


Figura 5.9 – Resistência à compressão não confinada ( $q_{u\ max}$ ) com o logaritmo do tempo de cura de solo estabilizado com ligante, dosagem de 125kg/m<sup>3</sup> com reforço de fibras de sisal.

Quadro 5.6 – Resultados dos solos estabilizados com ligante, dosagem de 175kg/m<sup>3</sup> sem reforço, tempo de cura como variante.

Ensaio	$q_{u\ max}$ (KPa)	$q_{u\ med}$ (KPa)	$\epsilon_{arot}$ (%)	$\epsilon_{arot\ med}$ (%)	$E_{u50}$ (MPa)	$E_{u50\ med}$ (MPa)	$W_f$ (%)	$W_{f\ med}$ (%)
UCS_175_3	3229,731	2903,51	0,588	0,5298	546,048	609,566	12,21	11,79
	2577,295		0,472		673,084		11,37	
UCS_175_7	3614,492	3570,26	0,676	0,6419	565,745	659,544	11,46	11,48
	3526,028		0,608		753,343		11,50	
UCS_175_14	4095,089	4011,05	0,629	0,7109	1606,25	1076,77	11,27	11,28
	3924,788		0,830		547,289		11,29	
UCS_175_28	4715,441	4509,02	0,727	0,7650	970,025	1049,06	11,09	11,13
	4302,600		0,803		1128,10		11,16	

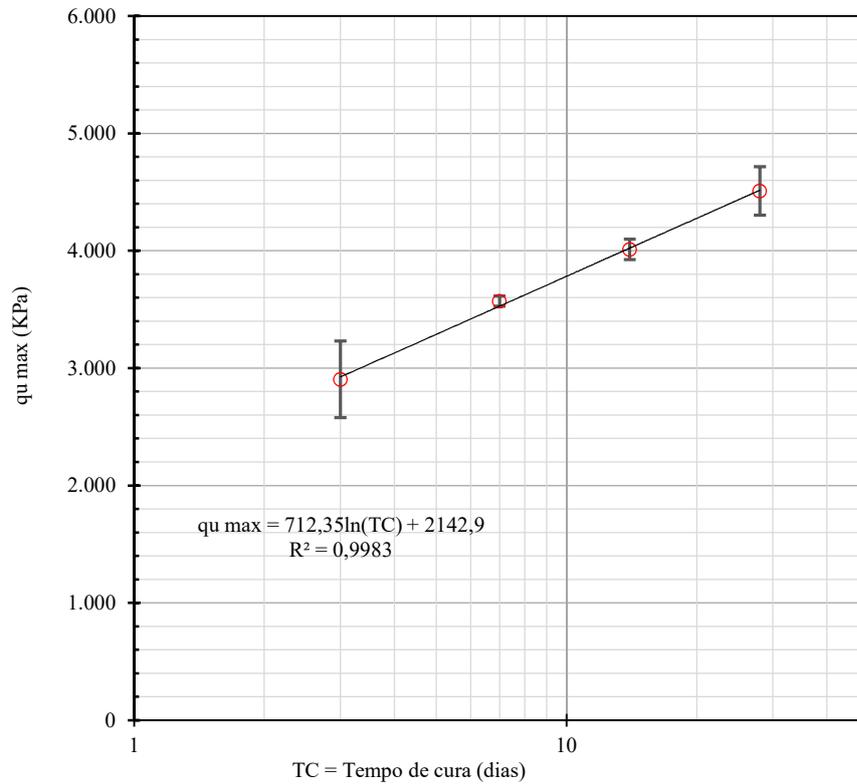


Figura 5.10 – Resistência à compressão não confinada ( $q_{u\ max}$ ) com o logaritmo do tempo de cura de solo com ligante, dosagem de 175kg/m<sup>3</sup> sem reforço.

Quadro 5.7 – Resultados dos solos estabilizados com ligante, dosagem de 175kg/m<sup>3</sup> com reforço de fibras de sisal, tempo de cura como variante.

Ensaio	$q_{u\ max}$ (KPa)	$q_{u\ med}$ (KPa)	$\epsilon_{arot}$ (%)	$\epsilon_{arot\ med}$ (%)	$E_{u50}$ (MPa)	$E_{u50\ med}$ (MPa)	$W_f$ (%)	$W_{f\ med}$ (%)
UCS_175_3_SF	2392,704	2306,98	0,940	0,8217	593,428	562,164	11,07	11,10
	2221,264		0,704		530,900			
UCS_175_7_SF	3677,822	3682,74	0,602	0,6152	858,375	829,764	10,78	10,96
	3687,658		0,628		801,154			
UCS_175_14_SF	3925,431	3819,58	0,608	0,8439	1010,95	851,593	9,83	10,01
	3713,724		1,080		692,234			
UCS_175_28_SF	5172,297	5111,29	0,381	0,4234	2443,34	2229,810	9,27	10,00
	5050,275		0,466		2016,28			

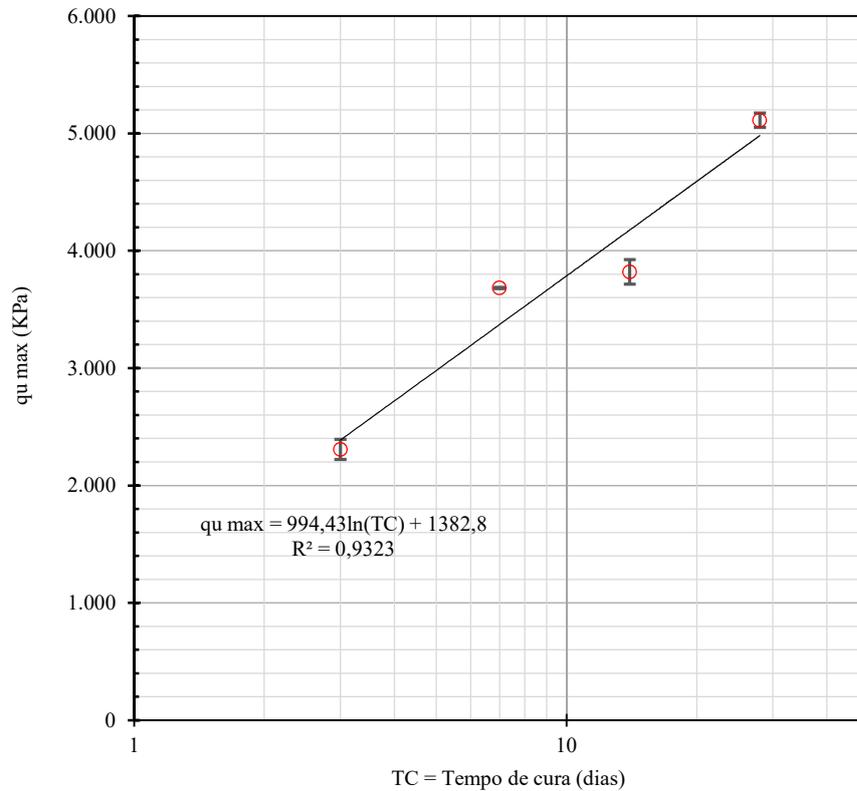


Figura 5.11 – Resistência à compressão não confinada ( $q_{u\_max}$ ) com o logaritmo do tempo de cura de solo com ligante, dosagem de  $175\text{kg/m}^3$  com reforço de fibras de sisal.

Quadro 5.8 – Resultados dos solos estabilizados com ligante, dosagem de  $175\text{kg/m}^3$  com reforço de fibras de polipropileno, tempo de cura como variante.

Ensaio	$q_{u\_max}$ (KPa)	$q_{u\_med}$ (KPa)	$\epsilon_{arot}$ (%)	$\epsilon_{arot\_med}$ (%)	$E_{u50}$ (MPa)	$E_{u50\_med}$ (MPa)	$W_f$ (%)	$W_{f\_med}$ (%)
UCS_175_3_PP	3198,361	3469,52	0,947	0,8968	632,678	742,052	10,69	10,89
	3740,670		0,847		851,426			
UCS_175_7_PP	3884,783	4090,78	1,490	1,2312	437,302	698,124	10,69	10,46
	4296,770		0,973		958,947			
UCS_175_14_PP	4315,035	4448,61	1,149	1,1179	592,603	660,998	9,63	10,21
	4582,189		1,087		729,393			
UCS_175_28_PP	4646,885	4746,10	0,728	0,6474	1137,88	1416,94	10,29	10,24
	4845,314		0,567		1696,00			

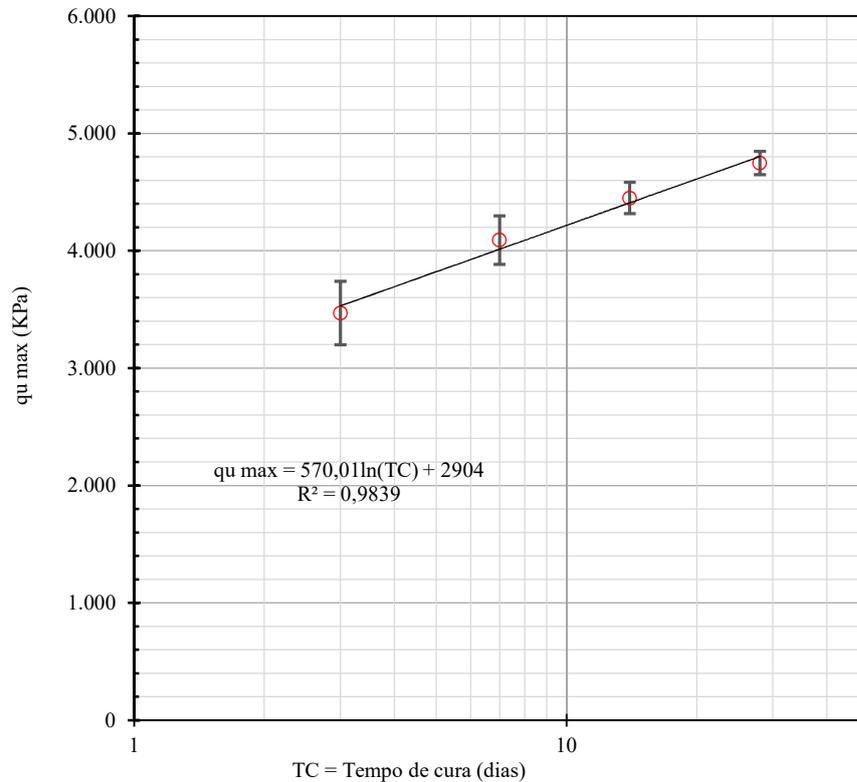


Figura 5.12 – Resistência à compressão não confinada ( $q_{u\_max}$ ) com o logaritmo do tempo de cura de solo com ligante, dosagem de  $175\text{kg/m}^3$  com reforço de fibras de polipropileno.

A Figura 5.13 compara o comportamento dos variados materiais compósitos em termos da resistência à compressão não confinada ( $q_{u\_max}$ ) para diversos tempos de cura. Nota-se que até os 7 dias de cura os provetes reforçados com sisal não conseguem atingir grandes resistências, se comparados com as demais misturas. Tendo em conta a capacidade de absorção das fibras de Sisal (Anexo B), é expectável que à curto prazo, a quantidade de água disponível para o estabelecimento de reações de hidratação cimentícias não seja suficiente para o desenvolvimento completo destas, o que pode ter haver com os valores de resistência inferiores. Posteriormente os provetes reforçados com sisal, com a chegada dos períodos de 14 e 28 dias, vão obtendo ganhos de resistência em larga escala e chegam a superar os demais.

Para o caso do reforço de polipropileno, é notado um grande aumento da resistência já desde os 3 dias de tempo cura, chegando aos 28 dias capaz de superar em resistência as matrizes sem reforço.

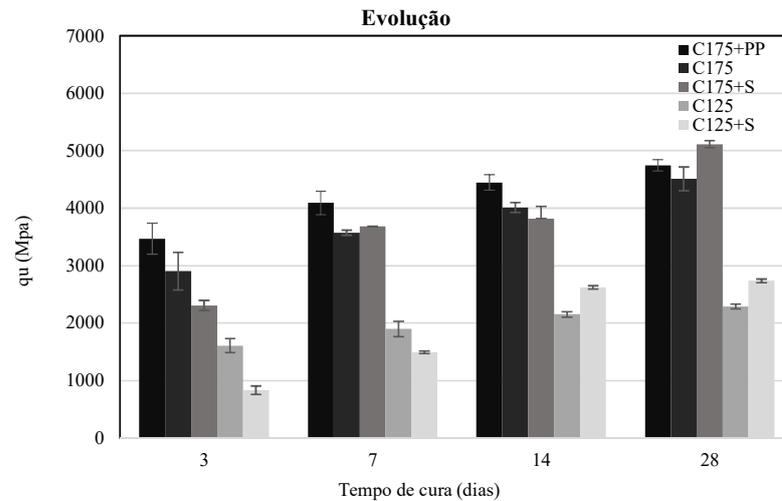


Figura 5.13 – Evolução da resistência à compressão ( $q_{u\_max}$ ) para as variações de materiais compósitos de acordo com o tempo de cura.

### 5.3 Ensaio de Carga Cíclica

A descrição e análise dos resultados é realizada de modo a estudar o efeito da frequência (0,25Hz, 1Hz, 2Hz e 4Hz) de aplicação de carga no comportamento obtido. Os ensaios de carga cíclica tiveram como características base de execução um número de 5000 ciclos, nível de tensão de 50% da carga de ruptura ( $q_{u\_max}$ ), amplitude de  $\pm 7,5\%$  e frequência de 1Hz. Os compósitos em análise possuem uma dosagem de ligante de  $175\text{Kg/m}^3$ , com adição ou não de fibras, tanto de Sisal quanto de Polipropileno. O Quadro 5.9 resume as condições dos ensaios cíclicos para os diferentes tipos de compósitos.

