



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Daniel Soares Goulart

INFLUÊNCIA DO TIPO DE FIBRA NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO
ARENOSO CIMENTADO SOB AÇÕES ESTÁTICAS
E DINÂMICAS

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

Março de 2020

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

Daniel Soares Goulart

Influência do tipo de fibra no comportamento mecânico de um solo arenoso cimentado sob ações estáticas e dinâmicas

**Influence of fiber type in the mechanical behavior of a cemented sandy soil
under static and dynamic actions**

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

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.

Março de 2020



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

Em minha caminhada ao conhecimento e desenvolvimento pessoal e profissional, muitas foram as pessoas que até aqui me ajudaram. Qualquer pesquisa necessita ser amparada na contribuição de outrem, como forma de incentivo e enriquecimento na compreensão do estudo. Com isso, deixo aqui meu agradecimento para aqueles que, de uma forma ou de outra, contribuíram para esta jornada.

- Primeiramente, agradeço em especial, ao Professor Doutor António Alberto Santos Correia, por todos os ensinamentos, pelas constantes sugestões, correções, e resoluções dos problemas existentes durante o percurso do estudo. Agradeço também ao Professor Doutor Paulo José da Venda Oliveira. Agradeço ambos pela orientação, disponibilidade, amizade e incentivo demonstrados na elaboração desta dissertação;
- Ao Sr. José António, técnico do laboratório de Geotecnia DEC-UC, pela ajuda e disponibilidade no desenvolvimento dos trabalhos laboratoriais;
- Agradeço às amigadas desenvolvidas durante esta jornada, por sempre me apoiarem, em especial ao meu grande amigo Guilherme Rebelo Anunciação, que me acompanhou durante esta fase árdua. Agradeço também aos amigos Nicole Santos e Jorge Ortega, pela disposição e companheirismo;
- A todos os demais colegas e professores da área de geotecnia da Universidade de Coimbra, pelo convívio ao longo desta jornada;
- 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 Eng. Carlos Leitão pela realização dos ensaios das fibras de sisal;
- Por fim, agradeço aos meus Pais, Jaider Moreira e Evânia Soares, e minha irmã, Gabriela Soares, pelos incontáveis conselhos, além do esforço e sacrifício que realizaram para que eu conseguisse percorrer este caminho na realização deste sonho. Agradeço ainda minha namorada Kamila Soares pela partilha dos momentos de felicidade, e compreensão nos momentos de ausência. Este trabalho também é de vocês.

RESUMO

A busca no desenvolvimento de novos materiais e tecnologias tem estimulado duas situações distintas. Ao mesmo tempo que se busca favorecer a utilização de zonas caracterizadas por solos com fracas características geotécnicas (baixa resistência e elevada deformabilidade), busca-se também reduzir a quantidade de resíduos e poluentes, numa perspectiva de sustentabilidade. A utilização da mistura solo-cimento-fibra tem tido cada vez mais o seu uso constatado como satisfatório, resultando em um compósito que possa satisfazer as duas situações impostas.

A presente dissertação tem como propósito avaliar o comportamento mecânico de fibras naturais e sintéticas, distribuídas aleatoriamente, utilizadas como reforço de um solo granular, quimicamente estabilizado com ligante cimentício, sob ações de carregamento estático e dinâmico. São avaliadas as propriedades de resistência à tração e extensão em condições não confinadas. Para isso, são realizados ensaios de compressão diametral (monotônicos e cíclicos), estimando a influência do tipo de fibra utilizada, bem como a influência da dosagem de ligante cimentício no comportamento do solo reforçado com fibras naturais. Para o reforço foram utilizados fibras de Sisal (naturais) e fibras de Polipropileno (sintéticas), com comprimentos iguais (12mm), e dosagens iguais em relação ao peso seco do solo (10kg/m^3). Para a estabilização química foi utilizado cimento Portland CEM I 42,5 R, com duas dosagens diferentes em relação ao peso seco do solo (175kg/m^3 e 125kg/m^3). Ambos elementos foram utilizados separadamente e em conjunto, para a melhoria das propriedades de um solo caracterizado como areia mal graduada.

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que, qualquer que seja o tipo de fibra adicionada na mistura cimentícia ocasiona um aumento de ductilidade do material compósito, além de um ganho na absorção de energia com base na sua resistência residual. Fibras sintéticas, flexíveis, acrescem maior qualidade no comportamento dúctil do material, ou seja, no comportamento pós-rotura. Fibras naturais, rígidas, comportaram-se de forma mais satisfatória após os carregamentos cíclicos, visto que a resistência máxima à tração e a capacidade de extensão máxima de rotura do material compósito sofreram um aumento de capacidade.

Palavras-chave: Resistência à Tração, Cargas Cíclicas, Solo Estabilizado, Solo Reforçado, Solo-cimento-fibra, Sisal, Polipropileno

ABSTRACT

The search for the development of new materials and technologies has stimulated two different situations. At the same time that it seeks to advantage the use of areas characterized by soils with weak geotechnical characteristics (low resistance and high deformability), it also seeks to reduce the amount of waste and pollutants, in a sustainable perspective. The use of the soil-cement-fiber mixture has increasingly found its use as satisfactory, resulting in a composite that can satisfy both imposed situations.

This dissertation aims to evaluate the mechanical behavior of natural and synthetic fibers, randomly distributed, used as reinforcement in a granular soil, chemically stabilized with cementitious binder, under static and dynamic loading actions. The tensile strength and extension properties are evaluated in unconfined conditions. For this, diametrical compression tests (monotonic and cyclic) are performed, estimating the influence of fiber type used, as well as the influence of the cementitious binder dosage on the behavior of the soil reinforced with natural fibers. For reinforcement, Sisal fibers (natural) and Polypropylene fibers (synthetic) were used, with equal lengths (12mm), and equal dosages in relation to dry weight of the soil (10kg/m³). Portland cement CEM I 42.5 R was used for chemical stabilization, with two different dosages in relation to dry weight of the soil (175kg/m³ and 125kg/m³). Both elements were used separately and together, to improve the properties of a soil characterized as badly graduated sand.

Based on results obtained, it can be concluded that, whatever the type of fiber added in the cement mixture causes an increase of ductility in the composite material, as well as a gain in energy absorption based on its residual strength. Synthetic flexible fibers add greater quality to the ductile behavior of the material, in the post-rupture behavior. Natural rigid fibers, behaved more satisfactorily after the cyclic loads, since the maximum tensile strength and the maximum rupture extension of the composite material were increased.

Keywords: Tensile Strength, Cyclic Loads, Stabilized Soil, Reinforced Soil, Soil-cement-fiber, Sisal, Polypropylene,

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE QUADROS	x
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONTEXTO DO TRABALHO	1
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 MELHORAMENTO E ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS	4
2.2 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS COM LIGANTE CIMENTÍCIO	4
2.2.1 Influência da mistura nas propriedades físicas do solo	5
2.2.2 Comportamento mecânico da mistura solo-cimento	6
2.3 COMPORTAMENTO DOS SOLOS REFORÇADO COM FIBRAS.....	10
2.3.1 Fibras naturais de Sisal.....	13
2.3.2 Fibras sintéticas de Polipropileno.....	15
2.4 SOLOS ESTABILIZADOS QUÍMICAMENTE E REFORÇADOS COM FIBRAS ...	17
2.4.1 Estudos experimentais em situações de carregamento estático.....	18
2.4.2 Estudos experimentais em situações de carregamento dinâmico	23
3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	25
3.1 CARACTERÍSTICAS DO SOLO	25
3.1.1 Composição granulométrica	25
3.1.2 Densidade das partículas sólidas	26
3.1.3 Limites de consistência (Limites de Atterberg).....	27
3.1.4 Teor de matéria orgânica	27
3.1.5 Medição do pH	27
3.1.6 Ensaio de compactação.....	27
3.1.7 Resumo da caracterização do solo.....	28
3.2 LIGANTE – CIMENTO PORTLAND CEM I 42,5 R.....	28
3.3 FIBRAS	29

3.3.1 Fibras de Polipropileno.....	29
3.3.2 Fibras de Sisal.....	29
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	30
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	30
4.2 PREPARAÇÃO DAS MISTURAS	31
4.3 MOLDAGEM E DESMOLDAGEM DOS PROVETES.....	33
4.4 ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL MONOTÓNICO (STS).....	34
4.4.1 Plano de ensaios	34
4.4.2 Procedimento Laboratorial	35
4.5 ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL CÍCLICO (CIC).....	38
4.5.1 Plano de ensaios	38
4.5.2 Procedimento Laboratorial	38
5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	41
5.1 Introdução.....	41
5.2 Análise preliminar: Solo e Solo + Fibras	41
5.3 Solo + Ligante	42
5.4 Solo + Ligante + Sisal	48
5.5 Solo + Ligante + Polipropileno	55
5.6 Comparativo	60
5.6.1 Influência da dosagem de ligante	60
5.6.2 Influência do tipo de fibra	62
6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	68
6.1 CONCLUSÕES FINAIS	68
6.2 TRABALHOS FUTUROS.....	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
ANEXO A	81
ANEXO B	83
ANEXO C	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema de solo com: a) alto teor em cimento; b) baixo teor em cimento (Catton, 1962 adaptado de Cruz, 2004).....	8
Figura 2.2 - Resistência à tração por compressão diametral para as composições com diferentes teores de cimento (adaptado de Cruz, 2004).....	9
Figura 2.3 Resistência à compressão simples para misturas com diferentes teores de cimento (adaptado de Cruz, 2004)	9
Figura 2.4 (a) Curvas de tensão-extensão com diferentes teores de cimento após cura por 7 dias; (b) Curvas de tensão-extensão com diferentes teores de cimento após cura por 28 dias (adaptado de Sbahieh e Teymur , 2019).....	10
Figura 2.5 Mecanismo de interface entre solo e fibra (adaptado de Kodicherla et al., 2018).	11
Figura 2.6 Efeito do teor em fibras e do seu comprimento: a) no ângulo de atrito interno; b) na coesão do solo (Jiang et al., 2010).....	12
Figura 2.7 Estrutura hierárquica de uma fibra de sisal (Melo Filho, 2012)	13
Figura 2.8 Interação de fibras naturais com o solo em secagem (adaptado de Ghavami et al., 1999).....	14
Figura 2.9 Desenho esquemático do reforço de fibra de Sisal durante o processo de rotura (adaptado de Wei e Meyer, 2014)	14
Figura 2.10 – Curvas tensão-extensão axiais de misturas fibra-solo com diferentes solos e comprimento de fibras (Feuehermel, 2000)	16
Figura 2.11 – (a) curvas típicas tensão-extensão para os compósitos solo cimento reforçados com fibras de sisal com comprimento de 20 mm (b) parâmetros obtidos nos ensaios de compressão simples. Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão (adaptado de Martins, 2014).....	18
Figura 2.12 – (a) curvas típicas tensão de tração- extensão para os compósitos solo-cimento reforçados com fibras de sisal com comprimento de 20 mm (b) parâmetros obtidos nos ensaios de tração direta. Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão (adaptado de Martins, 2014).....	19
Figura 2.13 – (a) curvas típicas tensão de tração-extensão para os compósitos solo-cimento reforçados com fibras de sisal com comprimento de 50 mm (b) parâmetros obtidos nos ensaios de tração direta. Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão (adaptado de Martins, 2014).....	20
Figura 2.14 Comportamento aos 28 dias do compósito solo-cimento-polipropileno com variação do teor de fibras a) 3% de cimento b) 5% de cimento c) 7% de cimento (Sbahieh e Teymur, 2019).....	21
Figura 2.15 Esboço do comportamento mecânico na interface entre a superfície da fibra e a matriz do solo (adaptado de Tang et al., 2007)	21

Figura 2.16 Resultados dos ensaios UCS monotônicos (UCS) e UCS pós ciclo (UCSpc). Efeito do tipo de solo e reforço com fibras de Polipropileno no pico de resistência à compressão para 3000 ciclos e 0,25 Hz (adaptado de Venda Oliveira et al., 2018).	23
Figura 2.17 Efeito do reforço do tipo de solo e das fibras de polipropileno no módulo de Young (E_{u50}) avaliado através de ensaios UCS monotônicos (UCS) e UCS pós ciclo (UCSpc) para 3000 ciclos e 0,25 Hz (adaptado de Venda Oliveira et al., 2018)	24
Figura 2.18 (a) efeito do tipo de solo sobre a extensão axial permanente acumulada para 3000 ciclos e 0,25 Hz (b) Efeito da extensão axial permanente na areia em estudo (adaptado de Venda Oliveira et al., 2018)	24
Figura 3.1 Curva granulométrica do solo granular através da análise do granulômetro laser	26
Figura 3.2 Curva de frequência do solo granular através da análise do granulômetro laser ...	26
Figura 3.3 Representação gráfica dos resultados do ensaio de Proctor leve para determinação do teor ótimo de umidade e peso volúmico seco máximo para o solo em estudo...	28
Figura 4.1 Etapas de preparação: a) Espalhamento e peneiramento do solo utilizado; b) Fibras e ligante pesados e acondicionados	32
Figura 4.2 Etapas de preparação: a) Mistura do ligante cimentício com água; b) Remoção do compósito das paredes laterais da misturadora; c) Pás utilizadas: “rabo de porco”, para polipropileno; comum, para fibras de sisal e restantes misturas	32
Figura 4.3 Itens utilizados na moldagem	33
Figura 4.4 Etapas de moldagem: a) Compactação dos provetes; b) Retificação das amostras.	34
Figura 4.5 Cálculo de resistência à tração do ensaio de compressão diametral	35
Figura 4.6 Prensa Tristar 5000kg Stepless Compression Test Machine	36
Figura 4.7 Correção do “ <i>bending error</i> ” da amostra STS_C_3_125_T1	37
Figura 4.8 Prensa modelo ELDYN da GDS Instruments	39
Figura 4.9 Sistema de controlo e aquisição de dados da prensa cíclica	40
Figura 4.10 Evolução da força com o número de ciclos da amostra CIC_C_175_1_T1	40
Figura 5.1 Resistência máxima à tração (f_{ct-max}) dos provetes: “Solo”; “Solo + Sisal”; “Solo + Polipropileno”	42
Figura 5.2 Ensaios STS monotónico de referência - Evolução da resistência máxima à tração (f_{ct-max}) dos provetes “Solo+Ligante”, com diferentes dosagens de ligante, em relação ao tempo de cura	43
Figura 5.3 Curvas tensão-extensão “Solo+Ligante” conforme o tempo de cura, com diferentes dosagens de ligante, dos ensaios de referência (STS): a) 3 dias; b) 7 dias; c) 14 dias; d) 28 dias.	44
Figura 5.4 Extensão axial permanente ($\epsilon_{ax-perm}$) “Solo + Ligante” conforme a frequência de aplicação de carga dos ensaios cíclicos (CIC): Dosagem de ligante 125kg/m ³ : a) 1 Hz; Dosagem de ligante 175kg/m ³ : b) 0,25 Hz; c) 1 Hz; d) 2 Hz; e) 4 Hz	45