Quadro 5.9 – Caracterização dos materiais compósitos estabilizados e reforçados.

Ensaio	Resultados Ensaio UCS		Parâmetros Ensaio CIC			
	$F_{max}$ (N)	$q_{u\_max}$ (KPa)	50% $F_{max}$ (KN)	Amplitude: $\pm 7,5\% F_{max}$ (KN)	$F_{max}$ (KN)	$F_{min}$ (KN)
<b>CIC_125</b>	9258,521 8772,971	2328,131 2248,907	4,51	0,68	5,18	3,83
<b>CIC_125_SF</b>	10811,269 10100,713	2767,847 2705,125	5,23	0,78	6,01	4,44
<b>CIC_175</b>	18399,086 17115,237	4715,441 4302,600	8,88	1,33	10,21	7,55
<b>CIC_175_SF</b>	20083,425 19803,618	5172,297 5050,275	9,97	1,49	11,46	8,48
<b>CIC_175_PP</b>	18434,754 19021,812	4646,885 4845,314	9,36	1,40	10,77	7,96

### 5.3.1 Condições base

A evolução das deformações axiais acumuladas durante o número de ciclos nos ensaios estão ilustradas nas Figuras 5.14 e 5.15.

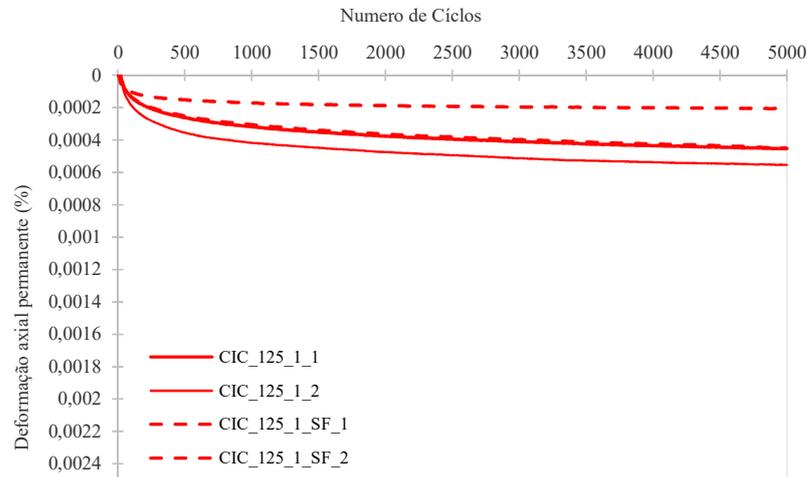


Figura 5.14 – Curvas deformação axial permanente - número de ciclos de ensaios Cíclicos, com frequência de 1Hz, realizados sobre amostras de solo estabilizado com ligante, dosagem de 125kg/m<sup>3</sup>, sem e com reforço de fibras de sisal.

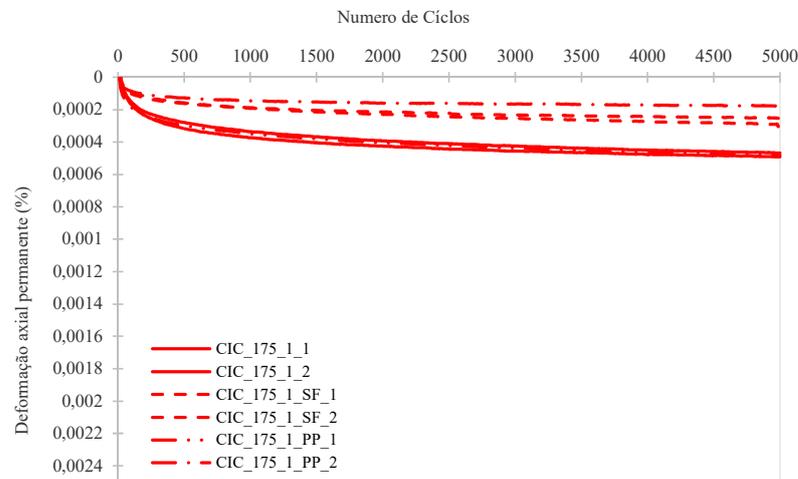


Figura 5.15 – Curvas deformação axial permanente - número de ciclos de ensaios Cíclicos, com frequência de 1Hz, realizados sobre amostras de solo estabilizado com ligante, dosagem de 175kg/m<sup>3</sup>, sem e com reforço de fibras de sisal e polipropileno.

Para todos os ensaios realizados com as condições base notou-se um comportamento parecido na evolução das deformações axiais acumuladas, onde até os primeiros 500 ciclos regista-se uma descida abrupta na fase inicial e posteriormente uma estabilização com o incremento do número de ciclos. Em média nota-se para os provetes com presença de fibras, independentemente da dosagem de ligante e principalmente para as fibras de sisal, notam-se

menores deformações axiais acumuladas, o que indica uma contribuição positiva das fibras no comportamento do solo sob solicitações cíclicas.

A Figura 5.16 ilustra o comportamento da evolução da deformação axial no desenvolvimento do ensaio cíclico dos provetes com e sem reforço de fibras de sisal e polipropileno, fazendo uma comparação entre os valores obtidos nos ensaios cíclicos e valores dos ensaios UCS monotônicos. Foi adotada a referência “Pré-Cíclico” aos resultados das deformações axiais durante a fase de aplicação de carga correspondente aos 50% de  $q_{u\_max}$  do UCSref.

A partir da Figura 5.16 podemos notar de forma mais clara, o bom comportamento dos provetes reforçados com fibras, principalmente para o caso do sisal. Este quando comparado com os materiais compósitos sem reforço, no desenvolvimento do ensaio cíclico, demonstra uma menor deformação axial.

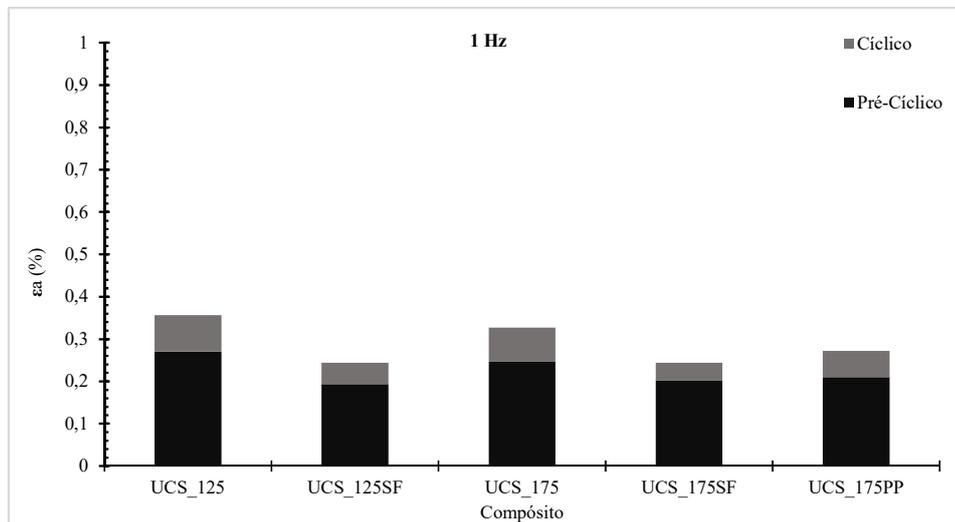


Figura 5.16 – Evolução da deformação axial permanente para a frequência de 1Hz e aplicação de 5000 ciclos.

### 5.3.2 Variações Cíclicas

Assim como no carregamento cíclico sob as condições base, nas variações também nota-se o para todos os ensaios realizados um comportamento parecido na evolução das deformações axiais acumuladas, onde até os primeiros 500 ciclos regista-se uma descida abrupta na fase inicial e posteriormente uma estabilização com o incremento do número de ciclos.

A Figura 5.17 mostra a curva referente à deformação axial acumulada em função do número de ciclos para a aplicação de frequência de 0,25 Hz.

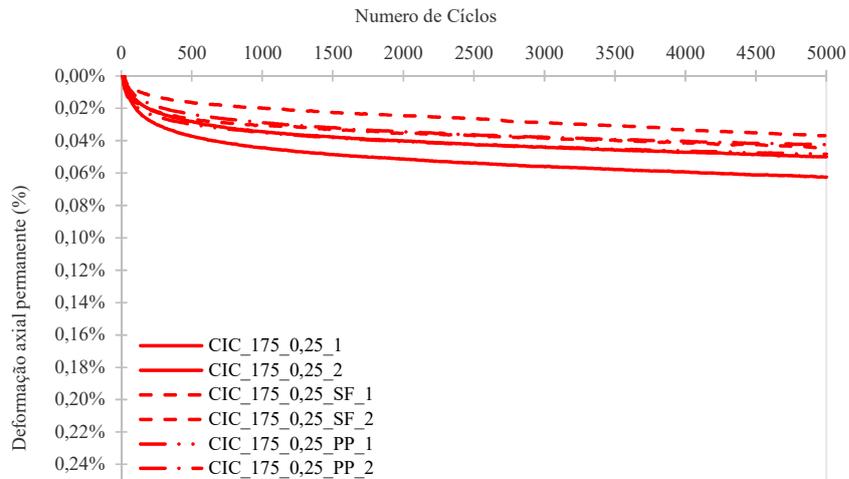


Figura 5.17 – Curvas deformação axial permanente - número de ciclos de ensaios Cíclicos, com frequência de 0,25Hz, realizados sobre amostras de solo estabilizado com ligante, dosagem de 175kg/m<sup>3</sup>, sem e com reforço de fibras de sisal e polipropileno.

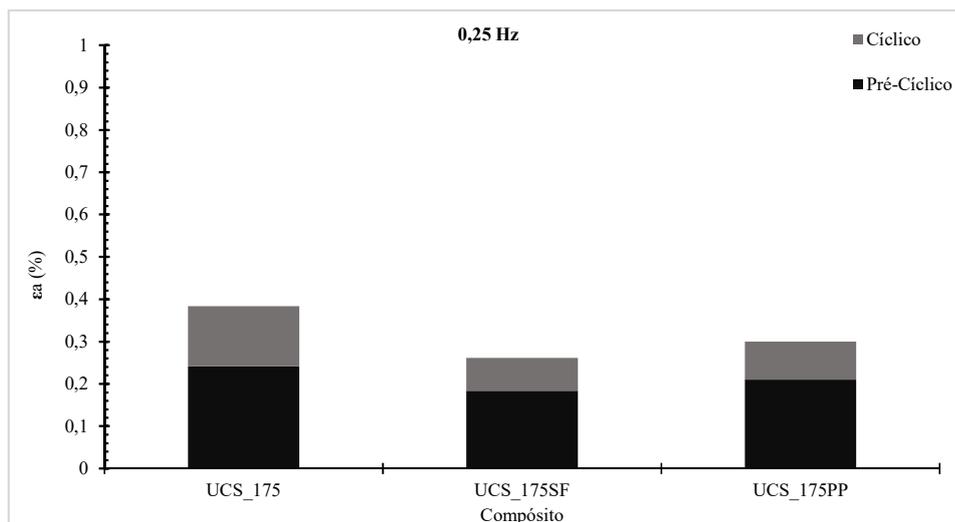


Figura 5.18 – Evolução da deformação axial permanente para a frequência de 0,25Hz e aplicação de 5000 ciclos.

A Figura 5.18 ilustra o comportamento da evolução da deformação axial no desenvolvimento do ensaio cíclico dos provetes com e sem reforço de fibras de sisal e polipropileno, fazendo uma comparação entre os valores obtidos nos ensaios cíclicos, frequência de 0,25Hz.

Em análise ao comportamento dos compósitos sujeitos a uma frequência de 0,25Hz nota-se de imediato um comportamento positivo com relação à adição de fibras aos compósitos, sejam elas Sisal ou Polipropileno, são capazes de reduzir a deformação axial acumulada no ensaio.

A partir da Figura 5.18 podemos notar ainda, de forma mais clara, o bom comportamento dos provetes reforçados com fibras, principalmente para o caso do sisal. Este quando comparado

aos provetes sem reforço, no desenvolvimento do ensaio cíclico, demonstra uma menor deformação axial.

A Figura 5.19 resume o comportamento dos materiais compósitos, através da curva referente à deformação axial acumulada em função do número de ciclos para a aplicação de frequência de 2 Hz.

Desta (Figura 5.19) é possível ressaltar, assim como para frequência de 0,25Hz, um excelente comportamento para os materiais compósitos reforçados com fibras de Sisal e Polipropileno.

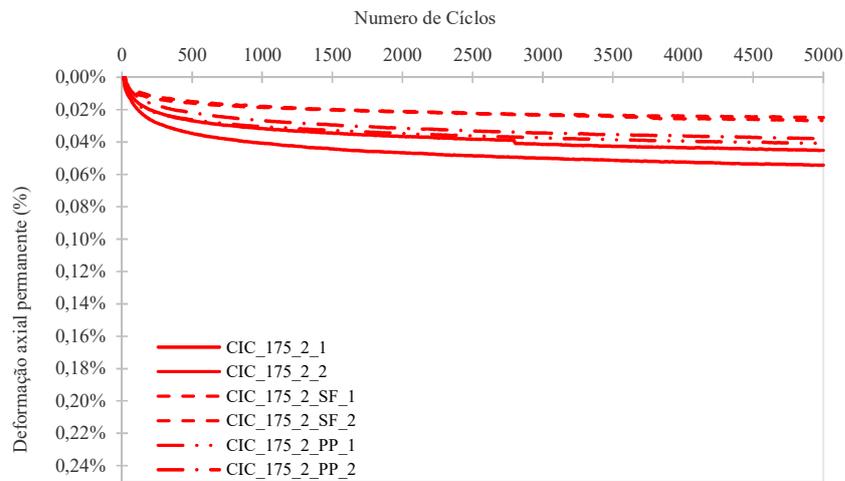


Figura 5.19 – Curvas deformação axial permanente - número de ciclos de ensaios Cíclicos, com frequência de 2Hz, realizados sobre amostras de solo estabilizado com ligante, dosagem de 175kg/m<sup>3</sup>, sem e com reforço de fibras de sisal e polipropileno.

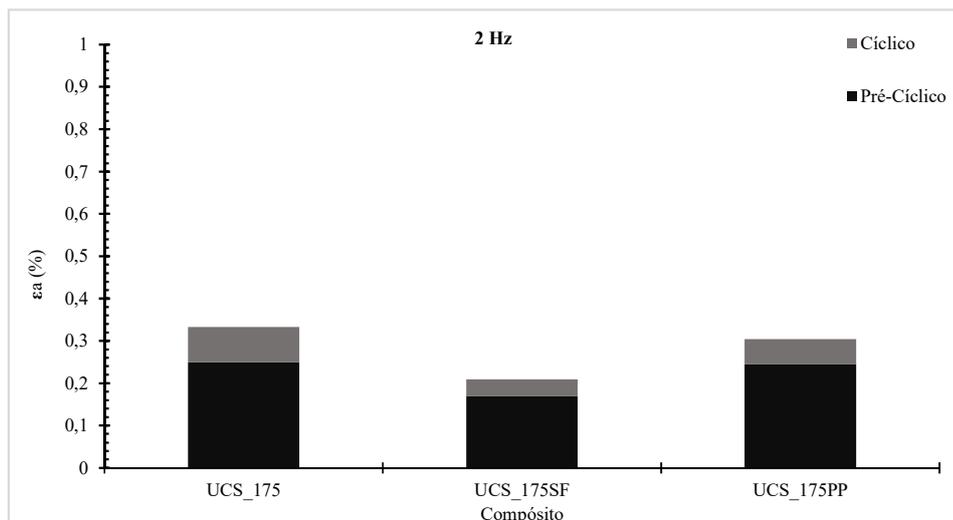


Figura 5.20 – Evolução da deformação axial permanente para a frequência de 2Hz e aplicação de 5000 ciclos.

A Figura 5.20 ilustra o comportamento da evolução da deformação axial no desenvolvimento do ensaio cíclico dos provetess com e sem reforço de fibras de sisal e polipropileno, fazendo uma comparação entre os valores obtidos nos ensaios cíclicos com, frequência de 2Hz, e valores dos ensaios UCS monotônicos.

A Figura 5.21 resume o comportamento dos materiais compósitos, através da curva referente à deformação axial acumulada em função do número de ciclos para a aplicação de frequência de 4 Hz.

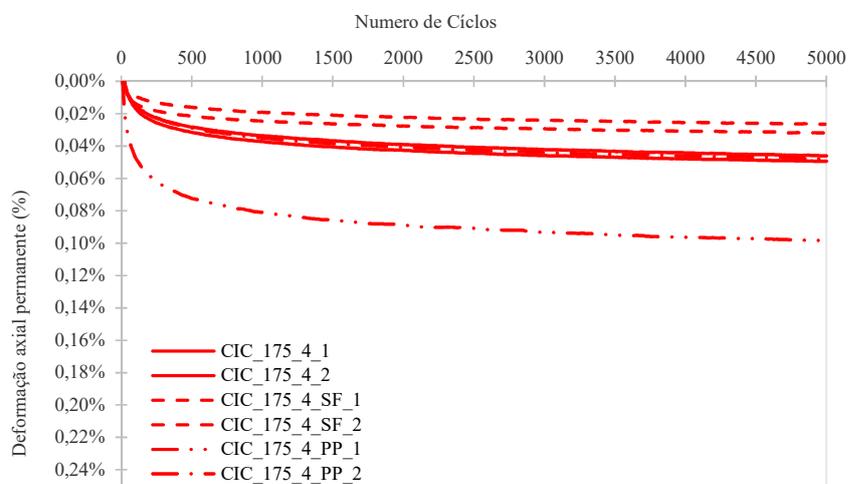


Figura 5.21 – Curvas deformação axial permanente - número de ciclos de ensaios Cíclicos, com frequência de 4Hz, realizados sobre amostras de solo estabilizado com ligante, dosagem de 175kg/m<sup>3</sup>, sem e com reforço de fibras de sisal e polipropileno.

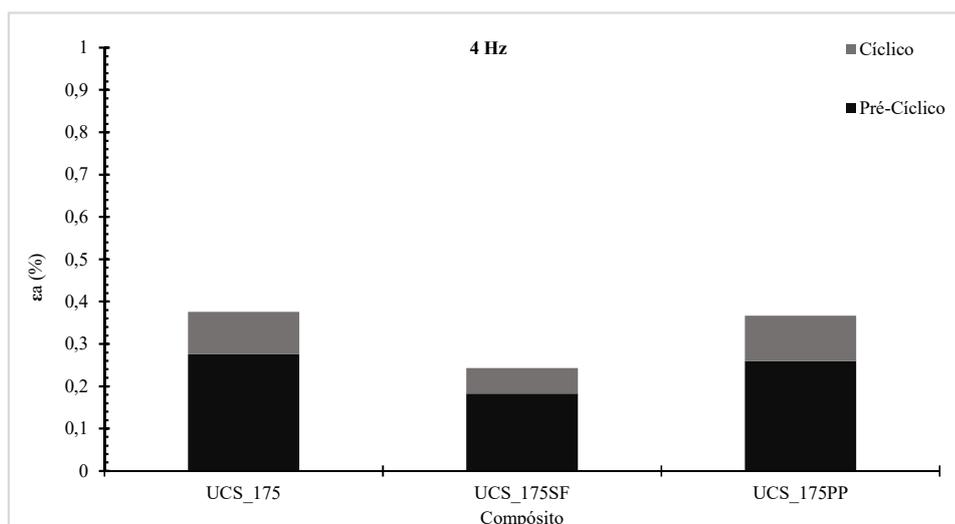


Figura 5.22 – Evolução da deformação axial permanente para a frequência de 4Hz e aplicação de 5000 ciclos.

A Figura 5.22 ilustra a evolução da deformação axial permanente para frequência de 4Hz, e desta agora podemos observar um acréscimo da deformação para os provetes reforçados com fibras de Polipropileno, diferente do composto reforçado com fibra de Sisal, que novamente demonstra um excelente comportamento. Com as fibras de Polipropileno, a partir da Figura 5.21, nota-se que existe uma maior dispersão de resultados.

Para um provete foi notado um comportamento fora do comum, este composto de fibras de polipropileno e sob aplicação de frequência de 4Hz (CIC\_175\_4\_PP\_1). A deformação axial acumulada registada demonstrou um valor bastante superior se comparada com o seu par de provete e com as demais composições analisadas. Tal comportamento pode ter origem na preparação dos provetes, onde podem ocorrer a formação de zonas com maior ou menor quantidade de ligante e/ou fibras, ou também danificação na desmoldagem dos provetes, ou possivelmente erros de ajuste na prensa durante o ensaio cíclico.

## **5.4 Ensaios de Compressão Simples Monotônicos Pós Cíclicos**

### **5.4.1 Provetes ensaiados nas condições base**

Ensaios de compressão simples não confinados foram realizados após carregamento cíclico como forma de caracterizar o comportamento dos variados materiais compósitos. Após a fase cíclica os provetes são levados à prensa Tristar para o ensaio de compressão simples monotônico, designados no presente trabalho por UCS pós-cíclico (UCSpc), para que dessa maneira fosse possível caracterizar o comportamento comparando com os ensaios de referência. Os Quadros 5.10 a 5.13 resumem os resultados obtidos nos UCSpc, assim como nos ensaios monotônicos de referência, além do comparativo das variações de resultados.

O Quadro 5.10 resume os resultados obtidos após realização dos ensaios cíclicos (frequência) igual a 1 Hz. Como mencionado no capítulo 4, foram realizados ensaios para materiais compósitos com variações de ligante (125 e 175 kg/m<sup>3</sup>) e reforços de fibras de Sisal e de Polipropileno (Df=10kg/m<sup>3</sup>).

Como maneira de comparar os resultados obtidos entre os resultados UCS (UCSref) e UCSpc, o Quadro 5.11 mostra de forma resumida os valores referentes à resistência à compressão ( $q_{u\_max}$ ), módulo de deformabilidade ( $E_u$ ), sendo  $q_{u\_max}$  e  $E_u$  analisados através da variação percentual dos valores médios, calculada por intermédio do quociente  $(UCSpc - UCS)/(UCS)$ .

Quadro 5.10 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios UCS pós-ciclos referente aos materiais compósitos com adição de ligante de 125 e 175 Kg/m<sup>3</sup>, com e sem reforço de fibras de sisal e polipropileno e aplicação de frequência de 1Hz.

Ensaio	q <sub>u_max</sub> (KPa)	q <sub>u_med</sub> (KPa)	ε <sub>arot</sub> (%)	ε <sub>arot_med</sub> (%)	E <sub>u50</sub> (MPa)	E <sub>u50_med</sub> (MPa)	W <sub>f</sub> (%)	W <sub>f_med</sub> (%)
PC_125_1	3027,29	2813,41	0,3465	0,3159	2941,89	2790,01	9,85	10,24
	2599,53		0,2853		2638,12		10,62	
PC_125_1_SF	2764,68	2560,95	0,3863	0,3186	2147,74	2348,33	11,10	10,98
	2357,23		0,2509		2548,92		10,85	
PC_175_1	4888,12	4468,91	0,3990	0,3669	2958,52	2917,42	10,37	10,24
	4049,70		0,3347		2876,32		10,11	
PC_175_1_SF	4462,49	4013,05	0,5094	0,4809	2029,68	1754,66	10,58	10,32
	3563,60		0,4525		1479,65		10,06	
PC_175_1_PP	3200,11	3354,50	0,4403	0,3795	734,03	1769,62	9,84	9,93
	3508,88		0,3186		2805,21		10,03	

Quadro 5.11 – Diferença entre os resultados obtidos nos ensaios UCS pós-ciclos e UCS referência, alusiva aos materiais compósitos com adição de ligante de 125 e 175 Kg/m<sup>3</sup>, com e sem reforço de fibras de Sisal e Polipropileno, e frequência de 1Hz.

Frequência aplicada	Ensaio	Δq <sub>u_med</sub> (KPa)	Δε <sub>arot_med</sub> (%)	ΔE <sub>u50_med</sub> (MPa)	ΔW <sub>f_med</sub> (%)
1 Hz	PC_125_1	23%	-0,27	316%	-1,09
	PC_125_1_SF	-6%	-0,28	201%	-0,40
	PC_175_1	-1%	-0,40	178%	-0,89
	PC_175_1_SF	-21%	0,06	-21%	0,32
	PC_175_1_PP	-29%	-0,27	25%	-0,31
0,25 Hz	PC_175_0,25	16%	-0,20	211%	-2,57
	PC_175_0,25_SF	21%	-0,08	118%	-1,79
	PC_175_0,25_PP	-16%	-0,34	153%	-2,68
2Hz	PC_175_2	0%	-0,35	348%	-1,57
	PC_175_2_SF	12%	-0,05	147%	0,29
	PC_175_2_PP	11%	-0,15	201%	-0,43
4Hz	PC_175_4	5%	-0,34	325%	-1,06
	PC_175_4_SF	16%	-0,02	54%	-0,23
	PC_175_4_PP	5%	-0,15	159%	-0,55

As Figuras 5.23 e 5.25 ilustram o comportamento dos ensaios UCS e UCSpc para as dosagens de 125 e 175 Kg/m<sup>3</sup>, respectivamente.

Na Figura 5.24 comparam-se os resultados médios do par de provetes ensaiados antes (UCSref), e depois (UCSpc) do carregamento cíclico em termos da deformação axial na rotura para UCSref e UCSpc e deformação axial permanente para os Cíclicos.

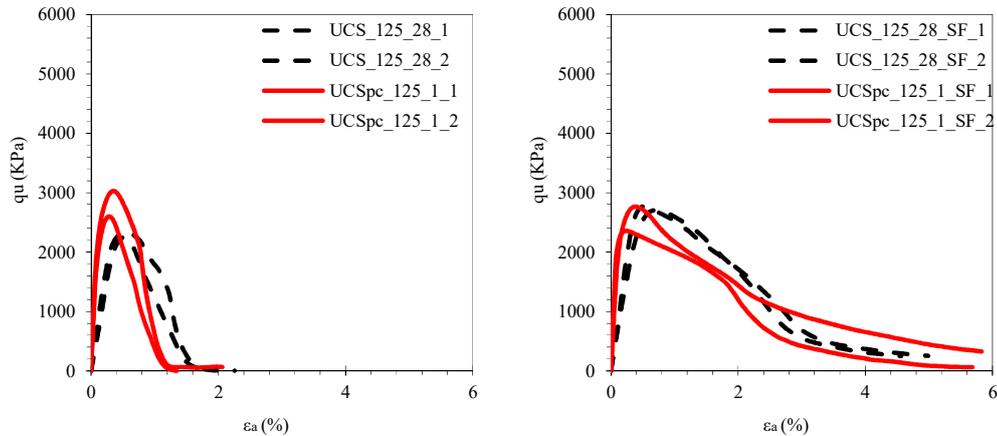


Figura 5.23 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCSpc comparativa entre Solo estabilizado ( $125\text{kg/m}^3$ ), reforçado e não reforçado de fibras de Sisal e frequência de 1Hz.