Figura 5.5 Extensão axial permanente ($\epsilon_{ax-perm}$) “Solo+Ligante” conforme a frequência de aplicação de carga dos ensaios cíclicos (CIC), em relação ao tempo de ensaio. ..	46
Figura 5.6 Curvas tensão-extensão “Solo+Ligante” conforme a frequência de aplicação de carga dos ensaios STSpc. Dosagem de ligante 125kg/m ³ : a) 1 Hz; Dosagem de ligante 175kg/m ³ : b) 0,25 Hz; c) 1 Hz; d) 2 Hz; e) 4 Hz.....	47
Figura 5.7 Resistência à tração média (f_{ct-med}) “Solo+Ligante” conforme a frequência de aplicação de carga dos ensaios pós-ciclo (STSpc). a) 125kg/m ³ ; b) 175kg/m ³	48
Figura 5.8 Extensão axial permanente média ($\epsilon_{ax-perm-med}$) “Solo+Ligante” conforme a frequência de aplicação de carga (CIC), em relação a extensão de rotura. a) 125kg/m ³ b) 175kg/m ³	48
Figura 5.9 Ensaios STS monotônico de referência - Evolução da resistência máxima à tração (f_{ct-max}) dos provetes “Solo+Ligante+Sisal”, com diferentes dosagens de ligante, em relação ao tempo de cura.	49
Figura 5.10 Curvas tensão-extensão “Solo+Ligante+Sisal” conforme o tempo de cura, com diferentes dosagens de ligante, dos ensaios de referência (STS): a) 3 dias; b) 7 dias; c) 14 dias; d) 28 dias.....	50
Figura 5.11 Extensão axial permanente (ϵ_{ax_perm}) “Solo+Ligante+Sisal” conforme a frequência de aplicação de carga dos ensaios cíclicos (CIC): Dosagem de ligante 125kg/m ³ a) 1 Hz; Dosagem de ligante 175kg/m ³ b) 0,25 Hz; c) 1 Hz; d) 2 Hz; e) 4 Hz.	51
Figura 5.12 Extensão axial permanente ($\epsilon_{ax-perm}$) “Solo+Ligante+Sisal” com o tempo para diferentes frequências de aplicação de carga dos ensaios cíclicos (CIC).....	52
Figura 5.13 Curvas tensão-extensão “Solo+Ligante+Sisal” conforme a frequência de aplicação de carga dos ensaios STSpc. Dosagem de ligante 125kg/m ³ a) 1 Hz; Dosagem de ligante 175kg/m ³ b) 0,25 Hz; c) 1 Hz; d) 2 Hz; e) 4 Hz.....	53
Figura 5.14 Resistência à tração média (f_{ct-med}) “Solo+Ligante+Sisal” conforme a frequência de aplicação de carga dos ensaios pós-ciclo (STSpc). a) 125kg/m ³ ; b) 175kg/m ³	54
Figura 5.15 Extensão axial permanente média ($\epsilon_{ax-perm-med}$) “Solo+Ligante+Sisal” conforme a frequência de aplicação de carga (CIC), em relação a extensão de rotura. a) 125kg/m ³ b) 175kg/m ³	54
Figura 5.16 Ensaios STS monotônico de referência - Evolução da resistência máxima à tração (f_{ct-max}) dos provetes “Solo+Polipropileno+Ligante”, em relação ao tempo de cura.	56
Figura 5.17 Curvas tensão-extensão “Solo+Ligante+Polipropileno” conforme o tempo de cura, dos ensaios de referência (STS): a) 3 dias; b) 7 dias; c) 14 dias; d) 28 dias.	56
Figura 5.18 Extensão axial permanente ($\epsilon_{ax-perm}$) “Solo+Ligante+Polipropileno” conforme a frequência de aplicação de carga dos ensaios cíclicos (CIC). Dosagem de ligante 175kg/m ³ a) 0,25 Hz; b) 1 Hz; c) 2 Hz; d) 4 Hz.....	57
Figura 5.19 Extensão axial permanente ($\epsilon_{ax-perm}$) “Solo+Ligante+Polipropileno” com o tempo para diferentes frequências de aplicação de carga dos ensaios cíclicos (CIC).....	58
Figura 5.20 Curvas tensão-extensão “Solo+Ligante+Polipropileno” conforme a frequência de aplicação de carga dos ensaios pós-ciclo (STSpc). Dosagem de ligante 175kg/m ³ a) 0,25 Hz; b) 1 Hz; c) 2 Hz; d) 4 Hz	59

Figura 5.21 Resistência à tração média (f_{ct-med}) “Solo+Ligante+Polipropileno” conforme a frequência de aplicação de carga dos ensaios pós-ciclo (STSpC). Dosagem de ligante 175kg/m ³	60
Figura 5.22 Extensão axial permanente média ($\epsilon_{ax-perm-med}$) “Solo+Ligante+Polipropileno” conforme a frequência de aplicação de carga (CIC), em relação a extensão de rotura.	60
Figura 5.23 Comparação das curvas tensão-extensão com diferente dosagem de ligante (STS)	61
Figura 5.24 Comparação das curvas de extensão axial permanente ($\epsilon_{ax-perm}$), com diferente dosagem de ligante, durante ensaio cíclico de 1 Hz.....	61
Figura 5.25 Comparação das curvas tensão-extensão com diferente dosagem de ligante, após ensaio cíclico (STSpC).....	62
Figura 5.26 Comparação das curvas tensão-extensão dos ensaios de referência monotônicos (175 kg/m ³).....	63
Figura 5.27 Comparação das curvas de extensão axial permanente ($\epsilon_{ax-perm}$) durante ensaio cíclico de 0,25 Hz.....	63
Figura 5.28 Comparação das curvas de extensão axial permanente ($\epsilon_{ax-perm}$) durante ensaio cíclico de 1 Hz.....	64
Figura 5.29 Comparação das curvas de extensão axial permanente ($\epsilon_{ax-perm}$) durante ensaio cíclico de 2 Hz.....	64
Figura 5.30 Comparação das curvas de extensão axial permanente ($\epsilon_{ax-perm}$) durante ensaio cíclico de 4 Hz.....	64
Figura 5.31 Comparação das curvas tensão-extensão após ensaio cíclico de 0,25 Hz.....	65
Figura 5.32 Comparação das curvas tensão-extensão após ensaio cíclico de 1 Hz.....	65
Figura 5.33 Comparação das curvas tensão-extensão após ensaio cíclico de 2 Hz.....	66
Figura 5.34 Comparação das curvas tensão-extensão após ensaio cíclico de 4 Hz.....	66
Figura 5.35 Valores de resistência máxima à tração conforme frequência aplicada.....	67
Figura A.1 Equipamento para ensaios de tração SHIMADZU AG-X	81
Figura A.2 Curvas força-deslocamento dos ensaios de tração das fibras de sisal.....	82
Figura B.1 Ensaios de molhagem das fibras de sisal: a) antes e b) após a imersão em água.. ..	83

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Sumário dos ensaios de compressão não confinada (adaptado de Park, 2011).	22
Quadro 3.1 – Dados obtidos nos ensaios de caracterização do solo.....	28
Quadro 3.2 – Composição química do cimento Portland utilizado (conforme dados da CIMPOR)	29
Quadro 3.3 – Propriedades geométricas e mecânicas das fibras (conforme dados dos fornecedores).....	29
Quadro 4.1 – Plano de ensaios de compressão diametral monotônicos (STS)	34
Quadro 4.2 – Plano de ensaios de compressão diametral monotônicos (STS)	35
Quadro 4.3 – Plano de ensaios de compressão diametral cíclicos (CIC)	38
Quadro 5.1 – Resumo dos resultados obtidos para ensaios STS do “Solo”, “Solo+Sisal” e “Solo+Polipropileno”	42
Quadro 5.2 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios STS de referência para mistura “Solo+Ligante”.....	43
Quadro 5.3 – Parâmetros utilizados na realização dos ensaios cíclicos (CIC) “Solo+Ligante”	45
Quadro 5.4 – Resumo dos resultados obtidos para ensaios STSpc “Solo+Ligante” (28 dias de cura).....	46
Quadro 5.5 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios STS de referência para mistura “Solo+Ligante+Sisal”.....	49
Quadro 5.6 – Parâmetros utilizados na realização dos ensaios cíclicos (CIC) “Solo+Ligante+Sisal”	51
Quadro 5.7 – Resumo dos resultados obtidos para ensaios STSpc “Solo+Ligante+Sisal” (28 dias de cura).....	53
Quadro 5.8 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios STS de referência para mistura “Solo+Ligante+Polipropileno”.....	55
Quadro 5.9 – Parâmetros utilizados na realização dos ensaios cíclicos (CIC) “Solo+Ligante+Polipropileno”	57
Quadro 5.10 – Resumo dos resultados obtidos para ensaios STSpc “Solo+Ligante+Polipropileno” (28 dias de cura).....	58
Quadro B.1 – Resumo dos resultados obtidos no ensaio de molhagem das fibras de sisal.....	83

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO DO TRABALHO

A constante evolução dos estudos para melhoria dos solos vem de encontro com o desenvolvimento tecnológico ao longo das últimas décadas. Esse crescimento científico tem por objetivo sanar dificuldades encontradas na questão de ocupação territorial em metrópoles e centros industriais, contribuindo para a melhoria das infraestruturas. A elaboração de novas vias de comunicação, aeroportos, edifícios industriais e habitacionais, são de extrema importância para o crescimento econômico de qualquer região. O desenvolvimento desses estudos tem permitido a utilização de zonas em que o solo, em seu estado natural, exibe características de baixa capacidade mecânica e elevada deformabilidade, sendo incapazes de suportar oriundas das construções sobrejacentes.

A busca por um método que seja capaz de satisfazer às questões práticas e econômicas impostas, levaram ao surgimento da técnica de melhoramento ou estabilização química de solos. Esta técnica visa a utilização do material existente no local da obra, sendo esse um elemento com qualidades inferiores na mistura com materiais aglomerantes, os ligantes. O uso do material encontrado no local tem como vantagem a redução no custo de execução e transporte, uma vez que este material seria descartado. A dificuldade e disponibilidade de materiais naturais com boas propriedades mecânicas é um dos grandes responsáveis pelo aumento no orçamento de uma obra. Dessa forma, a estabilização de solos torna-se uma solução comumente utilizada como alternativa para a problemática imposta, tendo sido notável o desenvolvimento ocorrido nas últimas décadas.

A técnica de estabilização do solo com cimento tem seu uso datado desde 1917, quando a J. H. Amies, visando utilizar diferentes quantidades de cimento Portland, buscava melhorar as características do material utilizado. Amies patenteou, nos E.U.A., a mistura desse material que confere ao solo propriedades que promove a redução das deformações plásticas, através do endurecimento desse material, além de possibilitar um ganho elevado de resistência conforme o teor de cimento adicionado (PCA, 1971). Esses resultados satisfatórios levaram à propagação desta técnica em todo o mundo com o passar dos anos, tendo seu maior crescimento durante a II Guerra Mundial, na Alemanha, com o intuito de possibilitar a mobilidade de tropas, levando à melhoria das vias de acesso e aeródromos do País. A utilização dessa técnica em território Português teve início após a guerra, em 1948, no Laboratório de Ensaios de Materiais e

Mecânica dos Solos situado em Lourenço Marques, visando a utilização da melhoria dos solos com cimento nas ex-colónias de Moçambique e Angola.

Ao longo dos anos constatou-se uma certa fragilidade e fissuração excessiva da mistura solo-cimento. Quando executada sobre uma camada de solo com características inferiores, a mistura está sujeita a tensões de tração, elevando o desgaste desse material compósito, sendo ainda maior quando submetida a cargas cíclicas. Assim sendo, a busca pelo incremento de um material que pudesse acrescentar características que reduzissem essas deficiências tornou-se objeto de estudo. Uma das formas encontradas passa pela adição de fibras (sintéticas e naturais), denominadas elementos de reforço do solo. Logo, mesmo que seja uma técnica muito antiga e constantemente utilizada, busca-se novas formas para se otimizar os teores de cimento empregado, fazendo-se uso de um compósito capaz de atingir características superiores.

Atualmente discute-se de forma constante o controle de emissões de gases prejudiciais à atmosfera, os gases CO₂ (dióxido de carbono), responsáveis pelo efeito estufa e, conseqüentemente, pelo aquecimento global. De acordo com Lehne e Preston (2018) a indústria do cimento gera, por ano, 8% de toda emissão desses gases no mundo. Portanto, a busca pela redução na produção de cimento é necessária, visando o controle de emissão de gases no futuro. A inclusão das fibras neste compósito também poderá contribuir para a redução no uso de cimento. Estudos desenvolvidos em todo o mundo constataram o uso satisfatório da inclusão de fibras nas misturas solo-cimento, conferindo características que elevam o controle da fissuração, aumento da resistência de pico e pós-pico, da durabilidade e ductilidade do material, fomentando o uso dessa técnica e incentivando novas investigações (Maher e Ho, 1994; Specht, 2000; Casagrande, 2001; Hejazi et al., 2012; Festugato et al., 2013; Correia, 2011).

O presente trabalho visa, através de ensaios laboratoriais, o estudo da aplicabilidade do compósito formado pela adição de fibras, de polipropileno e de sisal, em um solo arenoso cimentado, buscando obter um maior conhecimento do mecanismo de interação entre os três elementos, destacando a influência do tipo de fibra na resposta do material compósito. O estudo foi complementado com a análise da influência da quantidade de cimento para os provetes contendo fibras naturais. Destaca-se que, além dos ensaios de carregamento estático realizados, os ensaios de carregamento dinâmico contribuíram para o entendimento da forma como os elementos solo-cimento-fibra reagem perante ações cíclicas, promovidas por sismos, paragem de veículos de transporte ou induzidos por equipamentos industriais.

Diversos estudos realizados no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra abordaram o tema da utilização de fibras em diferentes tipos de solos cimentados (Teles, 2013; Porém, 2016; Cajada, 2017). Este presente trabalho surge de forma a complementar o conhecimento das interações existentes, visando a aplicabilidade do material compósito de solo cimentados com fibras.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O estudo aqui exposto divide-se em seis capítulos: (1) introdução, com a identificação do problema e objetivos da pesquisa; (2) revisão bibliográfica; (3) caracterização dos materiais; (4) procedimento experimental; (5) análise e discussão dos resultados; (6) conclusões e trabalhos futuros.

O primeiro capítulo constitui uma pequena introdução sobre o tema relacionado ao melhoramento dos solos. Colocando em destaque para os benefícios e problemas relacionados às misturas solo-cimento, indicando a utilização de novos elementos, as fibras, para elaboração de uma mistura capaz de conferir qualidades mecânicas satisfatórias ao material compósito.