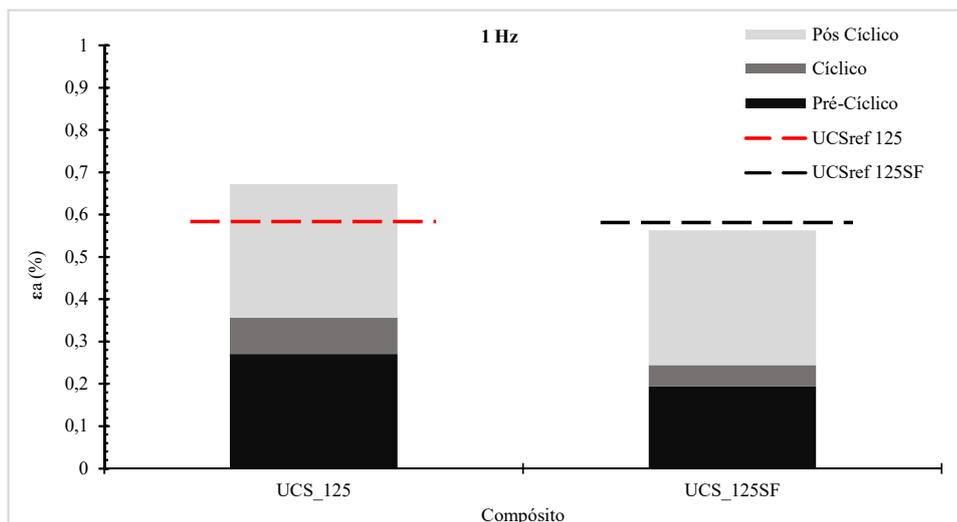


Figura 5.24 – Comparativo da evolução da deformação axial entre cada fase de carregamento monotônico de referência, cíclico e pós cíclico do solo estabilizado ( $125\text{Kg/m}^3$ ), reforçado e não reforçado com fibras de Sisal.

Nota-se para os provetes com dosagem de ligante  $125\text{Kg/m}^3$  e ausência de fibras um acréscimo da resistência à compressão simples após o carregamento cíclico, anulando-se este acréscimo com o aumento da dosagem de ligante de 125 para  $175\text{ Kg/m}^3$ . Estes resultados parecem indicar que nos provetes com menores dosagens de ligante e sem fibras a quebra das ligações ocasionadas pelas cargas cíclicas aumenta a mobilização ao atrito nas superfícies de rotura.

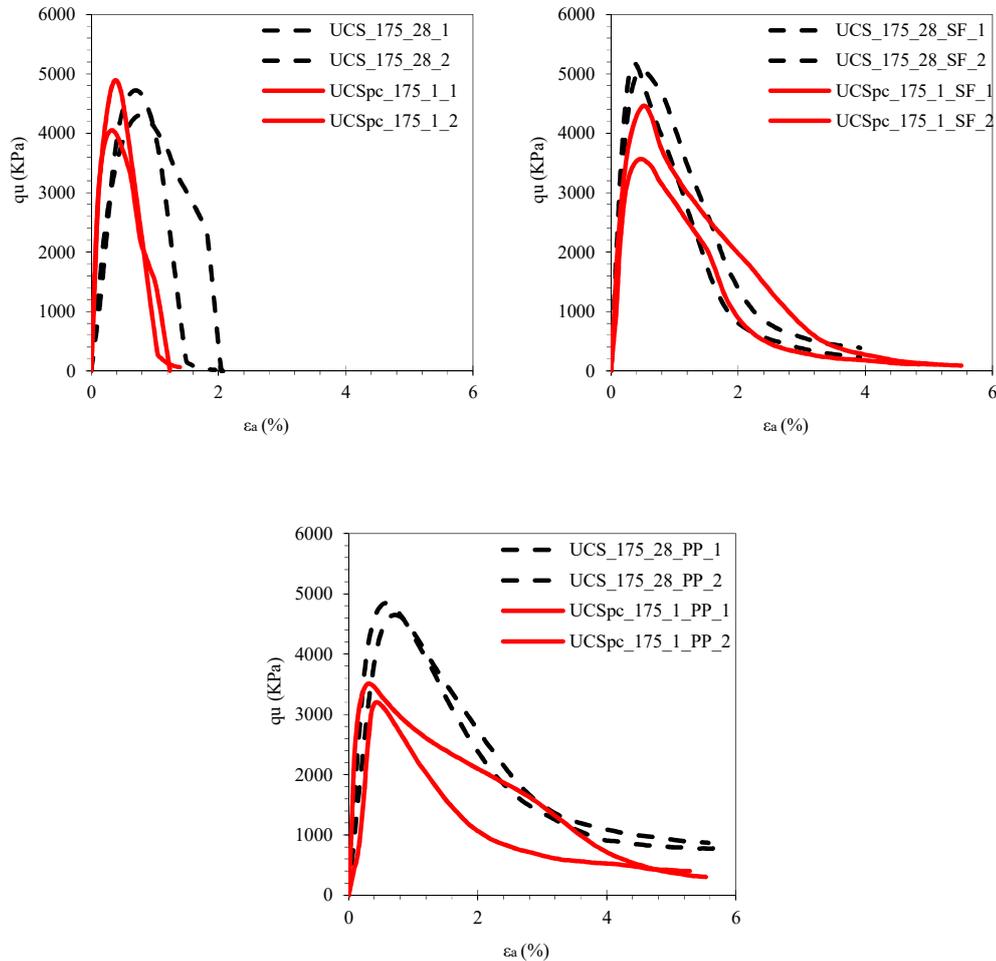


Figura 5.25 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCSpc comparativa entre Solo estabilizado (175kg/m<sup>3</sup>), reforçado e não reforçado de fibras de Sisal e Polipropileno e frequência de 1Hz.

Os provetes reforçados com fibras mostram uma diminuição da resistência na fase cíclica, sendo este efeito amplificado para maiores dosagens de ligante e nos provetes reforçados com fibra de polipropileno. Estes resultados sugerem que a mobilização da resistência à tração das fibras, não foi suficiente para conseguir compensar a perda de ligações cimentícias devido à inclusão das fibras no material compósito.

Quanto à extensão axial na rotura é possível observar uma diminuição, indicando uma maior rigidez do material, tal como constatado por  $E_u$ . Para estes é possível observar a influência da inclusão de fibras na redução das ligações cimentícias.

Da Figura 5.24 é possível notar o excelente comportamento da atuação do reforço das fibras na influência da redução da deformação axial após o carregamento cíclico, em comparação com os provetes não reforçados.

#### 5.4.2 Provetes ensaiados para várias frequências

Como mencionado no capítulo 4, foram realizados carregamentos cíclicos com diferentes frequências.

Inicialmente analisa-se o comportamento dos provetes sobre solicitações cíclicas com frequência de 0,25Hz. O Quadro 5.12 resume os resultados obtidos na realização dos ensaios pós-cíclicos (UCSpc). Para, além disso, a Figura 5.26 ilustra o comportamento do provete durante o ensaio, através das curvas tensão-extensão.

Quadro 5.12 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios UCS pós-ciclos referente aos materiais compósitos com adição de ligante (175 Kg/m<sup>3</sup>), com e sem reforço de fibras de sisal e polipropileno e aplicação de frequência de 0,25Hz.

Ensaio	q <sub>u_max</sub> (KPa)	q <sub>u_med</sub> (KPa)	ε <sub>arot</sub> (%)	ε <sub>arot_med</sub> (%)	E <sub>u50</sub> (MPa)	E <sub>u50_med</sub> (MPa)	W <sub>f</sub> (%)	W <sub>f_med</sub> (%)
PC_175_0,25	5403,70	5230,93	0,6316	0,5662	2453,41	3259,04	8,72	8,56
	5058,16		0,5008		4064,67		8,41	
PC_175_0,25_SF	6278,10	6210,09	0,4199	0,3422	2738,71	4872,10	8,06	8,21
	6142,09		0,2645		7005,50		8,36	
PC_175_0,25_PP	4137,58	3982,01	0,3385	0,3067	2498,88	3581,74	7,47	7,56
	3826,44		0,2748		4664,59		7,65	

Analisando os valores do Quadro 5.12 e da Figura 5.26, constata-se o acréscimo na resistência (q<sub>u\_max</sub>) com a presença de fibras de sisal, enquanto que a adição de fibras de polipropileno tem um efeito detrimental. Este comportamento é diferente do ocorrido quando aplicada a frequência base de 1Hz, tendo-se obtido um efeito negativo com o reforço com os dois tipos de fibras. Quanto aos demais fatores, extensão axial (ε<sub>arot</sub>) e módulo de deformabilidade (E<sub>u50</sub>) o efeito da adição de fibras é semelhante ao ocorrido nas condições base, porém agora de forma mais pronunciada.

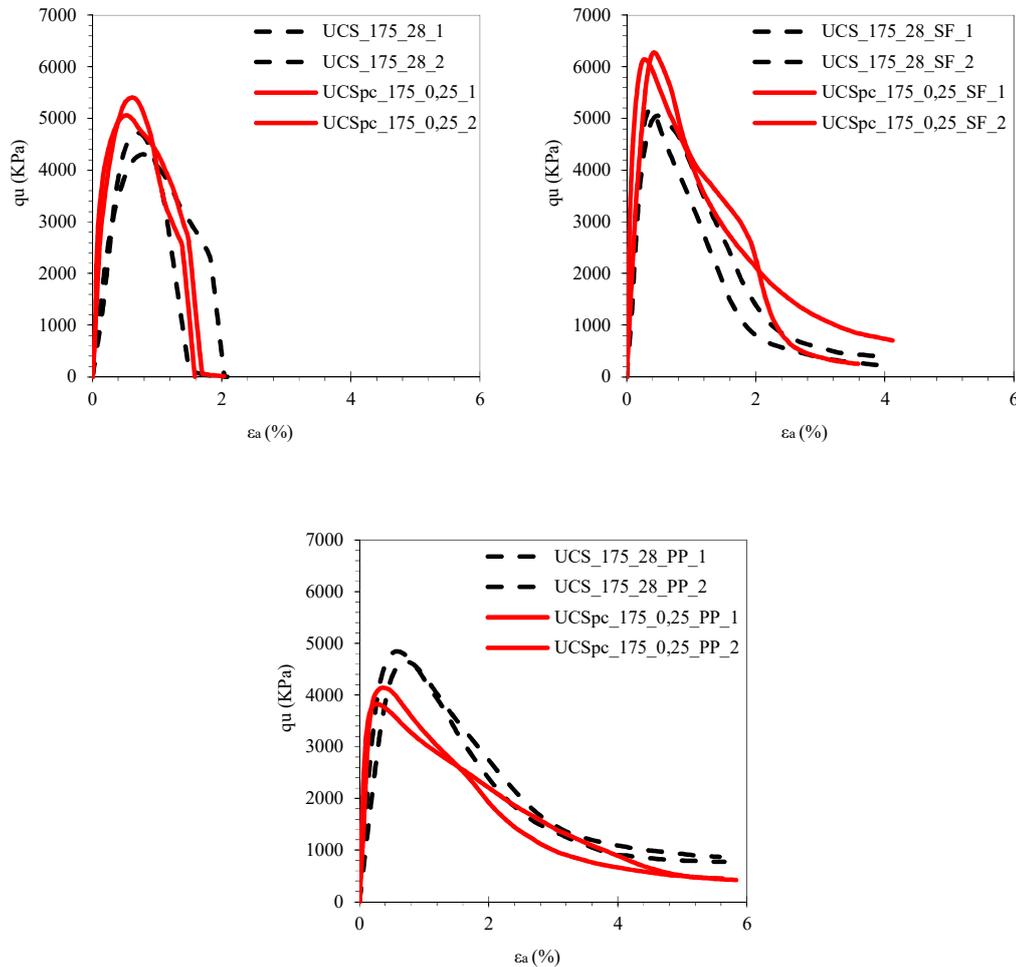


Figura 5.26 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCSpc comparativa entre Solo estabilizado ( $175\text{kg/m}^3$ ), reforçado e não reforçado de fibras de Sisal e Polipropileno e frequência de 0,25Hz.

Seguidamente, analisa-se no Quadro 5.13 o comportamento dos materiais compósitos submetidos a cargas cíclicas com uma frequência de 2Hz.

Quadro 5.13 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios UCS pós-ciclos referente aos materiais compósitos com adição de ligante ( $175\text{ Kg/m}^3$ ), com e sem reforço de fibras de sisal e polipropileno e aplicação de frequência de 2Hz.

Ensaio	$q_{u\_max}$ (KPa)	$q_{u\_med}$ (KPa)	$\epsilon_{arot}$ (%)	$\epsilon_{arot\_med}$ (%)	$E_{u50}$ (MPa)	$E_{u50\_med}$ (MPa)	$W_f$ (%)	$W_{f\_med}$ (%)
PC_175_2	4461,21	4509,13	0,4386	0,4184	5328,35	4704,87	9,46	9,56
	4557,06		0,3982		4081,38		9,66	
PC_175_2_SF	5668,26	5708,015	0,3747	0,3778	5660,28	5498,43	10,35	10,29
	5747,77		0,3810		5336,58		10,22	
PC_175_2_PP	5072,77	5259,55	0,4733	0,4932	4344,37	4260,61	10,37	9,81
	5446,33		0,5131		4176,84		9,25	

Analisando os resultados do Quadro 5.13 nota-se um acréscimo de resistência não confinado para os provetes com adição dos dois tipos de fibras, embora com maior relevância nos casos da utilização de fibras de sisal. Em termos de  $E_u$ , contata-se a existência de um efeito negativo com a adição de polipropileno, registrando-se o oposto com as fibras de sisal. A Figura 5.27 ilustra o comportamento tensão-extensão, observando-se com a adição de fibras o aumento da ductilidade do comportamento, traduzida por menor queda da resistência pós-rotura.

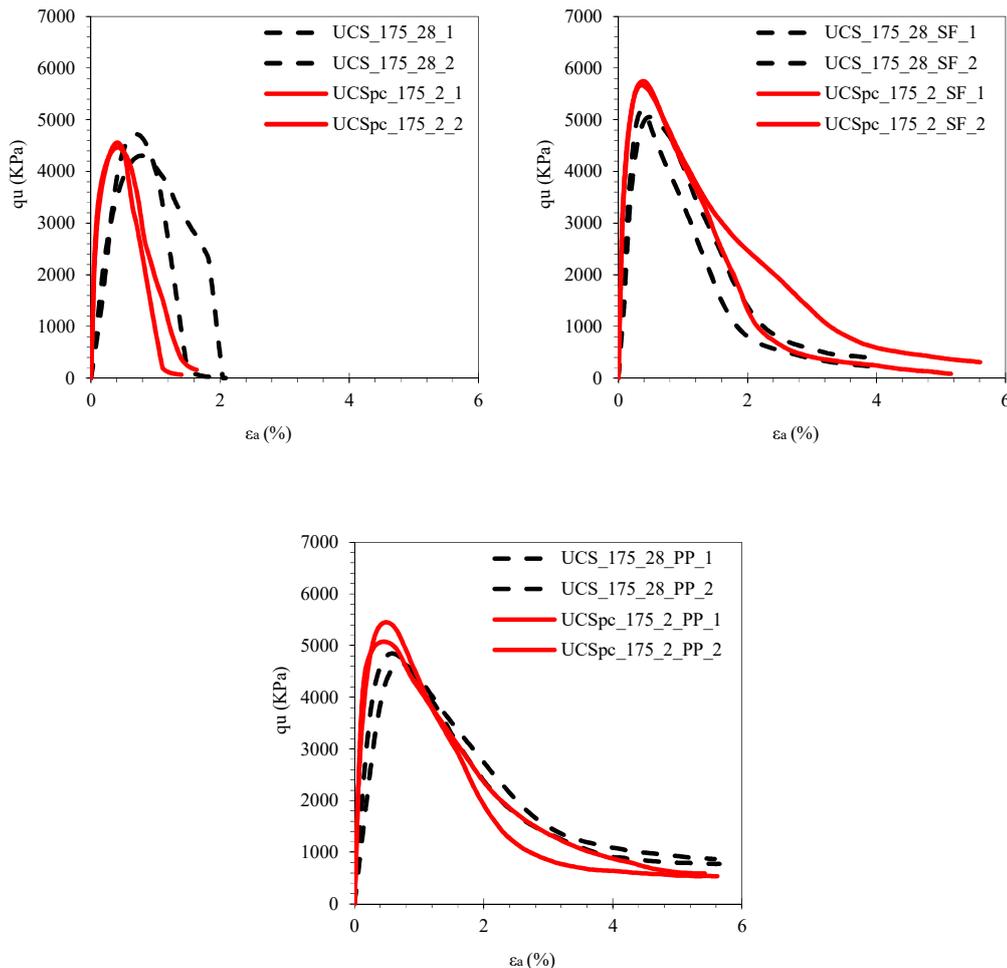


Figura 5.27 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCSpc comparativa entre Solo estabilizado (175kg/m<sup>3</sup>), reforçado e não reforçado de fibras de Sisal e Polipropileno e frequência de 2Hz.

O Quadro 5.14 descreve os resultados obtidos nos ensaios UCSpc para a aplicação de frequência de 4Hz.

A Figura 5.28 ilustra o comportamento do material compósito durante o ensaio através das curvas tensão-extensão.

Quadro 5.14 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios UCS pós-ciclos referente aos materiais compósitos com adição de ligante (175 Kg/m<sup>3</sup>), com e sem reforço de fibras de sisal e polipropileno e aplicação de frequência de 4Hz.

Ensaio	Q <sub>u_max</sub> (KPa)	Q <sub>u_med</sub> (KPa)	ε <sub>arot</sub> (%)	ε <sub>arot_med</sub> (%)	E <sub>u50</sub> (MPa)	E <sub>u50_med</sub> (MPa)	W <sub>f</sub> (%)	W <sub>f_med</sub> (%)
PC_175_4	4694,78	4751,71	0,3887	0,4212	5280,92	4463,75	9,97	10,07
	4808,64		0,4537		3646,58			
PC_175_4_SF	6130,73	5913,09	0,4009	0,4069	3462,99	3441,37	9,53	9,77
	5695,45		0,4129		3419,76			
PC_175_4_PP	4710,37	4967,71	0,4323	0,5011	3554,70	3668,65	9,72	9,69
	5225,05		0,5698		3782,60			

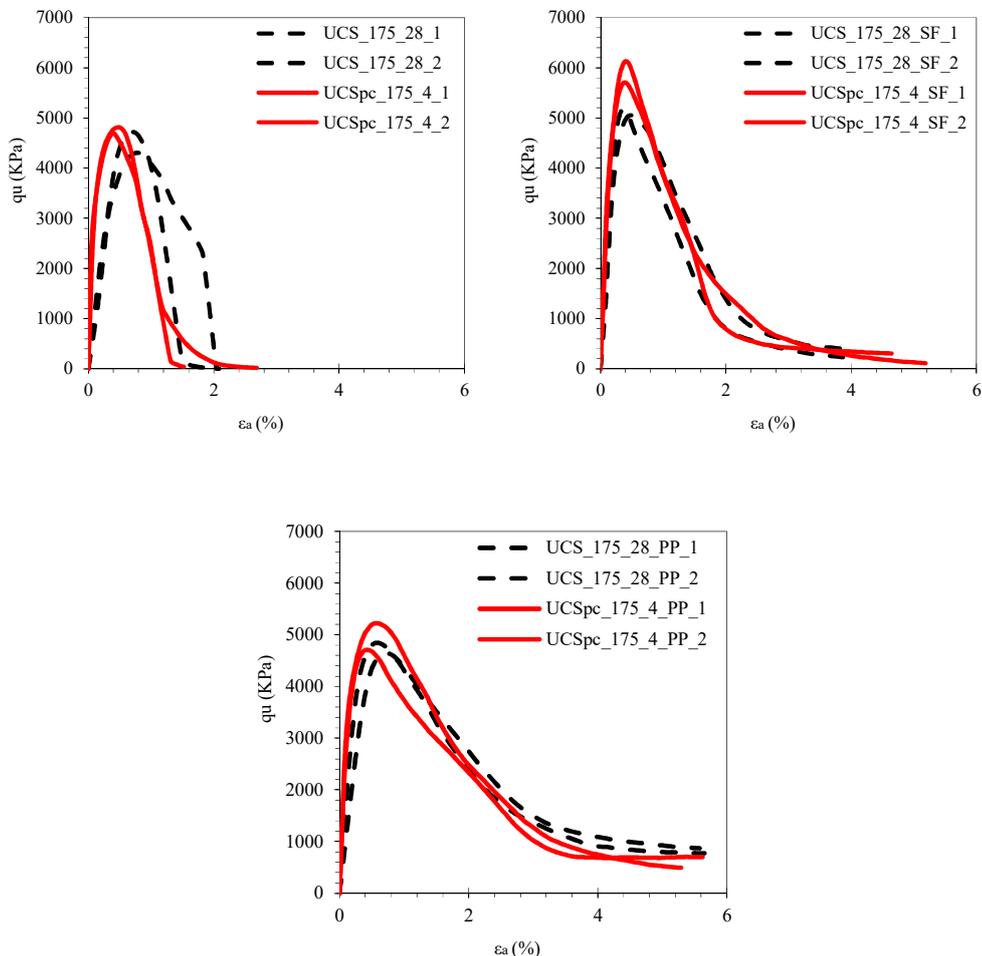


Figura 5.28 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCSpc comparativa entre Solo estabilizado (175kg/m<sup>3</sup>), reforçado e não reforçado de fibras de Sisal e Polipropileno e frequência de 4 Hz.

Os resultados obtidos após a fase cíclica com frequência 4 Hz (Quadro 5.14 e Figura 5.28) mostram com a adição de fibras o aumento da resistência não confinada (q<sub>u\_max</sub>), embora com maior relevância nos provetes com adição de fibras de Sisal. Em termos de E<sub>u</sub>, consta-se a

diminuição do módulo de deformabilidade com a adição de ambos os tipos de fibras, sendo esta tendência distinta da observada nas frequências restantes.

### 5.4.3 Comparativo da influência das variações de frequências

Este tópico tem como objetivo principal, a realização de um comparativo da influência da variação da frequência nos resultados obtidos através dos ensaios UCSpc.

A Figura 5.29 ilustra o comportamento tensão – deformação dos materiais compósitos durante os ensaios UCSpc e UCSref. Foi selecionado um resultado de cada mistura com a intenção de facilitar a visualização dos comportamentos graficamente.

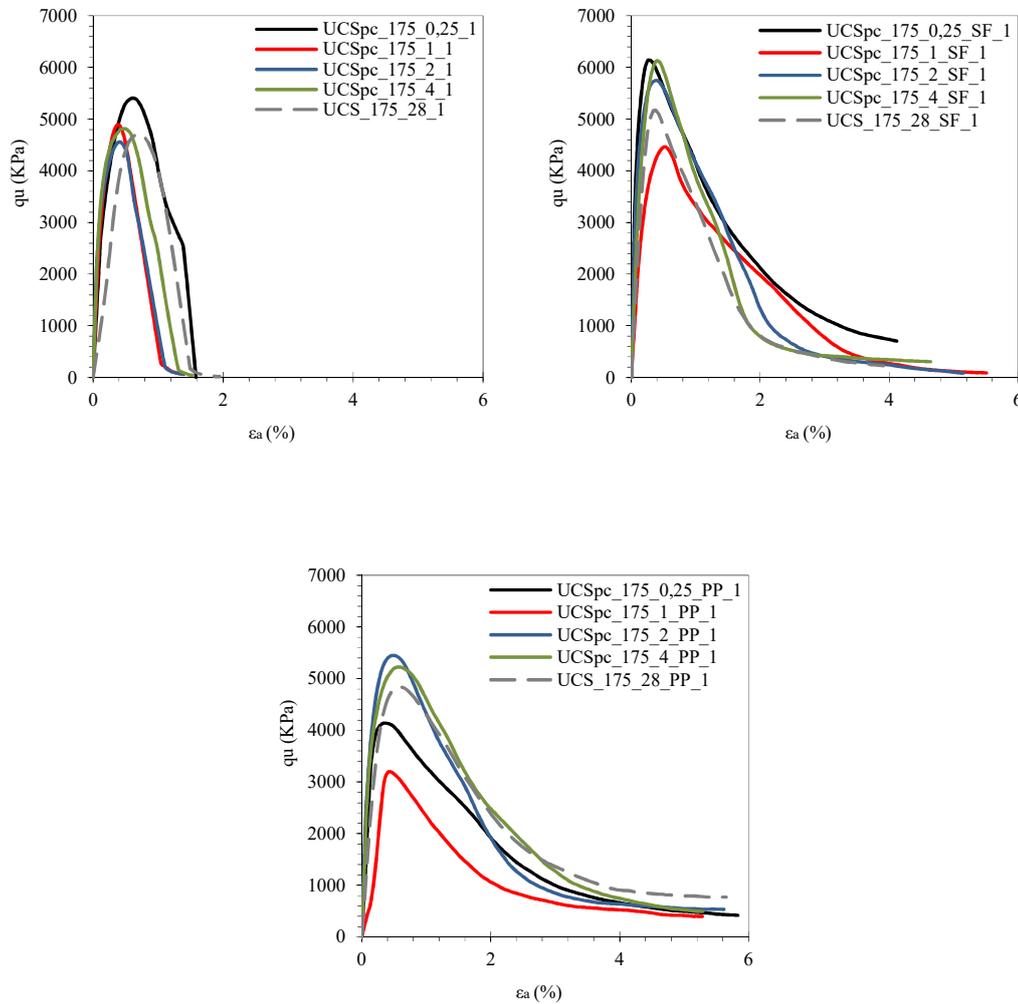


Figura 5.29 – Comparativo da influência da variação da frequência através das curvas tensão-extensão de ensaios UCSpc e UCSref de solo estabilizado (175kg/m<sup>3</sup>), reforçado e não reforçado de fibras de Sisal e Polipropileno.

A Figura 5.30, confronta a evolução da deformação axial nos provetes ensaiados, UCSref e fases cíclicas.