O segundo capítulo tem por base a revisão da literatura existente. Nela são abordados conceitos de estabilização química de solos com ligantes cimentícios, e a utilização de fibras de polipropileno e de sisal para reforço dos solos. Ainda é referido o conceito de solo estabilizado quimicamente com adição de fibras sob ações estáticas e dinâmicas, utilizando ainda trabalhos científicos para fornecer informações capazes de auxiliar o desenvolvimento do programa experimental proposto.

No terceiro capítulo apresentam-se e caracterizam-se os materiais utilizados para a realização das misturas propostas na pesquisa. Descreve-se o solo utilizado, uma areia, em termos de granulometria e densidade das partículas sólidas. Apresentam-se ainda neste capítulo as características específicas das fibras, de polipropileno e sisal, e do ligante cimentício utilizado.

O quarto capítulo foca-se no programa experimental, demonstrando o procedimento laboratorial de preparação dos provetes, assim como o plano de ensaios de compressão diametral, sob carregamento monotônico e cíclico.

O penúltimo capítulo apresenta uma análise detalhada dos resultados obtidos nos ensaios, tendo como objetivo a compreensão do mecanismo de interação solo-cimento, solo-fibra e solo-cimento-fibra. Procura-se igualmente compreender as diferenças oriundas da alteração entre fibra natural e fibra sintética nas reações do material compósito, bem como a relevância do carregamento cíclico no comportamento mecânico global.

O capítulo seis resume as conclusões retiradas do estudo, elaborando uma análise final do conhecimento adquirido com este trabalho. Por fim, propõem-se sugestões de trabalhos que poderão ser desenvolvidos futuramente, na busca por mais pesquisas relacionadas ao assunto abordado nesta dissertação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MELHORAMENTO E ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Desde os primórdios da sociedade discute-se a utilização de técnicas e métodos com o intuito de aumentar a capacidade de ocupação do território. Uma das mais relevantes razões para tal é o acentuado crescimento populacional, responsável por uma pressão social em áreas urbanas e polos industriais.

A necessidade de ocupação territorial tem instigado cada vez maior interesse em estudos científicos, associado ao forte crescimento tecnológico obtido nas últimas décadas. Muitas práticas de construção puderam ser desenvolvidas a partir dessa necessidade, destacando-se as técnicas de reforço, melhoramento e estabilização de solos caracterizados, em geral, por baixa resistência e alta deformabilidade.

A ideia de melhoramento do solo teve início na antiguidade, sendo utilizada no desenvolvimento da principal estrada da antiga Roma, chamada de “Appian Way”, a primeira estrada quimicamente estabilizada, fazendo-se uso da cal (Nicholson, 2014). Porém, segundo Cristelo (2001), o maior progresso das técnicas de melhoramento dos solos está relacionado com o crescimento da indústria automobilística dos EUA, além de um significativo avanço durante a Segunda Guerra Mundial, incrementando a utilização do cimento para a estabilização de solos em aeroportos e vias de comunicação.

O melhoramento de solos distingue-se da estabilização conforme a quantidade de material ligante utilizado, o tipo do material e do grau de alteração das propriedades provocado pelo mesmo. Para Núñez (1991) consiste em solo estabilizado aquela mistura solo-aditivo que confere características que possibilitam a utilização do mesmo como pavimento rodoviário, enquanto solo melhorado não possui características suficientes para uso como base, devido à pequena parcela de ativo utilizado. Visto isso, é possível identificar a utilização do cimento na estabilização química de solos, abordado na seção a seguir, como o elemento com maior propagação de uso na atualidade.

2.2 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS COM LIGANTE CIMENTÍCIO

O início das tentativas de se obter uma construção com propriedades controladas de solo-cimento é datado de 1935. A Portland Cement Association (PCA) buscava dar veracidade aos

experimentos realizados em seus laboratórios e, com o auxílio do Bureau of Public Roads (BPR) e o Departamento de Estradas e Rodagens do Sul da Califórnia, construíram uma pista experimental com 2,5 km próximo a Johnsonville, South Carolina. O objetivo era obter uma construção econômica e durável, tendo os resultados confirmado a aplicabilidade da composição solo-cimento. Desde então, esse elemento passou a ser adotado como material para construção de pavimentos rodoviários em outros locais (Pitta, 1995).

A utilização da estabilização química de solos surge da necessidade de crescimento econômico dos centros metropolitanos, possibilitando igualmente a utilização de estradas secundárias e rurais em boas condições. A aplicação dessa técnica sempre teve como uso principal a execução de bases, sub-bases de estradas e aeródromos (Cristelo, 2001).

A estabilização do solo modifica a interação solo-água-ar, sendo comum o uso de ligantes com características cimentícias, tais como o cimento e a cal. Um solo torna-se estabilizado quando, através da aplicação de processos e técnicas, ocorre uma melhoria de propriedades, tais como: o aumento de resistência, rigidez e durabilidade e diminuição de sua deformabilidade (Ingles e Metcalf, 1972). O uso de materiais com propriedades aglutinantes no solo é responsável por gerar interações físico-químicas que conduzem a alterações de seu comportamento mecânico, mantendo tais melhorias durante a sua vida útil.

É possível notar uma similaridade entre o processo de estabilização do solo com o processo de criação do betão, visto que o uso do ligante tende a proporcionar um elemento mais rígido e resistente. Para Adaska (1991) a utilização de ligantes em solos gera uma interação mais frágil em solos muito finos, pois as ligações entre as partículas de solo impedem uma adequada mistura do ligante. Neste caso, torna-se necessário um tratamento prévio para a quebra dessa ligação antes mesmo do processo de estabilização.

2.2.1 Influência da mistura nas propriedades físicas do solo

Os cimentos do tipo Portland sempre tiveram maior uso e foco na estabilização química de solos, podendo-se fazer uso de quase todos os tipos de cimento. Sua utilização como base para estradas asfaltadas, ou, até como sub-base de pavimentos de betão teve um grande crescimento no último século, dada sua contribuição para a melhoria nas propriedades do solo (Wang, 2002).

Em solos arenosos, as primeiras horas de cura da mistura são suficientes para se atingir os requisitos desejados, aumentando seu valor para CBR (Califórnia Bearing Ratio) conforme o teor de aglomerante utilizado. Para Pitta (1984) a granulometria tem forte influência nos materiais finos, exigindo-se em geral um aumento do teor de cimento. Ingles e Metcalf (1972) indicam que valores típicos do teor solo-ligante utilizado varia de 2 a 4%, com relação ao seu peso, em solo granulares, mesmo havendo a possibilidade de estabilização com teores menores,

enquanto para argilas esse valor tem variação de 10 a 15%, mas podendo chegar a 25% em alguns casos para uma satisfatória estabilização. Os estudos demonstram que a quantidade de aglomerante e o tempo de cura são de extrema importância na variação dos limites de Atterberg dos solos estabilizados, mas que independentemente de tal factor, a mistura confere grande estabilidade volumétrica aos solos.

Pequenas quantidades de ligante só alteram as propriedades do solo, e valores medianos podem alterar suas características. Porém, o acréscimo elevado do teor de aglomerante não só aumentará os custos da obra, como também estabelecerá um comportamento frágil ao elemento, elevando a possibilidade do aparecimento de fissuração (Davies e Fendukly, 1994).

O processo de mistura em grande escala, ou seja, em campo, é menos eficiente que as técnicas laboratoriais existentes. Em laboratório é comum o manuseio de amostras remexidas, facilitando o processo de homogeneização da mistura, sendo possível controlar parâmetros como o volume de solo e a massa produzida. Em laboratório é possível controlar as condições de cura, sendo estas condições de extrema importância no do processo de ganho de resistência. O aumento da temperatura acelera o desenvolvimento das reações solo-ligante, contribuindo para o ganho de resistência. É aconselhável o uso de câmaras em que seja possível o controle de temperatura, de forma a reproduzir a temperatura de campo (Correia, 2011).

Para Davis e Fendukly (1994) mesmo que a técnica laboratorial seja rigorosamente controlada, é comum aumentar o teor de ligante utilizado em campo com um factor de $\sim 1,5$. Esta discrepância de resultados laboratório/campo deve-se ao facto do volume utilizado nas diferentes situações serem desproporcionais, levando a uma liberação de calor nas reações solo-ligante muito mais lenta em campo. Correia (2011) descreve outros factores que são capazes de gerar influência na análise e interpretação dos resultados obtidos em laboratório, tais como: a dimensão e a forma das amostras ensaiadas em laboratório, o tipo de água utilizada, a existência de percolação e desenvolvimento de ataques químicos e/ou físicos.

De exposto constata-se que mesmo um cuidadoso estudo em laboratório pode não conduzir a um teor de ligante mais eficiente para utilização em campo. É possível notar que a velocidade de modificação das propriedades da mistura solo-ligante sempre estará relacionada às características do solo tratado, do teor de ligante utilizado, da quantidade de água presente e/ou adicionada na mistura, do tipo e grau de compactação, do tempo e forma de cura, granulometria, e de uniformidade da mistura em questão.

2.2.2 Comportamento mecânico da mistura solo-cimento

O processo de mistura solo-cimento deve o seu desenvolvimento à ideia de se obter um ganho de resistência ao corte do solo. Segundo Clought et al. (1981) a resistência de corte do solo tem

três componentes distintas: a coesão, a dilatância e o atrito. Para os autores, a coesão tem relação direta com a ligação entre as partículas, enquanto a dilatância e o atrito têm relação direta com as tensões efetivas normais que atuam no plano de corte.

Ainda segundo Clough et al. (1981), a mistura solo-cimento tem menor extensão ao atingir o pico de resistência do elemento, quando comparado com o solo não estabilizado (sem cimento). Isso está diretamente ligado à obtenção de um material mais coeso através da mistura. As deformações impostas ao material promovem a quebra de sua ligação cimentícia, induzindo à predominância da resistência de atrito até se atingir sua rotura. A partir daí, a sua resistência de corte depende somente do contato entre as partículas. Essa resistência de pico tem seu aumento gradual conforme se eleva seu grau de cimentação. Hammond (1981) acrescenta que para amostras com 7 dias de cura, a taxa de recuperação de fissuração imposta tende a ser maior quando comparadas com amostras de 28 dias de cura. Facto que demonstra que o tempo de cura também é um factor determinante na obtenção de uma maior resistência do material.

Vários estudos sobre o tema em questão demonstraram que a mistura solo-cimento é capaz de criar um material compósito com comportamento distinto do solo não estabilizado. Esses estudos baseiam-se em ensaios de compressão não confinada (UCS), ensaios de compressão diametral (DTS), ensaios edométricos, além de ensaios triaxiais, entre outros. Desses estudos conclui-se, principalmente, que há um crescimento linear da resistência à compressão não-confinada com o acréscimo do teor de cimento (Terashi, 1997; Sprecht, 2000; Consoli et al., 2009, 2010; Foppa, 2005; Silva, 2011; Costa, 2012; Cajada, 2017).

Além do aumento da resistência, o processo de cimentação da mistura solo-cimento afeta diretamente a rigidez do material estabilizado, o qual se traduz em um módulo de deformabilidade em crescimento de acordo com o aumento do ligante. Esse processo também é perceptível quando analisado o seu comportamento tensão-extensão. A cimentação causa um aumento no domínio de tensões, apresentando um comportamento frágil de rotura (Leroueil e Vaughan, 1990; Chang e Woods, 1992).

Os estudos desenvolvidos por Clough et al. (1981) e Consoli et al. (2010) o comportamento do solo cimentado como frágil, independente da natureza do seu processo de cimentação (natural ou artificial). Os autores expõem que o comportamento do solo só se altera quando se aumenta as tensões de confinamento, passando a ter resposta dúctil, citando que nessas situações a componente friccional é mais importante do que a contribuição da cimentação.

Os mesmos autores analisaram o comportamento da cimentação em areias, podendo ser perceptível que as interações físico-químicas causadas pelo ligante são mais resistentes quando comparadas a outros tipos de solo, gerando assim uma melhor cimentação. Para Chang e Woods (1992) este facto se dá devido ao contato entre o solo-cimento, o que gera maior número de

vínculos com os grãos de areia, tendo também influência nessas ligações a percentagem de vazios presentes no solo que são preenchidos pelo ligante, conforme demonstrado na Figura 2.1 de Cruz (2004).

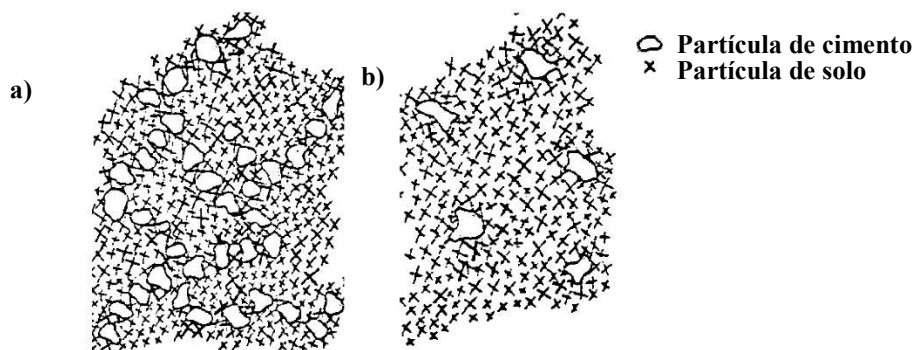


Figura 2.1 Esquema de solo com: a) alto teor em cimento; b) baixo teor em cimento (Catton, 1962 adaptado de Cruz, 2004)

Consoli et al. (2009) estipula uma percentagem de até 10% na utilização de cimento, em relação ao peso específico seco das areias, para se tornar satisfatória a estabilização. Os autores afirmam que a utilização de maior teor de cimento ocasiona um comportamento cada vez mais frágil do elemento. Misturas em que o teor de cimento é elevado, aumentam sua variação volumétrica (quebra das ligações cimentícias) ao se aproximar do pico de rotura. Após uma compressão inicial do material, o mesmo sofre uma expansão, causando a diminuição da taxa de dilatância à medida que se aproxima da rotura. Quando se atinge o estado último já não há qualquer variação volumétrica do material (Clought et al., 1981; Yoshinaka e Yamabe, 1981).

Alguns factores referentes à preparação da mistura tendem a alterar os valores de resistência final encontrados. Entre eles, as condições de cura da mistura têm grande influência no comportamento da estabilização. Costa (2012) usou em seus estudos amostras com cura imersa em água, e comparou com amostras submetidas à cura seca ao ar. O autor constatou que o ganho maior de resistência final da mistura se dá quando os fenómenos de hidratação dos provetes ocorrem de forma gradual e equilibrada, facto que ocorre quando se submete tanto à cura em câmara húmida quanto seca ao ar.

Outros factores considerados em estudos sobre estabilização química com ligantes cimentícios são as condições de tempo e velocidade da mistura em ensaios laboratoriais. Estas características estabelecidas não devem ser levadas para o campo, pois não conferem com precisão às características reais. A adequação destes factores deve ser feita de modo a mistura *in situ* ter condições satisfatórias para obtenção de um provete de boa qualidade (Correia, 2011). A análise da influência do teor de cimento na resistência do solo foi estudada por Cruz (2004), utilizando um solo caracterizado como areia argilosa, com adição de cimento Portland tipo II, com teores de 6% e 10%, para estabilização química. Através do ensaio de compressão diametral, o autor obteve uma resistência à tração mais elevada nos provetes com a inclusão de

10% de cimento (referente à massa seca do solo), perceptível na Figura 2.2. O desempenho mais satisfatório neste estudo deu-se nas amostras com maior teor de ligante, devido ao elevado número de ligações cimentadas nos pontos de contato entre as partículas do solo.

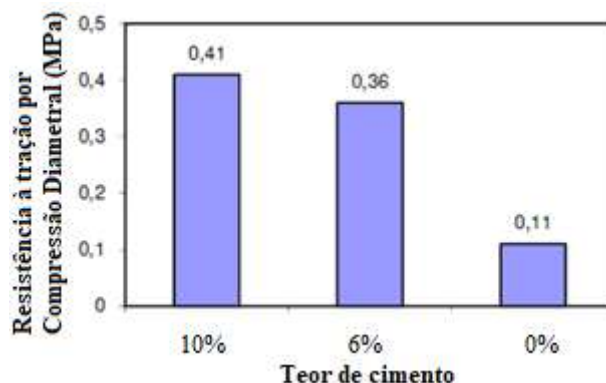


Figura 2.2 - Resistência à tração por compressão diametral para as composições com diferentes teores de cimento (adaptado de Cruz, 2004)

Ao analisar o tempo de cura em laboratório, o autor evidenciou o acréscimo na resistência à compressão simples da mistura de solo-cimento com o passar dos dias (Figura 2.3.). É evidente o crescimento da resistência nos primeiros 7 dias, muito devido às reações de hidratação do cimento, assim como acréscimos relevantes de resistência até os 28 dias.

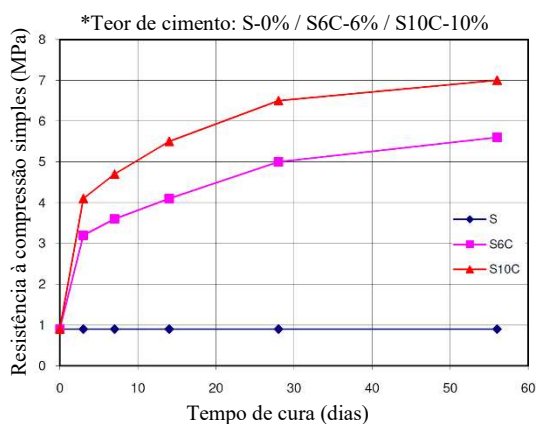


Figura 2.3 Resistência à compressão simples para misturas com diferentes teores de cimento (adaptado de Cruz, 2004)

Mais recentemente Sbahieh e Teymur (2019), também através de ensaios à compressão simples, ratificaram o comportamento frágil da estabilização química com ligantes cimentícios, através da análise das curvas tensão-extensão. Os autores analisaram também o ganho de resistência com o aumento do tempo de cura do material e, com isso, estabeleceram os gráficos demonstrados na Figura 2.4. O solo utilizado neste estudo tratou-se de uma areia mal graduada oriunda de Akpinar, na Turquia, e o cimento utilizado na estabilização foi um cimento Portland CEM V/B(P). O pico de tensão aumentou consideravelmente em amostras ensaiadas com 28

dias. O aumento do tempo de cura evidenciou o ganho de resistência, atingindo valores entre 2,54 até 15,6 kg/cm² (1 kg/cm² = 100 kPa).

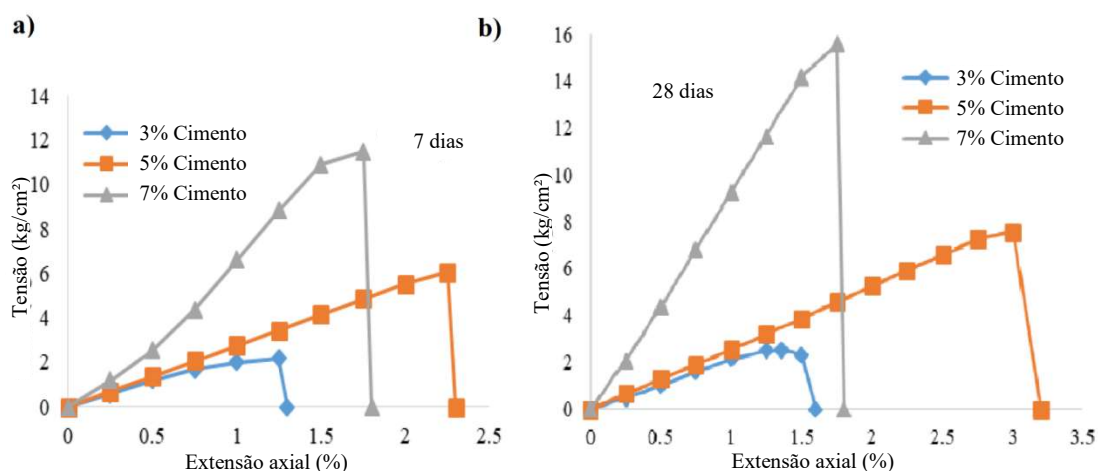


Figura 2.4 (a) Curvas de tensão-extensão com diferentes teores de cimento após cura por 7 dias; (b) Curvas de tensão-extensão com diferentes teores de cimento após cura por 28 dias (adaptado de Sbahieh e Teymur, 2019)

Alguns autores estabelecem uma correlação entre a resistência à tração e a resistência à compressão simples, em solos arenosos estabilizados com ligantes cimentícios, considerando que a primeira é equivalente a ~15% o valor da segunda (Consoli et al., 2010; Floss, 2012).

Muitos são os usos associados à estabilização química de solos com cimento. Em estradas a busca por material adequado de base muitas vezes torna-se difícil devido às grandes distâncias. A estabilização química com ligante cimentício é uma alternativa rápida e eficaz. Estudos demonstraram que o uso do solo-cimento tem sido eficaz não só como base de pavimentos, mas também para controle de declive em barragem de terra, controle de liquefação em areias, além de servir de base para fundações (Ingles e Metcalf, 1972; Dupas e Pecker, 1979).

O uso de ligantes cimentícios para estabilização química, com destaque para a pavimentação, tem por principais benefícios um maior ganho de resistência, baixa extensão, e boa dissipação de energia, minimizando as tensões no subleito de pavimentos. Porém, o seu comportamento frágil tem sido um agente desmotivador para seu uso, o que leva a estudos associando o uso de novos elementos (fibras artificiais e naturais) à estabilização química (Davies e Fendrukly, 1994).

2.3 COMPORTAMENTO DOS SOLOS REFORÇADO COM FIBRAS

A adição de fibras no solo tem uso há séculos, muitas vezes através de experiências empíricas. Assim como identificado por Casagrande (2001), a utilização de fibras vem desde a Mesopotâmia, onde se utilizava de camadas de solo intercaladas de raízes, ou até mesmo em

estradas Incas no Peru, onde se utilizava a lã de lhama, material com grande disponibilidade no local.

Diferentes tipos de fibras podem ser encontrados em obras geotécnicas, a variar as aplicações conforme as características de cada uma. As fibras denominadas sintéticas (poliméricas e metálicas) demonstram maior durabilidade quando comparadas às fibras denominadas naturais. As fibras sintéticas possuem maior flexibilidade, com efeitos no modo de rotura e no comportamento último do solo. Em contrapartida, as fibras naturais têm suas propriedades mecânicas mais rígidas, originando, em geral, uma maior resistência à rotura do material solo-fibra (Montardo, 1999).

Para solos granulares o ganho de resistência ao corte também é perceptível. Isso se deve ao intertravamento que a fibra é capaz de causar, gerando maior ligação no material compósito, conforme demonstrado por McGown et al. (1978) e, em estudos mais recentes, Noorzad (2015). Os autores demonstraram que a deformabilidade e resistência do solo têm uma melhoria considerável, conforme o teor de fibra aumenta. O comportamento tensão-extensão depende das características das fibras e do solo utilizados, tais como o comprimento das fibras e a dimensão dos grãos de solo, teor de água e densidade seca do solo. Na Figura 2.5, Kodicherla et al. (2018) explicam a forma em que ocorre o mecanismo de intertravamento entre os elementos.

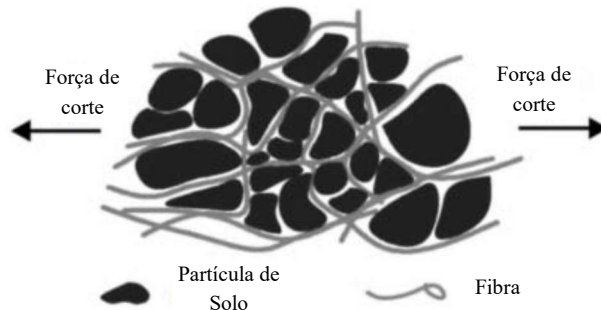


Figura 2.5 Mecanismo de interface entre solo e fibra (adaptado de Kodicherla et al., 2018)

Mais recentemente, Pino (2015) confirmou tais factos e acrescentou que a adição de fibras reduz a capacidade das partículas de solo quebrarem, sendo este facto mais acentuado em solos bem graduados. Em seus estudos, o autor afirma haver forte relação entre a capacidade da fibra em prevenir a quebra de partículas e a capacidade de limitar as mudanças na forma das partículas.

O aumento do teor de fibras e a variação do seu comprimento são responsáveis por promover alterações no ângulo de atrito interno (φ') e da coesão (c') do solo. Jiang et al. (2010) demonstrou com ensaios de compressão não confinada que, o reforço do solo com pequenas fibras de polipropileno é capaz de elevar estes parâmetros de forma considerável, conforme observado na Figura 2.6.

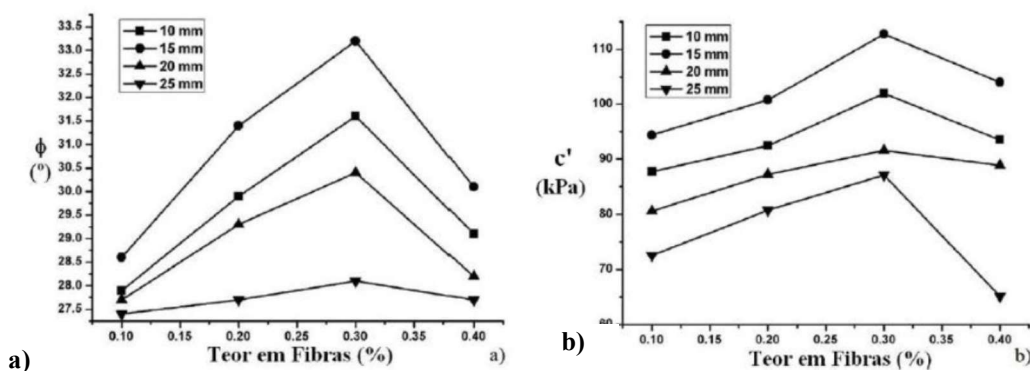


Figura 2.6 Efeito do teor em fibras e do seu comprimento: a) no ângulo de atrito interno; b) na coesão do solo (Jiang et al., 2010)

Outros autores identificaram que a resistência pós-pico da mistura solo-fibra aumenta com o acréscimo da quantidade de elementos de reforço (Maher e Ho, 1994; Consoli et al., 2009; Casagrande, 2001; Heineck, 2002; Silva, 2007; Cajada, 2017). Existe ainda uma discordância entre autores quanto ao módulo de deformabilidade do solo fruto da adição de fibras. Enquanto McGown et al. (1978) e Nataraj et al. (1996) indicam um aumento deste módulo com o aumento do teor de fibras, Feuerharmel (2000) indica a redução do mesmo módulo na mesma situação.

A extensão plástica é a principal responsável pela mobilização dos esforços de adesão do solo com as fibras. Specht (2000) demonstrou que as fibras são capazes de distribuir também as deformações, aumentando a zona deformada do elemento. Feuerharmel (2000) realizou uma série de ensaios com diferentes tipos de fibras com o intuito de estudar o seu efeito em relação à sua resistência ao corte em areias. O autor identificou que fibras com módulo de elasticidade baixo não rompem durante o ensaio, sendo idealmente extensíveis, além de constatarem que o aumento do comprimento também é capaz de aumentar a resistência ao corte das areias até um certo ponto, não sendo perceptível com comprimentos muito elevados de fibras.

Comparando fibras orientadas e fibras distribuídas aleatoriamente, diversos autores (Maher e Gray, 1990; Silva, 2007) constataram que a segunda situação tem por vantagem a diminuição da anisotropia. Fibras distribuídas aleatoriamente não conduzem ao aparecimento de planos preferenciais de fraqueza no elemento. É possível estabelecer que o intertravamento oriundo da distribuição aleatória de fibras conduz à transferência das tensões aplicadas ao solo para as mesmas, solicitando a resistência à tração das fibras. As fibras induzem ao solo uma maior capacidade de absorção de energia, sendo as que possuem menor módulo de elasticidade as mais eficientes neste quesito. As fibras que possuem maior módulo de elasticidade têm maior contribuição na resistência (Saran, 2010).

O estudo do comportamento do solo reforçado com fibras mais rígidas (em geral, as naturais) ou mais flexíveis (em geral, as sintéticas) é de enorme importância para a compreensão da

resposta do material composto, com particular destaque para as fibras de Sisal e de Polipropileno, objeto de estudo na presente tese.

2.3.1 Fibras naturais de Sisal

Fibras naturais são recursos renováveis, em geral com um baixo preço de mercado e com uma grande disponibilidade, com características higroscópicas e hidrofílicas. Alguns estudos têm sido realizados com o intuito de identificar o comportamento de fibras naturais para o uso em obras geotécnicas, visando estabelecer parâmetros de resistência e características que possibilitam o melhoramento de solos. Dentre as fibras naturais existentes a fibra de Sisal, destacada neste estudo, tem aplicação acentuada em todo o mundo, tendo-se tornado uma das fibras mais comercializáveis. Isto deve-se ao facto da planta de sisal, *Agave sisalana*, resistir a climas semiáridos, sendo cultivada até em regiões estéreis e desertas. As fibras são extraídas das folhas dessa planta.

Na Figura 2.7 é exemplificado a estrutura hierárquica deste tipo de fibra (Tôledo Filho et al., 1999; Prabakar 2002; Bordoloi, 2017). Fibras como as de sisal, cânhamo, coco e celulose têm sido objeto de vários estudos, apesar da possibilidade de proliferação de microrganismos que podem danificar sua vida útil. Tendo o comportamento do solo como referencial, pode-se afirmar que o comportamento do mesmo ainda é de difícil compreensão quando incrementado com fibras de reforço (Samuel, 2012).