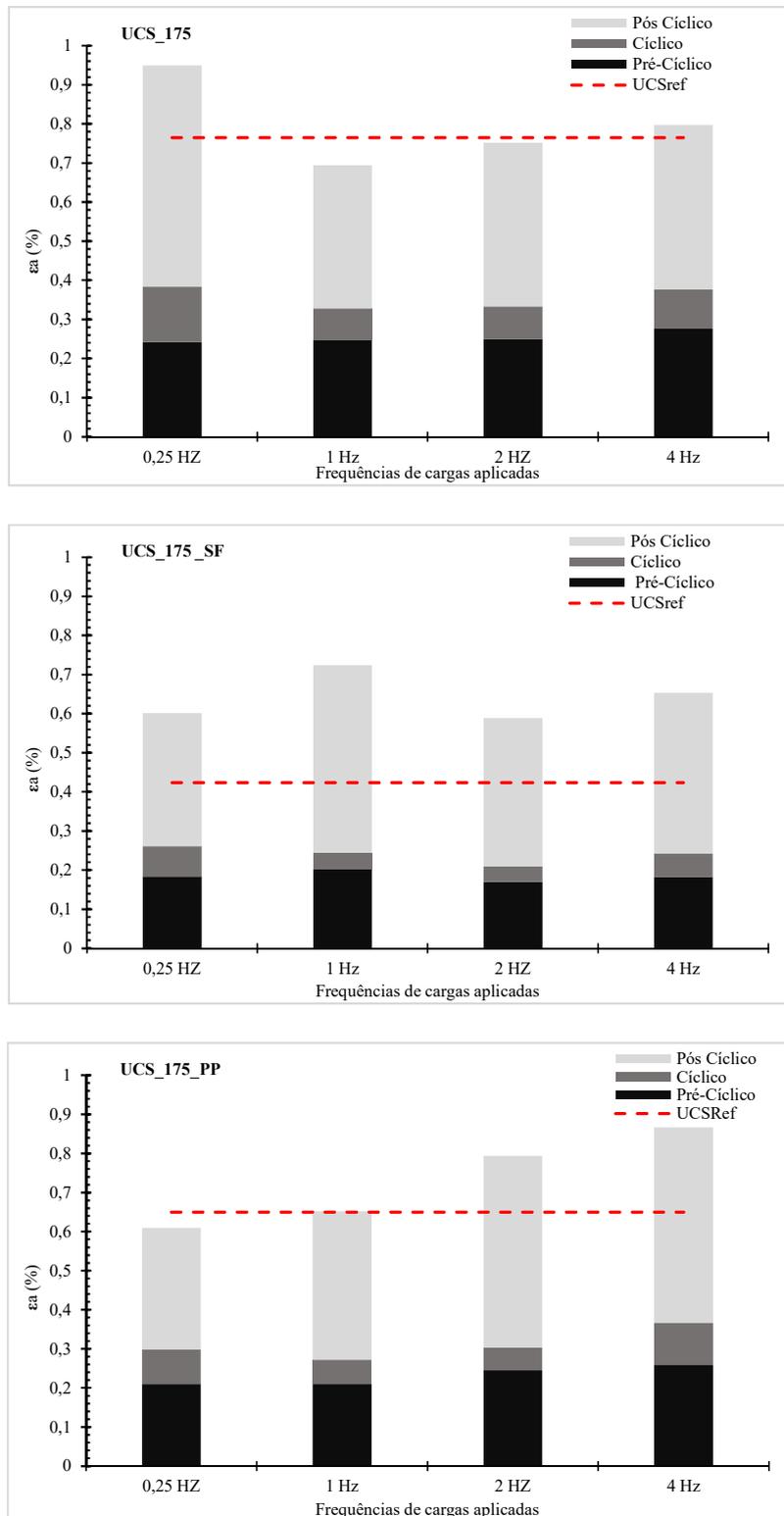


Figura 5.30 – Comparativo da evolução da deformação axial de todos os materiais compósitos ensaiados, entre cada fase de carregamento cíclico e monotônico de referência e pós cíclicos, para as variações de frequência.

A partir da Figura 5.30 observa-se que os apenas para os provetes reforçados de polipropileno existem uma tendência definida na deformação, para estes nota-se o crescimento da deformação com o incremento da frequência. Nos demais, provetes não reforçados e reforçados com fibras de sisal, não existe tendência clara definida. Confrontando os resultados entre os provetes, com e sem reforço de fibras, nota-se de maneira global, uma redução da deformação para os provetes reforçados com os dois tipos de fibras, sugerindo que, parte da carga aplicada é suportada pelas fibras, não se transmitindo ao esqueleto.

Nas Figuras 5.31 e 5.32 confrontam-se os resultados da resistência à compressão simples não confinados ( $q_{u\_max}$ ) e o módulo de deformabilidade ( $E_u$ ), respectivamente, dos provetes ensaiados de forma monotônica (UCSref) e sujeitos a carregamento cíclico (UCSpc).

Fazendo então a análise dos resultados exibidos nas Figuras 5.29 a 5.32, nota-se que, por possuir um comportamento mais rígido, como mencionado no capítulo 2, as fibras de sisal, após a deformação imposta pelo carregamento cíclico, são forçadas a entrarem em funcionamento mais cedo, o que justifica o aumento da resistência dos provetes após solicitação. Nos materiais compósitos com adição de polipropileno constata-se, para as frequências inferiores a 1 Hz que o reforço com fibras induz um decréscimo de resistência, registrando-se um efeito contrário para frequências superiores a 2 Hz. Este comportamento parece estar associado às deformações registadas, de facto os provetes submetidos a uma frequência de 2 e 4 Hz, exibiram maiores extensões (Figura 5.30), o que permitiu a mobilização da resistência à tração das fibras, levando ao aumento de  $q_{u\_max}$  no UCSpc. Por outro lado, as menores deformações registadas para frequências inferiores a 1 Hz não foram suficientes para a integral mobilização da resistência à tração das fibras, originando a diminuição de  $q_{u\_max}$ , ou seja, a redução das ligações cimentícias devido à existência das fibras, não foi compensada pela mobilização da sua resistência à tração.

Independente do tipo de fibra e de frequência utilizado, os resultados também mostram um efeito favorável da solicitação cíclica em  $E_u$ , aumentando este efeito para os provetes sem fibras. Nota-se para o caso dos provetes não reforçados com fibras um crescimento do módulo de deformabilidade e da resistência, o que pode ser justificado pela formação de fissuras na fase cíclica, que proporcionam o surgimento de grupos de partículas cimentadas (Cluster), estes, durante a fase de carregamento pós – cíclico, mobilizam maior atrito enquanto deslizam ao longo do plano, o que se repercute em maior resistência e maior rigidez.

Para os provetes reforçados com fibras, o aumento do módulo de deformabilidade está ligado ao crescimento da deformação, que mobiliza a resistência das fibras. Com exceção da frequência de 1 Hz onde este efeito não é muito claro para todos os materiais, possivelmente a explicar por variabilidades experimentais.

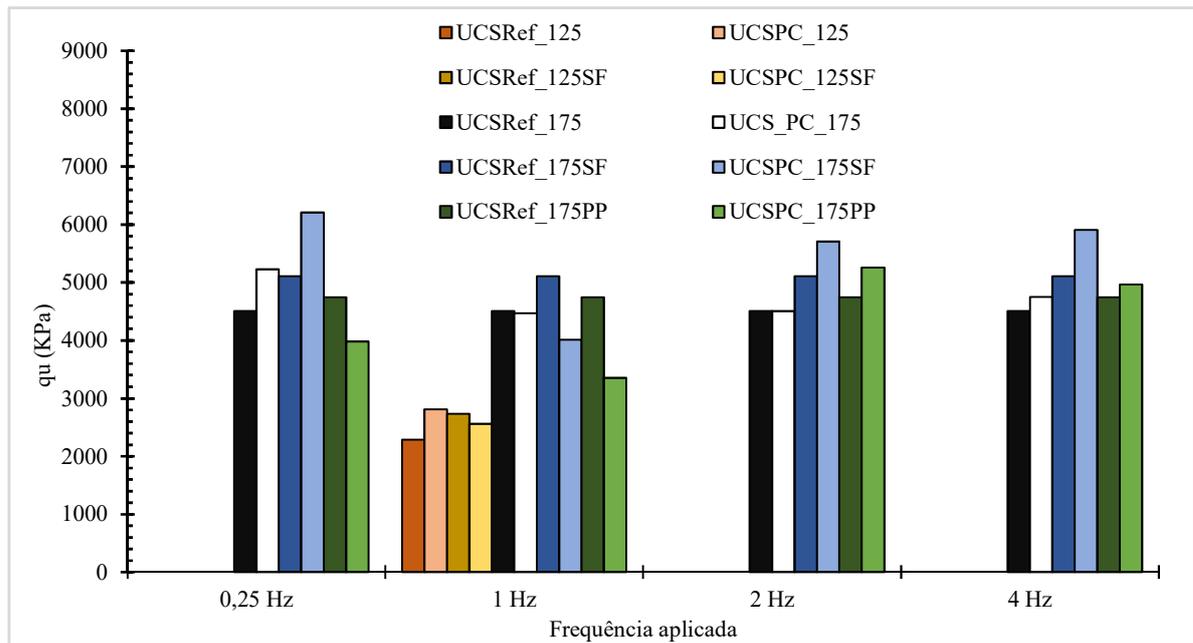


Figura 5.31 – Comparativo da evolução da resistência ( $q_{u,max}$ ) relacionada com as frequências cíclicas aplicadas entre os ensaios UCSref e UCSpc, para todos os materiais compósitos.

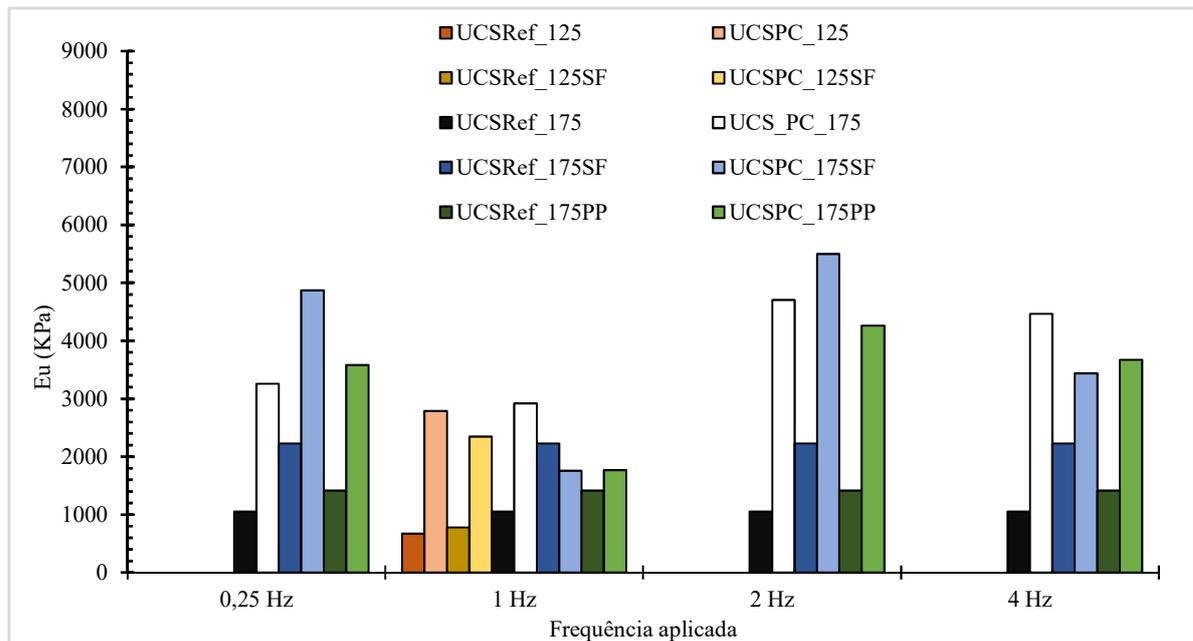


Figura 5.32 – Comparativo da evolução do módulo de deformabilidade ( $E_u$ ) relacionado com as frequências cíclicas aplicadas entre os ensaios UCSref e UCSpc, para todos os materiais compósitos.

A Figura 5.33 explana o comportamento das matrizes após realização dos ensaios UCS, para que seja possível uma melhor percepção do efeito da estabilização e do reforço com fibras de Sisal e Polipropileno. Nesta Figura pode-se observar a mobilização da resistência à tração das fibras ao longo do plano de rotura.

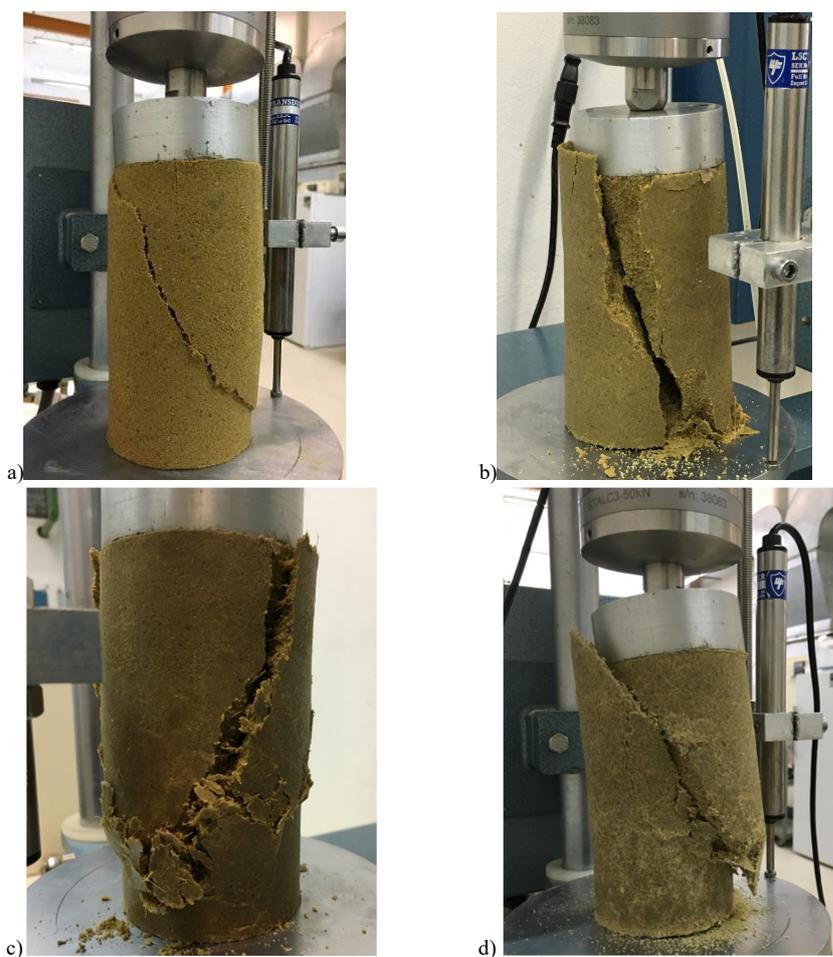


Figura 5.33 – Imagens comparativo do comportamento pós ruptura dos provetes em suas variadas composições:  
a) Solo natural b) Solo Cimento c) Solo + Cimento + Sisal d) Solo + Cimento + Polipropileno

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1.1 Considerações finais

Este trabalho teve como principal enfoque a caracterização do comportamento de uma areia estabilizada por via química com diferentes dosagens de cimento, reforçada com dois tipos de fibras (Sisal e Polipropileno), baseando-se em ensaios de compressão simples não confinados (UCS) sob carregamento monotônico ou previamente submetido à fase cíclica (CIC) sob 5000 ciclos, amplitude de  $\pm 7,5$  de  $q_{u\_max}$  e para várias frequências de aplicação de carga (0,25Hz, 1Hz, 2Hz e 4Hz). Finalmente foi realizada a comparação do comportamento de provetes submetidos a carregamentos cíclicos com os monotônicos.