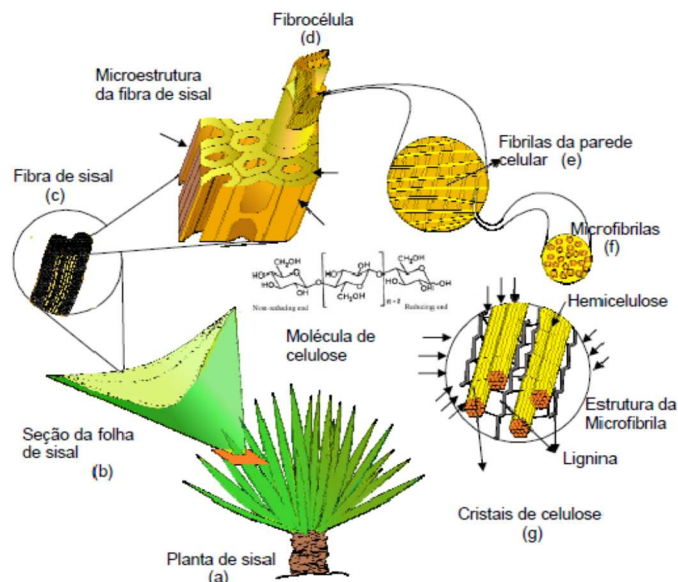


Figura 2.7 Estrutura hierárquica de uma fibra de sisal (Melo Filho, 2012)

Para Samuel (2012) fibras naturais, como as de Ukam e Sisal, podem ser alternativas para uso sustentável em detrimento a outros materiais prejudiciais ao meio ambiente, diminuindo também os custos na construção, sendo um ótimo concorrente a fibras sintéticas poliméricas.

Mais recentemente, visando estabelecer parâmetros para o acréscimo de infiltração de água em solos com a inserção de fibras naturais, Methacanon et al. (2010) e Bordoloi et al. (2017), reportaram que este aumento deve-se ao grande fluxo de água existente na interface solo-fibra. Os autores acrescentam que o fluxo de água se torna maior em fibras com densidade menor e com rugosidade maior. Esse fluxo acaba gerando no solo, conforme descrito na Figura 2.8. Para fibras mais onduladas o efeito de infiltração diminui. Com o intuito de estudar o efeito das fibras naturais no processo de secagem do solo, Ghavami et al. (1999) conseguiu estabelecer uma relação entre o efeito de retração, oriundo desse processo, com a contribuição na prevenção de fissuras, tal como descrito na Figura 2.8.

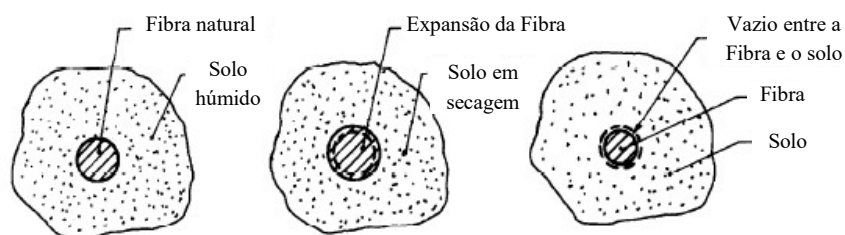


Figura 2.8 Interação de fibras naturais com o solo em secagem (adaptado de Ghavami et al., 1999)

Ao se analisar algumas propriedades específicas, como resistência à tração e resistência ao impacto, nota-se um benefício mais acentuado das fibras naturais (Sisal, Cânhamo, Kenaf, etc.) do que com fibras sintéticas (Wambua, 2003). Dentre os principais efeitos benéficos do reforço da fibra no solo destacam-se o atrito, e a ligação entre solo e fibra, consequência do intertravamento promovido pela presença das fibras (Figura 2.9). Este efeito é capaz de elevar as propriedades mecânicas do material compósito.

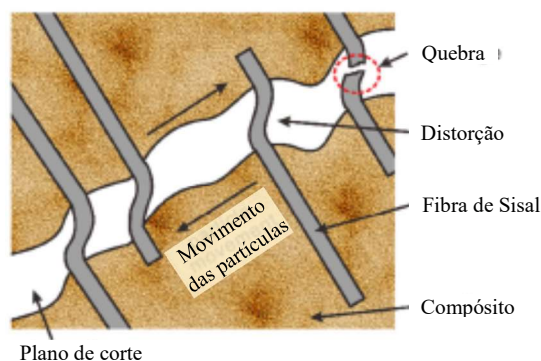


Figura 2.9 Desenho esquemático do reforço de fibra de Sisal durante o processo de rotura (adaptado de Wei e Meyer, 2014)

Estudos realizados ao longo dos anos comprovaram que as fibras naturais possuem normalmente baixos módulos de elasticidade e elevada resistência à tração, aumentando a resistência ao impacto quando utilizada nos solos, possibilitando também o trabalho do elemento de reforço no estágio pós-fissuração, e o incremento de isolamento térmico e acústico (Agopyan e Savastano Jr., 1997 apud. Silva, 2002).

A presença das fibras é capaz de proporcionar outros benefícios ao material compósito, tais como: prevenir a formação de fissuras por tração, reduzir a ocorrência de liquefação, aumentar a condutividade hidráulica e reduzir a térmica, e diminuir a fragilidade do solo e a tendência de dilatação em solos expansivos. Para solos granulares e argilosos, o uso de fibras naturais é responsável por proporcionar uma redução da densidade seca máxima do material compósito, dependendo do teor em fibras. Isso torna a aplicação das fibras naturais viável em inúmeros campos da geotécnica (Hejazi et al., 2012).

Prabakar et al. (2002) realizou um estudo específico sobre fibras naturais de Sisal como elemento de reforço em solos granulares. Os autores demonstraram que as mesmas são capazes de reduzir a densidade seca de um solo, de forma linear, pois possuem um peso específico baixo. Além disso, são capazes de aumentar a coesão do solo, apesar de seu incremento gerar um aumento do teor de matéria orgânica na composição solo-fibra.

Os mesmos autores confirmaram que o aumento do teor de fibra aumenta a resistência ao corte, de forma não linear, visto que para percentagens maiores a resistência começa a decrescer. Quando essa percentagem é elevada, a densidade do elemento solo-fibra reduz-se, o que conduz à redução da resistência. Um outro elemento que tem forte influência nas características mecânicas do material compósito é o comprimento da fibra, o qual é capaz de interferir de forma não-linear na resistência ao corte. Para dimensões até 20 mm a resistência ao corte de pico se eleva-se. Para comprimentos superiores a resistência tende a decrescer, devido ao comprimento da fibra não gerar um intertravamento correto das com o solo. Para os autores o comportamento da mistura solo-sisal pode ser não linear em situações de altas tensões no solo, sendo necessário mais estudos a respeito do tema.

2.3.2 Fibras sintéticas de Polipropileno

A família das fibras sintéticas tem para si uma grande vantagem perante às demais por possuírem uma vasta gama de opções, existindo grande experiência e conhecimento quanto às suas formas e características. A grande gama de variedades ocasiona comportamentos diferentes, variando conforme a fibra utilizada. Esta variação de propriedades das fibras é devido ao processo de produção e ao material constituinte da mesma.

As fibras sintéticas existem atualmente em vários formatos, desde as fibriladas, com um formato trançado e esticadas transversalmente, até às fibras em formato de malha, as quais proporcionam maior intertravamento com as partículas do solo. Dentre as opções de fibras sintéticas, talvez a que maior destaque tem tido sejam as fibras de polipropileno. Uma grande quantidade de estudos a esse respeito de seu uso tem sido desenvolvido ao longo dos anos e serão aqui abordados seus resultados, de forma a auxiliar a compreensão de seu comportamento

(Freitag, 1986; Fuehermel, 2000; Specht, 2000; Tang et al., 2006; Cai, 2006; Consoli et al., 2009; Soğancı, 2015; Correia et al., 2015; Venda Oliveira et al., 2018; entre outros).

Fibras de polipropileno têm na sua composição elementos que proporcionam uma consistência plástica ao elemento, sendo um material termoplástico. Segundo Hollaway (1994) esse tipo de fibra é constituído por longas séries de cadeias de moléculas polimerizadas, possibilitando que essas moléculas deslizem umas sobre as outras. Esse tipo de fibra possui baixo módulo de elasticidade e elevada resistência à tração. As fibras sintéticas de polipropileno, em geral, possuem resistência à compactação quando inseridas nos solos arenosos e siltosos, conforme comprovado por Hoare (1979) e Silva et al. (1995).

A inclusão destas fibras também é capaz de reduzir a permeabilidade em solos granulares, com a formação de uma barreira que impede a passagem da água, enquanto em solos argilosos aumenta a permeabilidade, gerando caminhos preferenciais de fluxo no solo.

A queda da resistência pós-pico é reduzida com a presença destas fibras. Estudos demonstram que a zona de corte aumenta com o teor de fibras no solo, assim como com a rigidez e aderência das mesmas (Maher e Woods, 1990; Teodoro, 1999).

As fibras sintéticas são capazes de gerar alteração na resistência à compressão não confinada. Os estudos demonstraram um significativo aumento na mesma, possuindo também uma extensão elevada na rotura. Isso demonstra que este reforço é capaz de aumentar a absorção de energia. A força de intertravamento das fibras no solo, incluindo a rugosidade e o atrito na interface, são os maiores influenciadores nos benefícios gerados nessa mistura. Na Figura 2.10 é possível identificar que, ao se elevar o comprimento das fibras, também se eleva a resistência de pico a perda de resistência pós pico (Freitag, 1986).

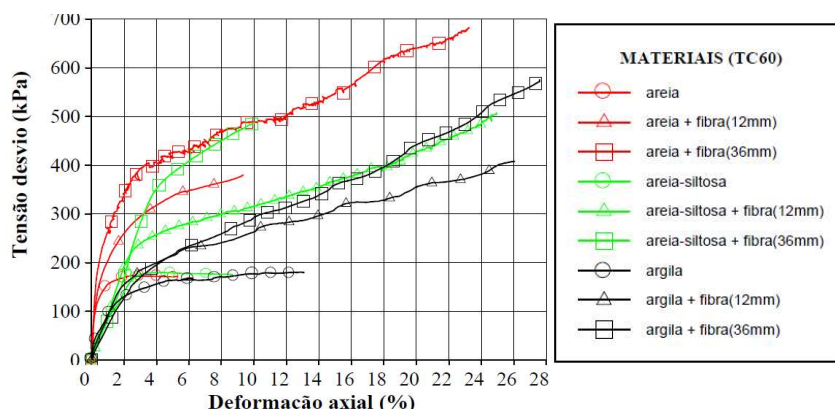


Figura 2.10 – Curvas tensão-extensão axiais de misturas fibra-solo com diferentes solos e comprimento de fibras (Fuehermel, 2000)

A adição de fibras ao solo permite uma maior absorção de energia, ligada ao intertravamento do solo-fibra, reduzindo as deformações e reduzindo o aparecimento de fissuras no material

compósito. Estudos recentes identificaram que as fibras reduzem de forma satisfatória o aparecimento das fissuras em até 50% (Araya-Letelier et al., 2019).

A utilização de fibras sintéticas de Polipropileno é capaz de auxiliar no controle da fissuração, aumentar a resistência ao impacto, reduzir a perda de resistência pós-pico, além de aprimorar a estabilidade da mistura. Como tal, é expectável que a utilização de fibras em conjunto com a estabilização química possa melhorar as características do material compósito, mesmo que não tenha sido muito bem desenvolvida sua técnica de aplicação em obras reais.

2.4 SOLOS ESTABILIZADOS QUÍMICAMENTE E REFORÇADOS COM FIBRAS

O desejo de maior compreensão sobre a interação entre o solo estabilizado quimicamente com ligantes cimentícios e com fibras sintéticas e naturais tem atraído cada vez maior interesse. É necessário compreender o princípio da interação entre as fibras, que são elementos de reforço, com o solo e o ligante cimentício, com o intuito de maximizar as vantagens oriundas do material compósito. Uma vez que a estabilização química é capaz de gerar um elemento frágil, de elevada resistência à compressão, com perda abrupta de resistência após atingir o pico, a junção das fibras tem por intuito elevar a resistência ao corte, contribuindo para um comportamento dúctil do material compósito, caracterizado por uma menor perda de resistência pós rotura (Hejazi et al., 2012; Sbahieh e Teymur, 2019).

As fibras podem afetar a zona pós fissuração a tal ponto que a resistência do material compósito é aumentada. Isso ocorre devido à capacidade das fibras em transferir tensões através dessas fissurações, isto é, as fibras têm capacidade em aumentar a absorção de energia do material (Bentur e Mindess, 2007).

Algumas características das fibras exercem grande influência no comportamento do material compósito. Para Taylor (1994), são elas; (a) teor de fibra e módulo de elasticidade: quanto maior seja o seu teor e módulo, maior será a contribuição na resistência pós fissuração; (b) aderência: uma fibra que possua uma alta aderência com solo-cimento é capaz de reduzir a dimensão das fissuras, distribuindo melhor as tensões pelo material; (c) resistência: uma fibra resistente aumenta a ductilidade do material compósito, diminuindo as possibilidades de ocorrer rotura das ligações por aderência; (d) comprimento: fibras com comprimentos maiores diminuem a possibilidade da fibra sofrer arranque, estando o comprimento mínimo relacionado com a mobilização das tensões de corte e com a resistência à tração das fibras.

É possível perceber que o uso de fibras conduz à melhoria de deficiências mecânicas referentes à estabilização química. Na secção seguinte faz-se referência a estudos realizados ao longo dos anos sobre as características e resultados obtidos, dando enfoque às questões referentes ao tipo de fibra, dosagem e tempo de cura em solos granulares estabilizados.

2.4.1 Estudos experimentais em situações de carregamento estático

Para além do uso em solos granulares, diversos autores demonstraram certas generalidades encontradas na junção dessas técnicas em qualquer tipo de solo. Essas características específicas podem variar com o uso de diferentes tipos de ligantes ou de fibras. Ao considerar o uso de fibras de pequenos comprimentos em solos arenosos e argilosos, Falorca (2002) verificou que a inserção da mesma, após ensaios de corte direto e edométricos, contribuiu positivamente para resistência à compressão do solo. A autora verificou que as fibras foram responsáveis pela recuperação significativa das deformações impostas ao solo reforçado após o descarregamento da carga aplicada. Através de ensaios edométricos sobre solos granulares, com adição de cimento e cal, Ramos (2014), constatou que essa adição reduz a capacidade do solo de sofrer assentamentos, diminuindo seu índice de compressibilidade (C_c).