Com base em ensaios do solo não estabilizado com ligante fica evidenciada a contribuição das fibras para o comportamento do solo, originando o aumento da resistência e da ductilidade, o solo passa a ter uma maior resistência de pico e resistência residual.

O aumento da dosagem de ligante na mistura induziu um ganho substancial de resistência, atingindo-se mais que o dobro da resistência com o aumento da dosagem de 125 para 175 Kg/m<sup>3</sup>, além disso, houve um leve aumento da extensão axial de rotura ( $\epsilon_{arot}$ ), e aumento do módulo de deformabilidade ( $E_{u50}$ ).

O efeito da inclusão de fibras depende do tipo de fibra utilizado, com as fibras de sisal nota-se um ganho de resistência à compressão não confinada derivado da inclusão das fibras, mais pronunciado para o caso de menor dosagem cimentícia. Alerta-se para a capacidade de absorção presente nas fibras, sendo levemente superior para as fibras de sisal quando comparadas às de polipropileno. Quanto ao tempo de cura observa-se um crescimento praticamente linear da resistência não confinada com o logaritmo do tempo de cura.

Dos ensaios cíclicos pode-se observar um comportamento comum entre os materiais compósitos em estudo, que foi a descida abrupta da evolução das deformações axiais acumuladas até os primeiros 500 ciclos. Por outro lado é importante salientar a contribuição das fibras de sisal na redução da deformação axial acumulada. Posteriormente nos ensaios pós-cíclicos também é importante salientar a grande contribuição das fibras de Sisal nos ganhos de resistência não confinada, independente da frequência utilizada. As fibras de polipropileno só têm um efeito favorável do comportamento pós – cíclico para frequências superiores a 2Hz, em resultado desta gama de frequência induzir maiores deformações permanentes na fase cíclica, o que permite a mobilização da resistência à tração das fibras.

Do comportamento geral, a inclusão de fibras traduz um comportamento mais dúctil dos provetes pós-rotura, sendo este comportamento mais significativo com a redução da dosagem de ligante cimentício (125Kg/m<sup>3</sup>). É característica das fibras de sisal entrarem mais cedo em

funcionamento que as fibras de polipropileno, por possuírem maior rigidez isso traduz-se numa maior resistência de pico. Por outro lado, com as fibras de polipropileno, obtém-se uma maior resistência residual aos provetes.

### **6.1.2 Trabalhos Futuros**

Da realização deste trabalho surge uma gama de possibilidades para aprofundamento da temática em estudo, pelo que se propõem alguns trabalhos futuros:

- Análise complementar do comportamento do solo estabilizado com outros tipos de ligantes e fibras;
- Análise da influência do comprimento das fibras no comportamento do solo estabilizado;
- Análise da influência do número de ciclos, nível de deformação e amplitude de carga no comportamento do material compósito;
- Comparação dos resultados obtidos laboratorialmente com resultados de ensaios escala real no trabalho *in situ*;
- Realização de outros tipos de ensaio, como corte direto, de maneira a analisar a influência da orientação das fibras.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 13320-1, I. (1999). *Particle Size Analysis – Laser Diffraction Method. Part 1. General Principles*. International Standard Organization.
- ASTM D 2166 (2000). *Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil*. American Society For Testing and Materials
- Bahrekazemi M., (2004), *Train- Induced Ground Vibration and Its Prediction*
- Bekaert (2010), *Product Datasheet DUOMIX M12*
- BS 1377-3 (1990), *Methods of test for soils for civil engineering purposes – part 3: chemical and electro-chemical tests*. British Standards Institution, London.
- BS 1377-7 (1990), *Methods of test for soils for civil engineering purposes – part 7: Shear strength tests (total stress)*. British Standards Institution, London.
- Cajada, J. C. (2017), *Estabilização Química de Diferentes Solos com Adição de Fibras de Polipropileno*. Universidade de Coimbra, Dissertação de Mestrado, Dep. de Eng<sup>a</sup> Civil da FCTUC, Coimbra, Portugal.
- Cardoso, A. J. M. S. (1987), *A Técnica Das Pregagens em Solos Aplicada em Escavações*. Dissertação de Doutorado, Dep. de Eng<sup>a</sup> Civil da FEUP, Universidade do Porto, Porto.
- Casagrande, M. D. T.; Consoli, N.C.; Thomé, A.; Prietto, P. D. M. (2002), *Comportamento em campo e laboratório de um solo reforçado com fibras*. Solos e Rochas. 25: 247-255.
- Casagrande, M.D.T., (2005), *Comportamento de Solos Reforçados com Fibras Submetidos a Grandes Deformações*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação de Doutorado, Escola de Engenharia Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Rio Grande do Sul, Brasil.
- Clought, G. W.; Sitar, N.; Bachus, R. C.; Rad, S. N. (1981), *Cemented sands under static loading*. Journal of the Geotechnical Engineering, 107(6): 799-817.
- Consoli, C.N.; Prietto, D.M.; Ulbrich, L.A. (1998), *Influência de fibras e cimento na adição de comportamento de solo arenoso*. Journal of Geotechnical e Engenharia Geoambiental, ASCE, 124: 1211- 1214.
- Consoli, N. C.; Cruz, R. C.; Floss, M. F.; Festugato, L. (2010), *Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 136(5): 759-763.
- Consoli, N.C.; Vendruscolo, M.A.; Fonini, A., Rosa; F.D., (2009), *Fibra efeitos sobre a areia, considerando uma ampla gama de cimentação*. Geotextiles and Geomembranes 27 (3): 196 - 203.
- Cordeiro, J.K. da S. (2007), *Estabilização química e solidificação do resíduo oleoso gerado nas atividades de E&P de petróleo, com solo para o uso em camadas de bases e/ou*

- sub-bases de pavimentos rodoviário*. Dissertação de Mestrado., UFCG, Campina Grande, Paraíba, Brasil.
- 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 & Geomembranes*, 43(2): 97–106.
- Correia, A.A.S. (2011), *Aplicabilidade da técnica de deep mixing aos solos moles do Baixo Mondego*. Universidade de Coimbra, Tese de Doutoramento, Dep. de Eng<sup>a</sup> Civil da FCTUC, Coimbra, Portugal.
- Cristelo, N. (2001), *Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal*. Universidade do Minho, Dissertação de Mestrado, Braga, Portugal.
- DeSimone, L.D.; Popoff, F. (1998), *Eco-efficiency – The business link to sustainable development*. MIT Press.
- E196 (1966). *Solos – Análise granulométrica*. Especificação do LNEC, Lisboa, Portugal.
- E197 (1966). *Solos – Ensaio de compactação*. Especificação do LNEC, Lisboa, Portugal.
- E201 (1967). *Solos – Determinação do teor em matéria orgânica*. Especificação do LNEC, Lisboa, Portugal.
- Falorca, I. M. (2002), *Comportamento do solo microreforçado com fibras sintéticas de pequeno comprimento*. Universidade de Coimbra, Dissertação de Mestrado, Dep. de Eng<sup>a</sup> Civil da FCTUC, Coimbra, Portugal.
- Falorca, I. M. C. F. G.; Pinto, M. I.M. (2004), *Solo Reforçado com Fibras Sintéticas de Pequeno Comprimento Distribuídas de Modo Aleatório*. II Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia p 515-524
- Feuerharmel, M. R. (2000), *Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, Brasil. Fonte: <http://hdl.handle.net/10183/2804>
- Firoozi, A. A.; Guney Olgun, C.; Firoozi, A.A.; Baghini, M. S. (2017), *Fundamentals of soil stabilization*. *International Journal of Geo- Engineering*.
- Fortunato, E. (2008), *Soil improvement: a high potential alternative*. *TRATCICA - Seminar on the treatment of materials with lime and cement for transport infrastructures* (in Portuguese), Porto (Melhoria do solo: uma alternativa de alto potencial. TRATCICA - Seminário sobre tratamento de materiais com cal e cimento para infraestruturas de transporte, Porto).
- Ghavami, K.; Toledo Filho, R.; Barbosa, N. (1999), *Behaviour of composite reinforced with natural fibres*. *Cement & Concrete Composites*, 21(1): 39-48.
- Gregory H.; Chill S. (1998), *Stabilization of earth slope with fiber reinforcement*. In: 6th International conference geosynthetics, Atlanta, USA.

- Hannant, L. (1994), *Fibre-reinforced cements and concretes*. In: J. M. ILLSTON. Construction Materials; their nature and behaviour. 2ed. London: J. M. Illston/E & FN Spon, p.359-403.
- Head, K.H. (1985). *Manual of soil laboratory testing*. Vols. 1, 2 e 3, Pentech Press, London.
- Heineck, K.S.; Coop, M.R.; Consoli, N.C., (2005), *Effect of micro-reinforcement of soils from very small to large shear strains*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 131 (8): 1024–1033.
- Hejazi, S. M.; Sheikhzadeh, M.; Abtahi, S. M.; Zadhoush, A. (2012), *A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers*. Construction and Building Materials, 30, 100-116. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.045>
- Hollaway, L. (1994), *Polymers and polymer composites*. Em J. M. Illston, Construction Materials; their nature and behavior. London, U.K.: E & FN Spon (2): 321-358.
- Huang, J. T.; Airey, D. W. (1993), *Effects of Cement and Density on a Artificially Cemented Sand*. In: INTERNATIONAL SIMPOSIUM ON GEOTECHNICAL ENGINEERING OF HARD SOILS – SOFT ROCKS, 1993, Athens. Proceedings... Rotterdam: A. A Balkema, 3v. v1, p.553.560
- Ingles, O. G.; Metcalf, J. B. (1972), *Soil stabilization : principles and practice*. Sydney, Australia: Butterworth-Heinemann Ltd.
- John, V. M.; Agopyan, V.; Prado, T.A. (1999), *Durabilidade de compósitos de cimentos e fibras vegetais*. Artigo técnico. Universidade de São Paulo.
- John, VM.; Agopyan, V.; Sjöström, C. (2001), On agenda 21 for Latin America and Caribbean construbusiness - a perspective from Brazil. Building Research and Information.
- Johnston, C.D. (1994), *Fiber-reinforced cement and concrete*. In: Advances in concrete technology. 2ed. Ottawa: V.M. Malhorta, p.603-673.
- Kézedi, A. (1979), *Stabilized Earth Roads*. Elsevier Scientific Publishing Company Amsterdam, 327p.
- Lopes, W. G. R. (2002), *Solo-cimento reforçado com bambu: características físico mecânicas*. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. Campinas-SP.
- Marques, S.F.V. (2016), *Comportamento de uma areia artificialmente cimentada até altas tensões de confinamento*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação de Doutorado, Escola de Engenharia Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Rio Grande do Sul, Brasil.
- Nilsson, L.H. (1975), *Reinforcement of concrete with sisal and other vegetable fibres*. Swedish Council for Building Research, Document DIY, Stockholm, Sweden.

- Noorzad, R.; Zarinkolaei, S. T. (2015), *Comparison of mechanical properties of fiber-reinforced sand under triaxial compression and direct shear*. Open Geosciences, 7(1): 547-558. doi:10.1515/geo-2015-0041
- NP 83 (1965). *Solos – Determinação da densidade das partículas sólidas*.
- NP 84 (1965), *Solos – Determinação do teor em água*.
- NP 143 (1969), *Solos – Determinação dos limites de consistência*.
- NP EN 206-1 (2007), *Betão. Parte I: Especificação, desempenho, produção e conformidade*.
- NP EN 12390-1 (2010). *Ensaio do betão endurecido*. Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes.
- NP EN 12390-3 (2011). *Ensaio do betão endurecido*. Parte 3: Resistência à compressão de provetes.
- Oliveira, T.G.; Mendes, G.C.; Pereira, E.L.; Ferreira, L.D. (2016), *Análise comparativa entre o granulômetro a laser e o método convencional de granulometria por sedimentação*. XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.
- Pereira, O. (1970), *SOLO CIMENTO Curso de Especialização 108: Estabilização de Solos*, Cap 2, LNEC, Lisboa
- Pinto, A. (2008), *Fibras de curauá e sisal como reforço em matrizes de solo*. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, . Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro, Brasil.
- Pinto, M. I. M. (2000), *Micro-Reinforced Soil*, 3rd Int. Conf. on Ground Improvement Techniques, Singapore.
- Pitta, M. R. (1984), *Dimensionamento de pavimentos com camadas estabilizadas com cimento*. São Paulo, Brasil: Associação Brasileira de Ciência Política.
- Prabakar, J.; Sridhar, R. S. (2002), *Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil*. Construction and Building Materials, 16(2): 123-131.
- Ronoh, V.; Too, J. K.; Kaluli, J. W.; Victor, M. R. (2014), *Cement effects on the physical properties of expansive clay soil and the compressive strength of compressed interlocking clay blocks*. Eur Int J Sci Technol, 3(8): 74-82.
- Savastano Jr., H. (2000), *Materiais a base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo*. Tese (Livre docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Silva, C. C. (2007), *Comportamento de solos siltosos quando reforçados com fibras e melhorados com aditivos químicos e orgânicos*. Universidade Federal do Paraná, Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Construção Civil, Curitiba, Paraná.
- Silva, S. R. (2011), *A General Framework for the Geomechanical Characterisation of Artificially Cemented Soil*.