Através de ensaios de compressão, ensaios de tração, ensaios de retração, e ensaios de resistência ao corte notou-se que é possível melhorar alguns parâmetros do material compósito solo-cimento-fibras, tais como: (a) controlar o aumento da dimensão de fissuras; (b) reduzir a perda de resistência após rotura de pico; (c) mudar o comportamento do solo estabilizado para elemento dúctil; (d) alterar a densidade seca máxima do solo; (e) filamentos individuais de fibras causam uma ligação mais forte dos elementos; (f) melhorar a capacidade de absorção de energia (tenacidade); (g) elevar a absorção de água do material compósito (Maher e Ho, 1994; Feuehermel, 2000; Savastano Jr. Et al., 2005; Cai, 2006; Olgun, 2013; Martins, 2014; Correia et al. 2015; Pinto, 2008; Kafodya e Okonta, 2018; Wang et al., 2019; Danso e Manu, 2020).

No estudo realizado por Martins (2014), o autor utilizou fibras de Sisal e um solo caracterizado como areia mal graduada, em conjunto com um teor de cimento de 14,35% em relação à massa seca do solo. Os ensaios de compressão simples e tração direta ratificaram a melhoria de características já descritas em outros estudos. A Figura 2.11 indica os resultados encontrados nos ensaios à compressão simples. Martins (2014) analisou que tempo de cura é capaz de gerar

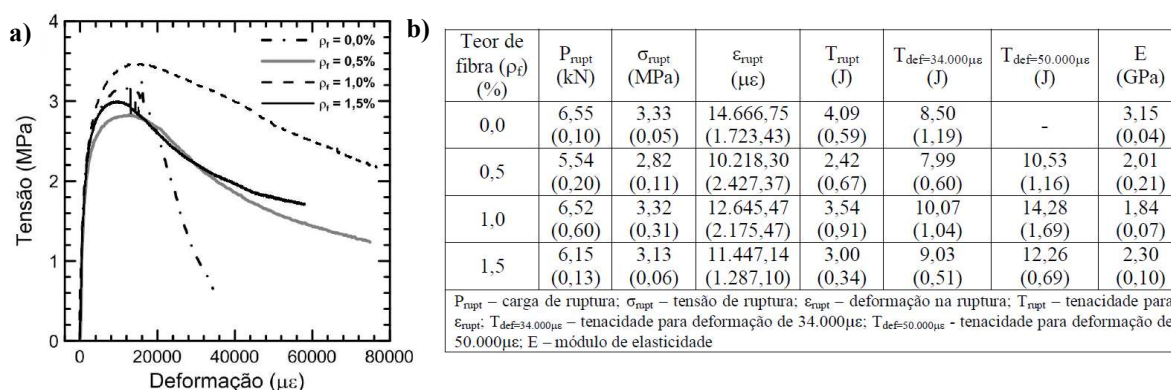


Figura 2.11 – (a) curvas típicas tensão-extensão para os compósitos solo cimento reforçados com fibras de sisal com comprimento de 20 mm (b) parâmetros obtidos nos ensaios de compressão simples. Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão (adaptado de Martins, 2014)

um ganho da resistência do material de até 126% com 28 dias de cura. Esta melhoria deve-se ao ganho obtido através das reações do cimento. O autor ainda demonstrou que a relevância das fibras dá-se no comportamento pós-pico, podendo ser notável nas curvas tensão-extensão uma perda de resistência gradual com a deformação. A presença das fibras alterou o comportamento pós-pico e contribuiu para o ganho de tenacidade.

Nos ensaios de tração direta Martins (2014) observou haver um acréscimo de até 60% na resistência à tração com a inserção de fibras com 20 mm de comprimento, conforme se observa na Figura 2.12. Através da análise dos gráficos tensão-extensão, é possível perceber que o material compósito sofre uma primeira fissuração, gerando uma queda brusca na resistência. Essa rotura é claramente governada pelo ligante cimentício, com uma rotura frágil, devido à elevada rigidez do material. Com o desenvolvimento do ensaio, o material sofre uma segunda fissuração, havendo transferência de tensões da matriz para as fibras.

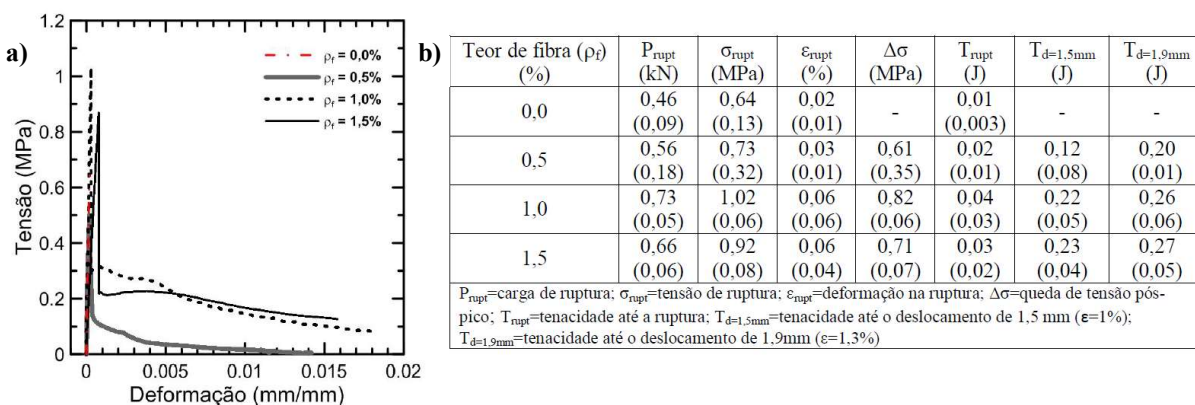


Figura 2.12 – (a) curvas típicas tensão de tração- extensão para os compósitos solo-cimento reforçados com fibras de sisal com comprimento de 20 mm (b) parâmetros obtidos nos ensaios de tração direta. Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão (adaptado de Martins, 2014)

Quando se aumentou o comprimento das fibras para 50 mm, Martins (2014) obteve resistências à tração similares aos valores encontrados sem o reforço do Sisal. Porém, após a segunda fissuração, ocorre um aumento da capacidade de carga do material, obtendo uma queda de resistência mais. Essa queda gradual é devido ao arranque progressivo das fibras, relacionado ao seu maior comprimento, obtendo assim um ganho de tenacidade no compósito, influenciando claramente o comportamento, conforme a Figura 2.13.

Ainda em seu estudo, Martins (2014) constatou que as características específicas das fibras de Sisal foram responsáveis por elevar a capacidade de absorção de água em 13,5%, e índice de vazios em 8,5%, com relação ao compósito solo-cimento sem reforço de fibras. O motivo do aumento de ambos parâmetros é explicado pelos caminhos criados pelas fibras, que servem como facilitador ao movimento da água.

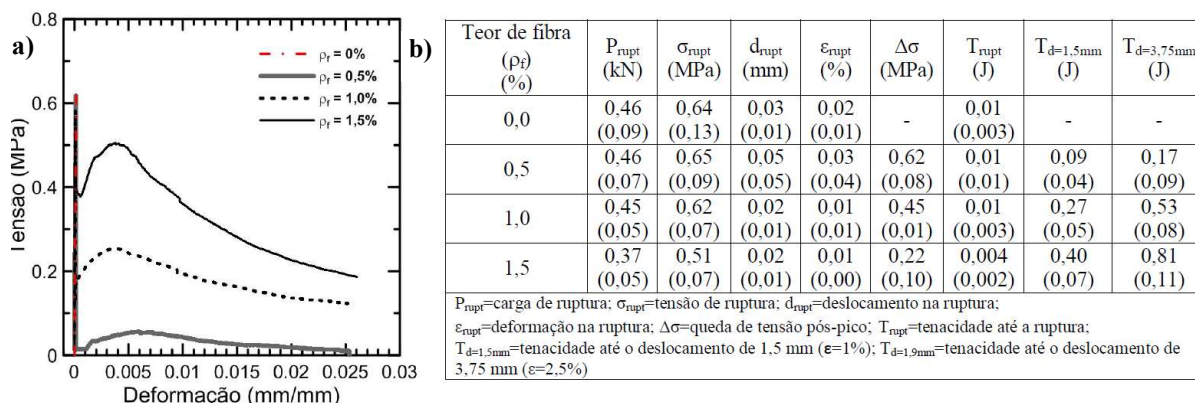


Figura 2.13 – (a) curvas típicas tensão de tração-extensão para os compósitos solo-cimento reforçados com fibras de sisal com comprimento de 50 mm (b) parâmetros obtidos nos ensaios de tração direta. Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão (adaptado de Martins, 2014)

Segundo Martins (2014), outra característica que influenciou positivamente o compósito foram os elevados valores de rigidez das fibras. Este parâmetro é capaz de controlar a deformação do material, devido ao facto dessa rigidez ser maior que a da matriz solo-cimento. Por fim, o estudo foi capaz de eliminar a ideia de degradação do material fibroso ao longo do tempo, tendo concluído que após 8 meses o material é capaz de apresentar boas condições de resistência e absorção de energia.

No caso das fibras sintéticas, em específico as de polipropileno, nota-se um ganho das mesmas propriedades que as estabelecidas para as fibras naturais. Porém, o aumento do teor de fibras nestes casos é capaz de reduzir a rigidez do conjunto. Segundo Tang et al. (2006) este facto é o responsável por um enfraquecimento maior do comportamento frágil do solo cimentado.

A resistência à compressão não confinada aumenta em areias cimentadas com adição de fibras de polipropileno, conforme evidenciado no estudo recente de Sbahieh e Teymur (2019), identificado na Figura 2.14. A presença das fibras altera o comportamento do material para dúctil. Foi possível identificar que quando submetidas a um tempo de cura de 28 dias, a resistência tem um pico mais elevado do que aos 7 dias.

Ao se utilizar o cimento Portland tipo IV, os autores relatam que a fibra teve maior efeito quando misturadas com 3% de cimento, em comparação com amostras ensaiadas com 7% de cimento. A diferença no ganho de resistência com o acréscimo da fibra é mais evidente para uma menor percentagem de cimento.

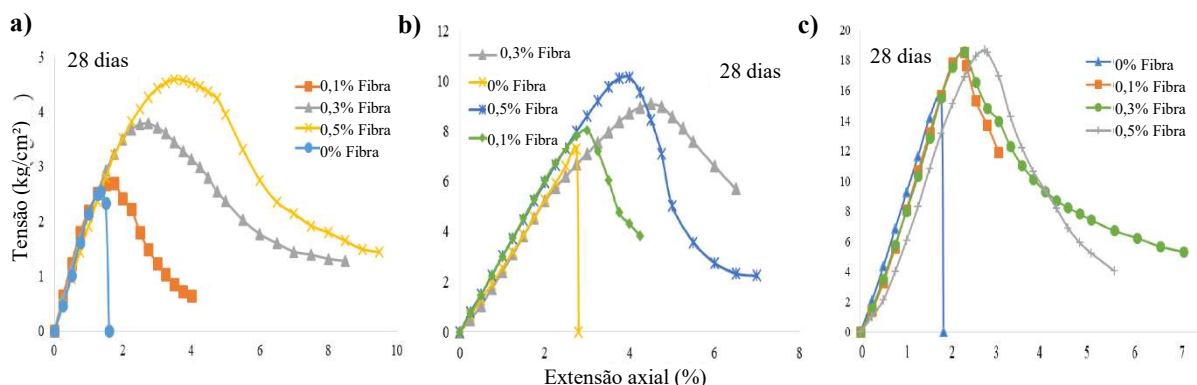


Figura 2.14 Comportamento aos 28 dias do compósito solo-cimento-polipropileno com variação do teor de fibras a) 3% de cimento b) 5% de cimento c) 7% de cimento (Sbahieh e Teymur, 2019)

É possível correlacionar os resultados com estudos anteriores de Consoli et al. (2009) e Hamidi e Hooresfand (2013). O comportamento do solo estabilizado com cimento reforçado com fibras é, no início, controlado pelo teor de cimento, o qual influencia a rigidez do material compósito. Assim, a rigidez é governada pelo cimento para baixas deformações. Nestes casos, o uso da fibra não demonstra qualquer acréscimo de resistência. A Figura 2.15 identifica o possível comportamento dessa mistura.

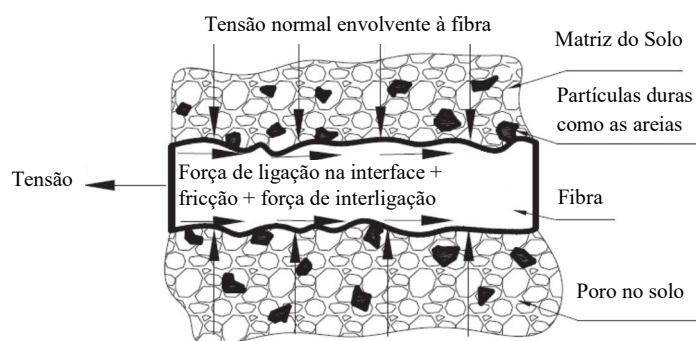


Figura 2.15 Esboço do comportamento mecânico na interface entre a superfície da fibra e a matriz do solo (adaptado de Tang et al., 2007)

Consoli et al. (2009) e Hamidi e Hooresfand (2013) utilizaram uma areia com a estabilizada com cimento Portland tipo III. O primeiro estudo descreve que para a areia quartzítica (areia de Osório), oriunda do sul do Brasil, o incremento de fibras só é vantajoso até o teor de 4% de cimento, confirmando que um valor elevado do mesmo se torna ineficiente para ação das fibras. Enquanto o segundo estudo demonstra que para uma areia de quartzo do Mar Cáspio (Babolsar, Irão), o teor de 3% de cimento foi capaz de elevar até 50% a energia de absorção aplicada nos ensaios quando incrementado 1% de fibras. Os autores ainda descrevem que o aumento de coesão e do ângulo de atrito interno são características provenientes da adição de fibras, já evidenciado neste trabalho (Secção 2.3).

Utilizando o mesmo tipo de cimento Portland, porém em um solo silte arenoso, foi possível notar que à medida que se obtém um material com maior densidade, a utilidade das fibras em

relação a resistência à tração decresce. Um alto teor de fibras provoca uma redução na interação entre as fibras e o solo-cimento devido à sobreposição das fibras. Esse emaranhamento é capaz de interromper a formação das ligações cimentícias (Paula et al., 2019).

Quando se analisa a resposta de areias cimentadas, desta vez com a utilização de fibras de PVA, é possível perceber o mesmo efeito causado pelas fibras de Polipropileno no acréscimo da resistência. Em seu estudo Park (2011) demonstrou que baixos teores de cimento favorecem o efeito benéfico das fibras. A presença das fibras pode elevar a resistência à compressão não confinada até 3,5 vezes, enquanto a extensão axial aumenta com o teor de fibras, conforme Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Sumário dos ensaios de compressão não confinada (adaptado de Park, 2011)

Espécime	Teor de cimento (%)	Teor de fibra (%)	UCS (kPa)	Extensão axial de pico (%)
A-0	2	0	155	1.07
A-1		0.3	188	1.83
A-2		0.6	390	3.21
A-3		1	548	4.29
B-0	4	0	296	1.11
B-1		0.3	414	2.35
B-2		0.6	646	3.17
B-3		1	860	4.78
C-0	6	0	444	1.10
C-1		0.3	574	2.13
C-2		0.6	794	3.18
C-3		1	1254	4.93

Com a descrição desses experimentos, é possível concluir que a o solo com adição de cimento e reforçado de fibras, sejam sintéticas ou naturais, é capaz de satisfazer as melhorias necessárias nos parâmetros mecânicos para a utilização em diversos tipos de construções geotécnicas. O uso de um estabilizador químico cimentício é um factor determinante na adição de fibras.

A resistência à compressão aumenta com o aumento do teor de cimento no solo, porém, o efeito das fibras é cada vez menor. As fibras só trabalham quando se atinge um certo grau de extensão do material. Em materiais compósitos mais duros, as fibras não têm grande efeito, pois o nível de tensão não é capaz de mobilizar a resistência à tração das mesmas.

O aumento de teor de cimento eleva o comportamento frágil do compósito, sendo perceptível a queda abrupta de resistência pós-pico de tensão. O incremento das fibras altera o comportamento do material, evidenciando o acréscimo nas características já descritas nesta seção. A melhor opção para se trabalhar a junção destes três elementos, solo-cimento-fibra, é a utilização de um valor relativamente baixo de cimento, possibilitando às fibras de surtirem algum efeito na resistência e extensão do material compósito.

2.4.2 Estudos experimentais em situações de carregamento dinâmico

O comportamento dos solos durante eventos sob ações cíclicas é de grande interesse para a comunidade científica, uma vez que o conhecimento da resposta que o carregamento dinâmico impõe ao solo é contraditório, e muitas vezes, desconhecido. Devido a este comportamento dúbio, os ensaios cíclicos surgem como forma de auxiliar os estudos de ensaios monotônicos. A noção a respeito do comportamento de solos melhorados com ligantes cimentícios, e reforçados com fibras (sintéticas e naturais), tem sua importância associada a construções de vias férreas, estradas, estruturas industriais, ou quando em locais que sejam grandes as possibilidades de ocorrência de terremotos, ações de vento e ondas do mar.

Alguns autores analisaram as características decorrentes da ação cíclica, e concluíram que esta conduz a um aumento das características mecânicas do material compósito, tanto na resistência à tração, corte e compressão, quanto na rigidez. Esse ganho é decorrente da extensão no material, capaz de ocasionar a mobilização à tração das fibras, compensando a perda de resistência das matrizes que acabam por se deteriorar conforme a carga cíclica é aplicada. A contribuição das fibras faz com que seja necessário um maior número de ciclos e de magnitude para atingir o estado de rotura (Maher e Ho, 1994; Cajada, 2017; Venda Oliveira et al., 2018).

Venda Oliveira et al. (2018) indica, na Figura 2.16, valores obtidos para resistência à compressão em ensaios monotônicos e cíclicos, com e sem adição de fibras de Polipropileno, destacando o ganho de resistência após a fase cíclica independente do tipo de solo.

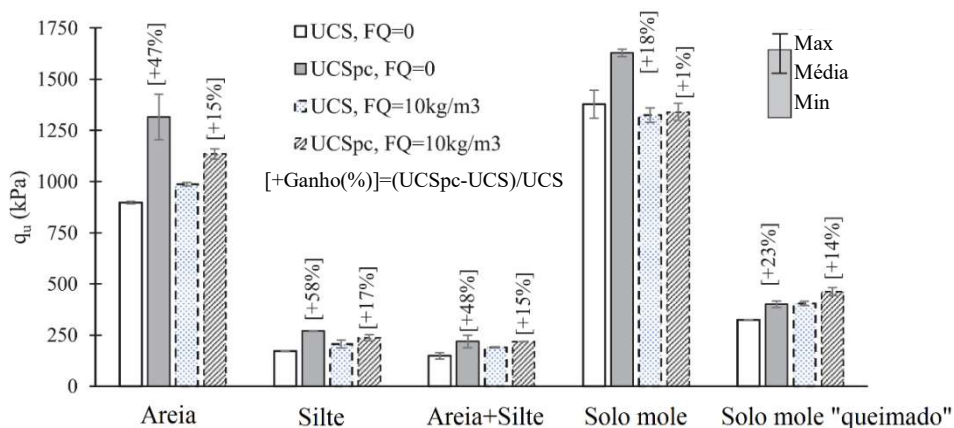


Figura 2.16 Resultados dos ensaios UCS monotônicos (UCS) e UCS pós ciclo (UCSpC). Efeito do tipo de solo e reforço com fibras de Polipropileno no pico de resistência à compressão para 3000 ciclos e 0,25 Hz (adaptado de Venda Oliveira et al., 2018)

Após o estágio cíclico, as maiores vantagens proporcionadas pelas ações dinâmicas ocorre nos solos sem reforço, e são mais expressivas na rigidez do elemento (Figura 2.17) do que na sua resistência à compressão não confinada (Figura 2.16).

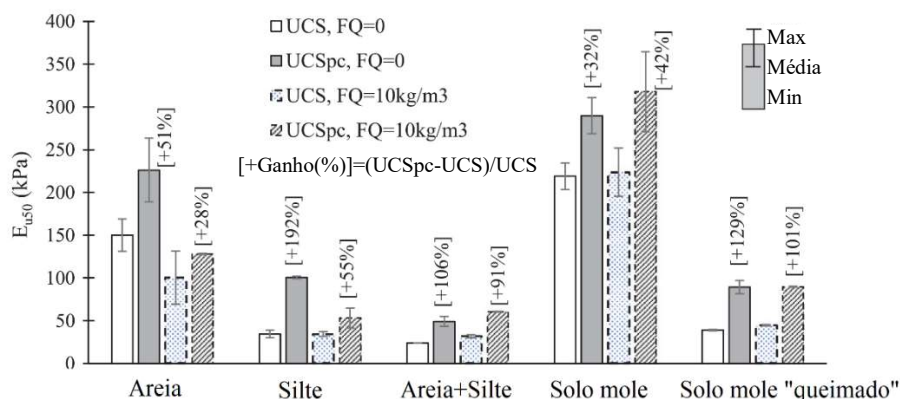


Figura 2.17 Efeito do reforço do tipo de solo e das fibras de polipropileno no módulo de Young (E_{u50}) avaliado através de ensaios UCS monotônicos (UCS) e UCS pós ciclo (UCSpc) para 3000 ciclos e 0,25 Hz (adaptado de Venda Oliveira et al., 2018)

A Figura 2.18 exemplifica a ação das fibras, mostrando um acréscimo claro da extensão axial permanente nos primeiros ciclos do ensaio, e uma subsequente diminuição dessa taxa de extensão com o aumento de ciclos. Essa característica deve-se à desestruturação contínua do material compósito submetido às ações dinâmicas. Em solos reforçados com fibras, a extensão axial permanente é menor do que em solos sem fibras, demonstrando o benefício do uso de fibras (Chauhan et al., 2008; Viana da Fonseca et al., 2013; Cajada, 2017; Venda Oliveira et al., 2017, 2018).

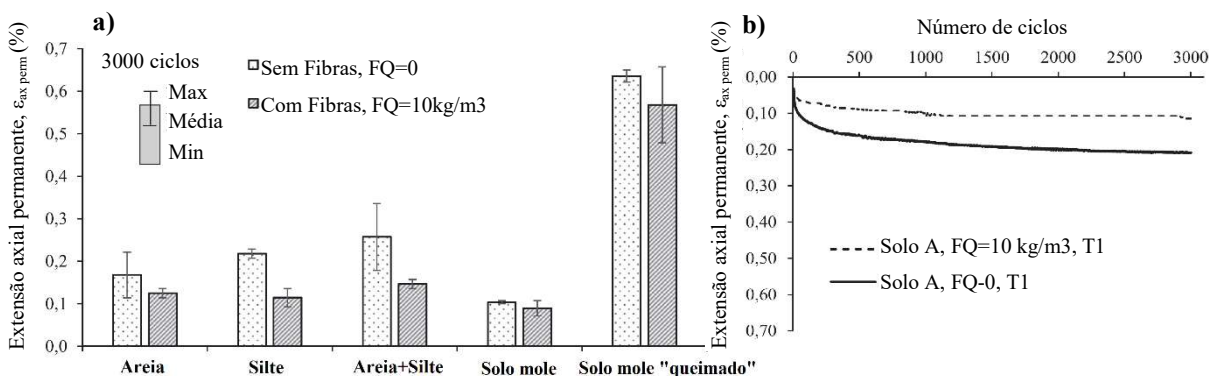


Figura 2.18 (a) efeito do tipo de solo sobre a extensão axial permanente acumulada para 3000 ciclos e 0,25 Hz (b) Efeito da extensão axial permanente na areia em estudo (adaptado de Venda Oliveira et al., 2018)

Poucos estudos foram desenvolvidos a respeito do comportamento dinâmico em solos estabilizados com ligantes cimentícios e reforçado com fibras. As ações cíclicas influenciam na resistência e deformação do material compósito, uma vez que a quebra das ligações cimentícias do elemento favorece a mobilização do atrito nas superfícies de rotura, e a consequente mobilização da resistência à tração das fibras.

3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Neste capítulo caracteriza-se o solo granular utilizado no estudo recolhido na região de Leiria (Portugal), bem como os materiais empregues para estabilização química, cimento Portland CEM I 42,5, e as fibras utilizadas para reforço. Serão utilizados dois tipos diferentes de fibras, com intuito de analisar a diferença do comportamento entre as mesmas no solo cimentado: Polipropileno (fibra sintética) e Sisal (fibra natural).

3.1 CARACTERÍSTICAS DO SOLO

Nesta secção serão interpretados os dados oriundos dos ensaios de composição granulométrica, densidade das partículas sólidas, limites de consistência, compactação, teor de matéria orgânica e o pH do solo.

3.1.1 Composição granulométrica

A análise granulométrica do solo fez-se através do uso do granulómetro laser. Apesar de não ser uma técnica muito difundida no meio geotécnico, os resultados obtidos em comparação com os métodos convencionais demonstrou resultados satisfatórios, tornando aceitável a utilização na determinação da granulometria de um solo, tendo como vantagens a sua rapidez e eficácia (Oliveira et al., 2016).

O método não possui normalização de processos, assim, a análise ocorreu segundo a orientação dos manuais de operação do equipamento e tomou por referência o procedimento descrito na norma ISO 13320-1 (1999). O equipamento utilizado foi o granulómetro laser Coulter LS-230, do Laboratório de Sedimentologia do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra, que permite análises granulométricas de partículas com dimensões compreendidas entre 0,4 e 2000 μ m.

Os resultados dos ensaios indicaram que o solo é constituído por: 97,82% de areia; 1,77% de silte; 0,41% de argila. Assim, ao se classificar o solo segundo a norma ASTM 2487 (1998), constata-se que o solo é uma areia limpa e mal graduada, pertencendo ao grupo SP. As Figuras 3.1 e 3.2 resumem os resultados obtidos após o processo.

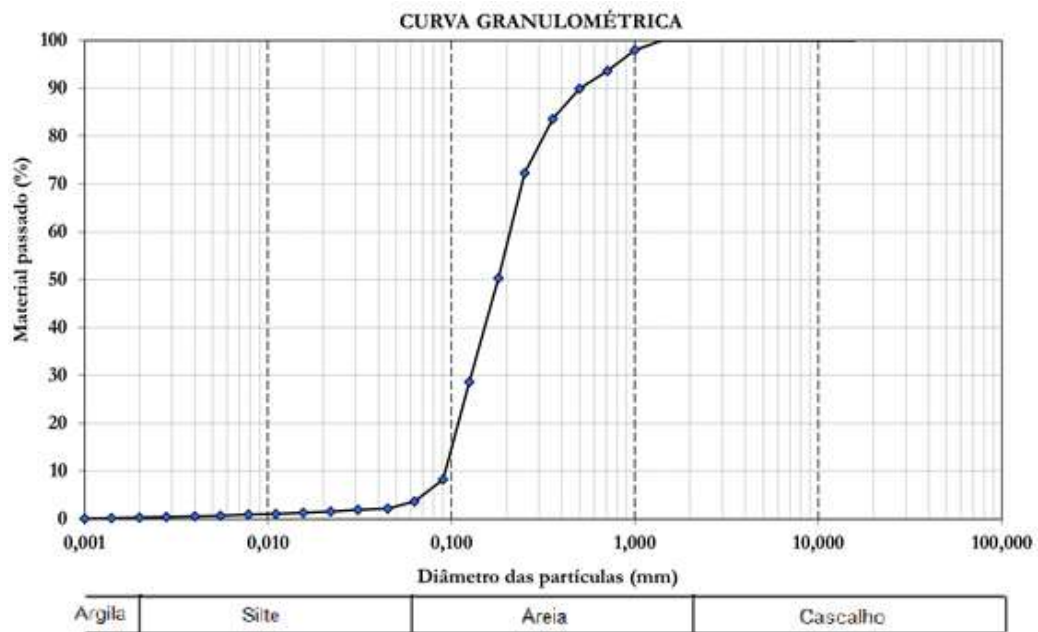


Figura 3.1 Curva granulométrica do solo granular através da análise do granulômetro laser

A análise da curva de frequências, Figura 3.2, possibilitou ter uma visão mais objetiva a respeito da constituição do solo granular, notando um elevado valor das porções de areia média e fina.