- Tang, C.; Shi, B.; Gao, W.; Chen, F.; Cai, Y. (2007), *Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil*, *Geotextiles and Geomembranes*, 25, (3): 194-202.
- Taylor, G. D. (1994), *Materials in Construction* (2 ed.). London: Longman Scientific & Technical.
- Teles, J. M. (2013), *Comportamento Mecânico do Solo Mole do Baixo Mondego Quimicamente Estabilizado com Adição de Fibras Metálicas*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Dep. De Eng<sup>a</sup> Civil da FCTUC, Coimbra.
- Terashi, M. (2005), *Keynote lecture: design of deep mixing in infrastructure applications*. In: International Conference on Deep Mixing e Best Practice and Recent Advances: k25ek45. Swedish Deep Stabilization Centre, Stockholm, Sweden.
- Terashi, M.; Kitazume, M. (2009), *Keynote lecture: current practice and future perspective of QA/QC for deep-mixed ground*. In: International Symposium of Deep Mixing & Admixture Stabilization. Okinawa, Japan.
- Vale, L.V. (1991), *A cultura sisaleira*. EMBRAPA/CPA Campina Grande, PB (in Portuguese).
- Venda Oliveira, P.J.; Correia A.A.S.; Teles J.M.N.P.C.; Custódio DG. (2015), *Effect of fibre type on the compressive and tensile strength of a soft soil chemically stabilised*. *Geosynthetics International* 23(3): 171–82.
- Venda Oliveira, P. J.; Correia, A. A.; Teles, J. M.; Pedro, A. M. (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. doi:<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.10.006>
- Wolf, John P., (1985) *Dynamic Soil-structure interaction*. New Jersey: Prentice Hall, inc.

## ANEXO A – ENSAIO À TRAÇÃO DAS FIBRAS DE SISAL

De maneira a caracterizar a resistência das fibras realizaram-se ensaios de tração. Tais ensaios foram possíveis graças ao Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra, que disponibilizou a utilização do equipamento SHIMADZU AG-X, com célula de carga com capacidade para 5 KN (Figura A.1).



Figura A.1 – Equipamento SHIMADZU AG-X, célula de carga com capacidade para 5KN

As fibras foram envoltas no equipamento e levadas até a rotura, obtendo valores de resistência à tração medida pela força (N) aplicada às mesmas, conforme Figura A.2.

Inicialmente as fibras sofrerem uma ação de auto ajuste nas suas amarrações. Tal ajuste é resultado da dificuldade de amarração das fibras ao equipamento, como resultado disso é possível notar uma oscilação da resistência na fase inicial do ensaio.

Foram realizados 5 ensaios para analisar se os resultados se aproximavam e com a concretização disto, foi retirado um valor médio de 8,60 N de força aplicada no ensaio. O diâmetro das fibras é de 140  $\mu\text{m}$  e dessa forma, através da divisão da força aplicada pela área ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ), a resistência à tração encontrada para uma fibra de Sisal é de **558  $\text{N}/\text{mm}^2$** .

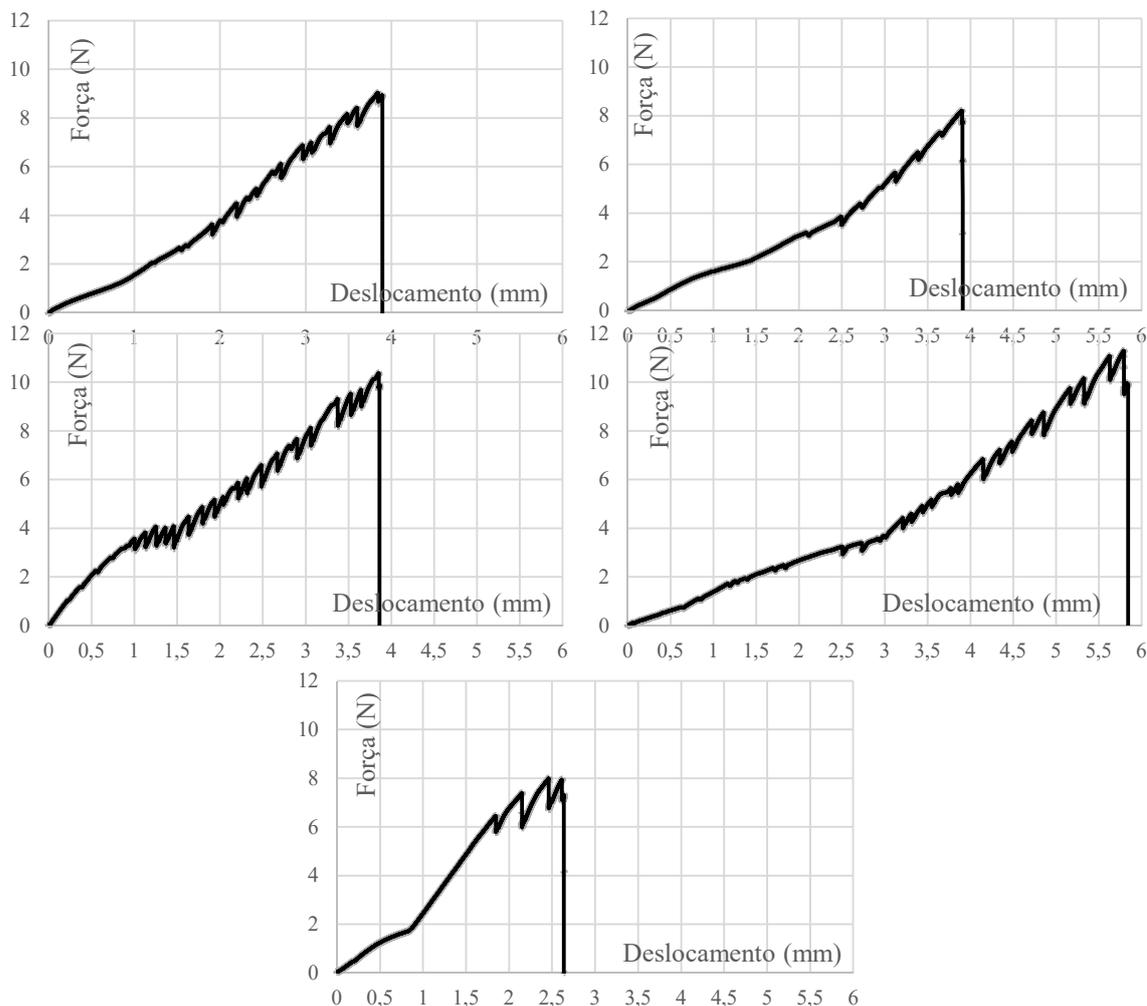


Figura A.2 – Ensaio de resistência à tração medidos pela força (N)

## ANEXO B – EFEITO DE MOLHAGEM DAS FIBRAS

Ainda sobre as fibras de sisal, faz-se importante caracterizar também a capacidade de absorção de água destas, logo se decorre o ensaio a seguir. O ensaio de molhagem da fibra consiste-se em imergir a mesma em uma cápsula com água, retirando-a quando se atinge o tempo pré-determinado, constatando se ela possui absorção e o valor quanto ao tempo. Para esta verificação, foram estabelecidos 3 pontos de verificação em relação ao tempo: aos 15, aos 30, e aos 60 minutos de imersão das fibras em água. Foram pesadas 6 cápsulas de, aproximadamente, 0,500g de fibras com comprimento de 12mm e diâmetro de 0,14mm (Figura B.1a). Após a pesagem, as fibras foram imergidas em 15 mililitros de água (Figura B.1b).

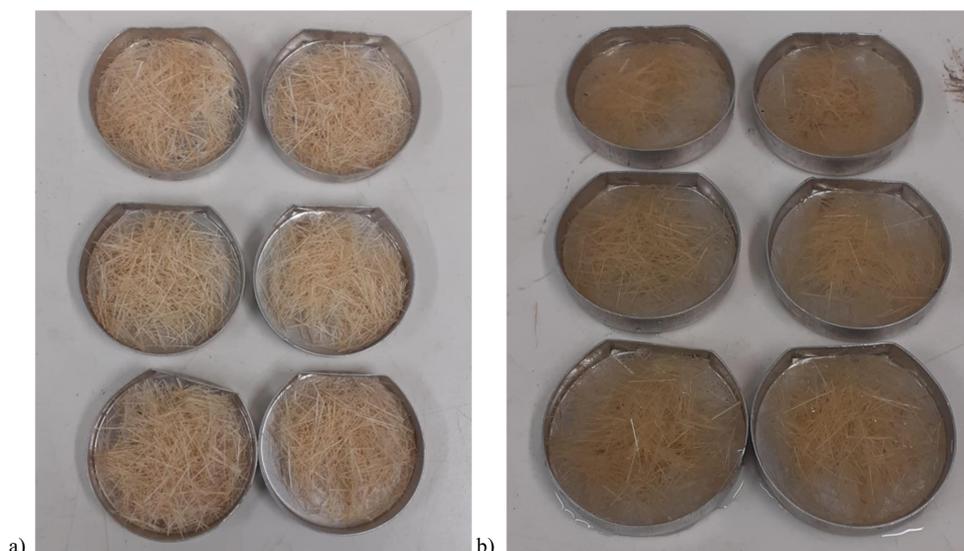


Figura B.2.– a) Fibras reservadas antes da imersão. b) Fibras imersas em 15 mililitros de água

Finalizados os tempos de leitura, as fibras são retiradas e, com o auxílio de uma folha de papel absorvente, é retirado o máximo de água contida nas suas superfícies. Em seguida, são pesadas para verificar seu peso após a molhagem. Os resultados são expressos no Quadro 7.1.

Quadro B.1 – Resumo dos resultados obtidos na pesagem das fibras

<b>Molhagem das fibras de Sisal</b>				
<b>Tempo de leitura (min)</b>	<b>Peso do material seco (g)</b>	<b>Água utilizada (ml)</b>	<b>Peso do material húmido (g)</b>	<b>IA (%)</b>
<b>15</b>	0,503	<b>15</b>	0,994	97,61
	0,509		1,085	113,16
<b>30</b>	0,512		1,202	134,76
	0,523		1,570	200,19
<b>60</b>	0,516		1,770	243,02
	0,535		1,996	273,08
<b>IA = índice de absorção de água (Phúmido-Pseco)/Pseco</b>				
<b>(...) Variação percentual</b>				

Pode ser notado a partir do Quadro B.1 que as fibras possuem capacidade de absorção ao longo do tempo, e para, além disso, foi um ganho de diâmetro, chegando a ser medido até 0,22 mm após 1 hora de imersão das fibras. Isso corrobora com as características higroscópicas e hidrofílicas das fibras, que se expandem durante a molhagem, e retraem na medida em que a água evapora.

Com os resultados, é possível confirmar que as fibras têm um poder de absorção de até 273% após uma hora de molhagem. Indicando que, durante as misturas neste estudo, elas absorvem água.

## **ANEXO C – ENERGIA DE COMPACTAÇÃO DOS PROVETES**

A energia aplicada nos provetes compactados para o desenvolvimento deste estudo foi determinada utilizando como base a energia de compactação aplicada no ensaio de Proctor leve. Como o molde deste ensaio era maior que os provetes do estudo, o número de pancadas foi ajustado mantendo a energia aplicada.

Assim, a energia aplicada nos provetes passou por uma correlação entre os volumes com a energia do Proctor leve, calculando assim a energia total necessária para compactar um provete.

### **Ensaio de Proctor Leve**

#### **a. Características do ensaio**

- \* Volume do molde → 958,49 cm<sup>3</sup>
- \* Massa do pilão → 2,49 kg
- \* Altura de queda do pilão → 30,5 cm
- \* Número de pancadas do ensaio → 75

#### **b. Energia de compactação do ensaio**

- \* Energia potencial gravítica →  $E = m \times g \times h$
- \* Aceleração da gravidade →  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$
- \* Energia por pancada →  $2,49 \times 9,8 \times 30,5 \times 10^{-3} = 7,443 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$
- \* Energia do ensaio →  $E = 7,443 \times 75 = 558,196 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$

### **Provetes do ensaio**

#### **a. Características do provete**

- \* Altura →  $h = 140 \text{ mm}$
- \* Diâmetro interno →  $d = 70 \text{ mm}$

$$* \text{ Vol. do provete} \rightarrow V_{\text{provete}} = \pi \times \left( 70 * 10^{-3} / 2 \right)^2 \times 140 \times 10^{-3} \approx 539 \text{ cm}^3$$

**b. Energia de compactação dos provetes**

$$* \text{ Energia de compactação} \rightarrow E_{\text{provete}} = \frac{V_{\text{provete}} \times E}{V} \rightarrow 313,8 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$$

$$* \text{ Número total de pancadas} \rightarrow n = 313,8 / 7,443 \approx 40 \text{ pancadas}$$

$$* \text{ Número de pancadas para 3 camadas} \rightarrow n = 39,784 / 3 \approx 14 \text{ pancadas}$$

Dessa maneira, para uma correta compactação dos provetes, pretendendo atingir igual nível de energia do Proctor leve, deve-se aplicar um total de 14 pancadas para cada uma das 3 camadas do provete.