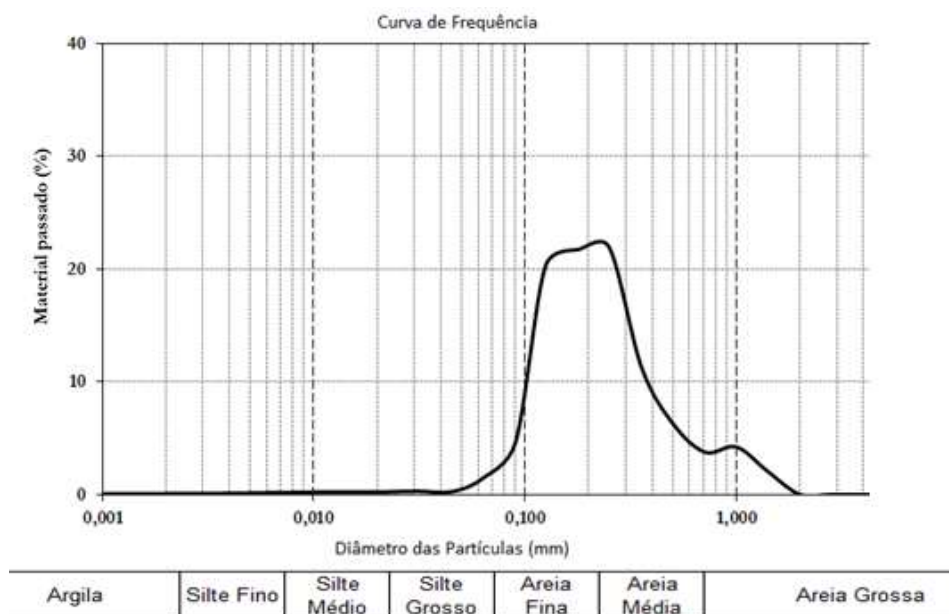


Figura 3.2 Curva de frequência do solo granular através da análise do granulômetro laser

3.1.2 Densidade das partículas sólidas

Conforme preconizado na norma NP-83 (1965), a determinação da densidade das partículas sólidas (G_s) levou em consideração dados obtidos em três picnômetros diferentes com partículas

do solo em estudo. O valor de densidade é obtido pelo quociente entre o peso volúmico das partículas sólidas (γ_s) e o peso volúmico da água destilada (γ_w). A partir deste ensaio definiu-se o valor médio de 2,66, valor típico para uma areia.

3.1.3 Limites de consistência (Limites de Atterberg)

Os limites de liquidez, de plasticidade e de retração não são aplicáveis ao solo em estudo, conforme estabelecido na norma NP-143 (1969). As dimensões das partículas do solo inferiores a 0,05mm encontram-se muito abaixo dos 30% estabelecidos na norma, ocasionando a não obtenção dos limites. Aliado a isto, devido ao solo ser predominantemente arenoso, a determinação destes limites perde seu significado.

3.1.4 Teor de matéria orgânica

Conforme especificação E201 (1967), a obtenção do valor de matéria orgânica contida no solo pode ser avaliado através da técnica de perdas por ignição. Esta técnica utiliza como temperatura de referência o valor de 50°C e 400°C a temperatura de ignição. Fazendo-se valer do auxílio da norma BS 1377-3 (1990), utilizou-se a equação 3.1.

$$OM = (P_s^{50^{\circ}C} - P_s^{400^{\circ}C}) / (P_s^{50^{\circ}C} - P_{cápsula}) \quad (3.1)$$

As quatro amostrais utilizadas no ensaio possibilitaram a obtenção de um valor médio do teor de matéria orgânica do solo granular em estudo, sendo esse valor de 0,24%, ou seja, solo não orgânico.

3.1.5 Medição do pH

O valores de pH do solo granular em estudo foram obtidos novamente com auxílio da norma BS 1377-3 (1990), executados em laboratório, em temperatura controlada de 20±2°C e humidade relativa de 60±15%, fazendo uso de um aparelho com precisão de 0,01. No fim do ensaio, obteve-se um valor de 7,21 para o pH do solo, caracterizando-o como um solo praticamente neutro.

3.1.6 Ensaio de compactação

Tal como preconizado na especificação do E197 (1966), utilizou-se o molde pequeno e a compactação leve, de forma a se obter os valores do teor ótimo de água (w_{opt}) e consequente peso volúmico seco máximo ($\gamma_{dmáx}$). O pilão de compactação possui 2,49 kg de massa, 50mm de diâmetro, tendo sido utilizada uma altura de queda de 305 mm. Tendo sido o molde cilíndrico pequeno, feito em aço, 102 mm de diâmetro interior e 117 mm de altura.

Para o ensaio, o solo em estudo foi disperso sobre mangas plásticas no laboratório ao longo de alguns dias, com o intuito de eliminar a presença da água no mesmo, para assim poder-se efetuar o ensaio Proctor. Após o processo, o valor encontrado para teor inicial de água no solo foi de 0,1%. Por se tratar de uma areia mal graduada, optou-se por se utilizar os maiores valores encontrados numa curva com 3 pontos crescentes, seguido de 3 pontos descendentes. Os valores obtidos foram: teor de água ótimo (w_{opt}) de 14,2%; peso volúmico seco máximo ($\gamma_{dmáx}$) de 16,29 kN/m³, indicados na Figura 3.3.

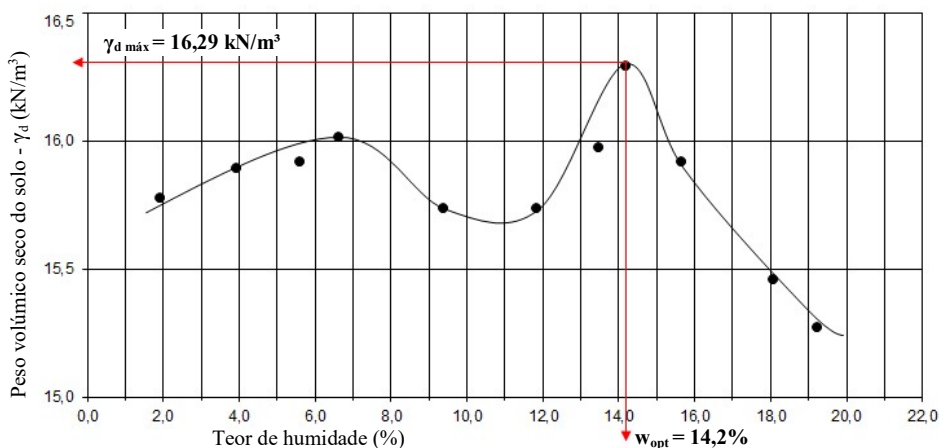


Figura 3.3 Representação gráfica dos resultados do ensaio de Proctor leve para determinação do teor ótimo de humidade e peso volúmico seco máximo para o solo em estudo

3.1.7 Resumo da caracterização do solo

Após os ensaios de caracterização é possível resumir os principais resultados no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Dados obtidos nos ensaios de caracterização do solo

Composição Granulométrica	Areia (%)	97,82
	Silte (%)	1,77
	Argila (%)	0,41
Densidade das Partículas sólidas - G		2,66
Teor em Matéria Orgânica - OM (%)		0,24
pH do solo		7,21
Peso volúmico máximo - γ_d máx (kN/m ³)		16,29
Teor em água ótimo - w_{opt} (%)		14,2
Classificação ASTM		SP

3.2 LIGANTE – CIMENTO PORTLAND CEM I 42,5 R

O ligante cimentício utilizado neste estudo tratou-se do cimento Portland CEM I 42,5 R fornecido pela empresa CIMPOR. A escolha é devido ao seu uso em outros estudos realizados no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra (Teles, 2013; Porém, 2016; Cajada, 2017). O processo de obtenção do cimento Portland passa pela moagem, mistura e fragmentação de elementos como os calcários, argilas ou margas seguido de cozedura a

elevadas temperaturas. Essa moagem resulta no elemento denominado clínquer, sendo ele pulverizado, e assim obtendo o cimento como conhecido. A composição do cimento utilizado no estudo está descrita no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Composição química do cimento Portland utilizado (conforme dados da CIMPOR)

Componentes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₂	CaO _f	K ₂ O	Na ₂ O	Blaine (cm ² /g)
Conteúdo (%)	19,00	5,15	3,19	62,88	2,16	3,14	1,17	1,29	0,10	3263

3.3 FIBRAS

3.3.1 Fibras de Polipropileno

A utilização das fibras de Polipropileno em trabalhos anteriores, no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra (Teles, 2013; Cajada, 2017), fez com que se optasse por fazer uso das mesmas no presente estudo, com o intuito de agregar maior conhecimento referente à resposta destas fibras quando utilizadas para estabilização e reforço de solo. A fibra de polipropileno utilizada corresponde ao modelo DUOMIX M12, composta por multifilamentos extremamente finos, disponibilizada pelo fabricante BEKAERT. Consta no Quadro 3.3 suas propriedades.

3.3.2 Fibras de Sisal

O uso das fibras naturais teve como intenção a comparação com as fibras sintéticas, destacando a importância de ambas para a melhoria do solo tratado. As fibras naturais utilizadas foram as de sisal, fornecidas pela fabricante COTESI, em sacos, com comprimentos de 0,85 metros, sem transformação. As fibras utilizadas passaram por um processo de corte manual, de forma a enquadrá-las conforme o comprimento imposto para fibras sintéticas. Após o corte, as fibras foram acondicionadas em vasilhames plásticos para posterior uso. Consta no Quadro 3.3 suas propriedades. Os valores de resistência à tração foram obtidos através de ensaios realizados no Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra, conforme Anexo A. Ainda foi possível comprovar o nível de absorção de água da fibra, conforme Anexo B.

Quadro 3.3 – Propriedades geométricas e mecânicas das fibras (conforme dados dos fornecedores)

Fibra de Polipropileno (Modelo DUOMIX M12)		Fibra de Sisal (Modelo Tipo 3)	
Comprimento (mm)	12	Comprimento (mm)	12
Diâmetro (µm)	32	Diâmetro (µm)	140
Resistência à tração (N/mm ²)	250	Resistência à tração (N/mm ²)	558

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O programa experimental aqui exposto teve por objetivo analisar o comportamento dos materiais compósitos formados por “Solo + Ligante”, “Solo + Sisal”, “Solo + Polipropileno”, “Solo + Ligante + Sisal” e “Solo + Ligante + Polipropileno”, comparando-os. Foram investigados os efeitos do tipo de fibra, interação fibra-matriz, além do teor de ligante, através de gráficos de tensão-extensão do solo arenoso estabilizado e reforçado com fibras sintéticas e naturais de igual comprimento, distribuídas aleatoriamente. Os ensaios apenas com solo foram realizados logo após moldagem, para evitar a perda de água.

Para a análise do comportamento das misturas foram realizados ensaios de Compressão Diametral/Tração Indireta, sendo este estabelecido em duas situações: (a) caráter monotônico, considerando diferentes tempos de cura, dosagem de ligante e tipo de fibra; (b) caráter cíclico, fazendo variar a dosagem de ligante e tipo de fibra, além de estabelecer um nível de tensão com base nos ensaios de referência, e um valor pré estabelecido de ciclos, frequência de aplicação e amplitude da carga. A escolha destas variáveis teve por objetivo delimitar o trabalho, tendo como base os estudos já realizados e mencionados no capítulo anterior. Foram moldados, e ensaiados, provetes suficientes para realização de pelo menos duas amostras para cada condição de ensaio.

Serão descritos neste capítulo desde a preparação dos provetes (mistura, moldagem, cura e desmoldagem), até à realização dos ensaios propriamente dito (Ensaio de Compressão Diametral/Ensaio de Tração Indireta monotônico e cíclico). O plano de ensaios foi concebido de forma a facilitar, de maneira prática, a verificação do efeito da adição de fibras nos compósitos com matrizes solo-cimento.

Os resultados obtidos nos ensaios de compressão diametral monotônico (STS) serviram de referência para os demais ensaios. Os valores de resistência (f_{ct}) encontrados foram utilizados para estabelecer o nível de tensão (f_{ct}/f_{ct_max}) e amplitude de carga ($\Delta f_{ct}/f_{ct_max}$), utilizados nos ensaios de compressão diametral cíclicos (CIC).

4.2 PREPARAÇÃO DAS MISTURAS

A preparação e montagem dos provetes tiveram como base os procedimentos anteriormente realizados no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da FCTUC (Correia, 2011; Costa, 2012; Cajada 2017), aliado aos conhecimentos adquiridos em pequenas experiências preliminares. De forma genérica, o processo resume-se às seguintes fases: 1) seleção, pesagem e acondicionamento das dosagens de ligante e fibras a utilizar; 2) mistura dos elementos com o solo até obter-se uma mistura/pasta homogênea; 3) compactação dinâmica em moldes cilíndricos; 4) acondicionamento em câmara húmida pelo tempo de cura especificado. Precauções foram tidas para garantir a homogeneidade e reprodutibilidade de todo o processo padronizado.

A primeira etapa do processo consistiu em preparar os moldes cilíndricos utilizados. Para os ensaios de compressão diametral monotónicos (STS) e cíclicos (CIC) utilizaram-se moldes de PVC, com diâmetro de 70 mm e altura de 140 mm, os quais foram revestidos internamente com uma fina camada de vaselina. Na sua base foi aplicada fita adesiva, com furos na mesma, além de um geotêxtil, permitindo a drenagem, evitando a perda de partículas de solo.

A segunda etapa do processo de preparação da mistura consiste na homogeneização manual do solo. Para tal procedimento, o solo foi espalhado em uma manga plástica, para secagem ao ar, seguindo o mesmo procedimento empregue na secção 3.1.6. Em seguida, o solo passou pelo processo de peneiração, utilizando o peneiro nº 10 (abertura de 2 mm) para o controle do diâmetro das partículas, e acondicionado num contentor com dimensões de 95x55x55cm (Comp.xLarg.xAlt.), sendo este o solo utilizado em todas as misturas do estudo (Figura 4.1.a)).

Na terceira etapa de preparação, realizou-se a pesagem dos elementos utilizados na mistura (solo, fibras, ligante e água) conforme a dosagem dos provetes. Para os casos das fibras de polipropileno, as mesmas passaram por um processo de separação com ar comprimido, de forma a separar os filamentos das mesmas. As fibras de sisal já se encontravam acondicionadas em vasilhames plásticos, cortadas e separadas, conforme consta na secção 3.3.2., não tendo mais nenhum processo inerente às mesmas. O cimento Portland utilizado estava acondicionado em barricas isoladas. A quantidade de água adicionada é estabelecida conforme o teor de água ótimo para do solo, estabelecido na secção 3.1.6.

A quarta etapa envolveu a mistura de todos elementos já pesados, respeitando a nomenclatura estabelecida para as misturas (fibras de sisal + cimento, fibras de polipropileno + cimento, cimento, solo). O equipamento utilizado para a mistura do material compósito foi uma misturadora automática (SAMMIC BM11), com uma velocidade de rotação de 136rpm. Inicialmente, dispôs-se o solo no balde da misturadora. Em sequência preparou-se a calda de ligante, dispondo o cimento Portland num recipiente de vidro e adicionando a água

gradualmente. Fazendo uso de uma vareta de vidro, foram realizados cinquenta movimentos circulares no recipiente de forma a homogeneizar a mistura cimento-água. Por fim, adicionou-se a calda de cimento ao solo, e iniciou-se mistura do compósito final, adicionando gradualmente as fibras. Foram utilizadas duas pás misturadoras diferentes, conforme o tipo de fibra utilizada (Figura 4.2). A mistura realizou-se por um tempo total de doze minutos, com paragem aos quatro e aos oito minutos para remoção do material aderente às paredes laterais do balde e pá misturadora. Em cada mistura, quatro cápsulas foram retiradas para averiguação do teor de água, para controlo da mistura realizada. Este processo de preparação das misturas foi utilizado para as amostras de todos ensaios (STS, CIC/STSpC).

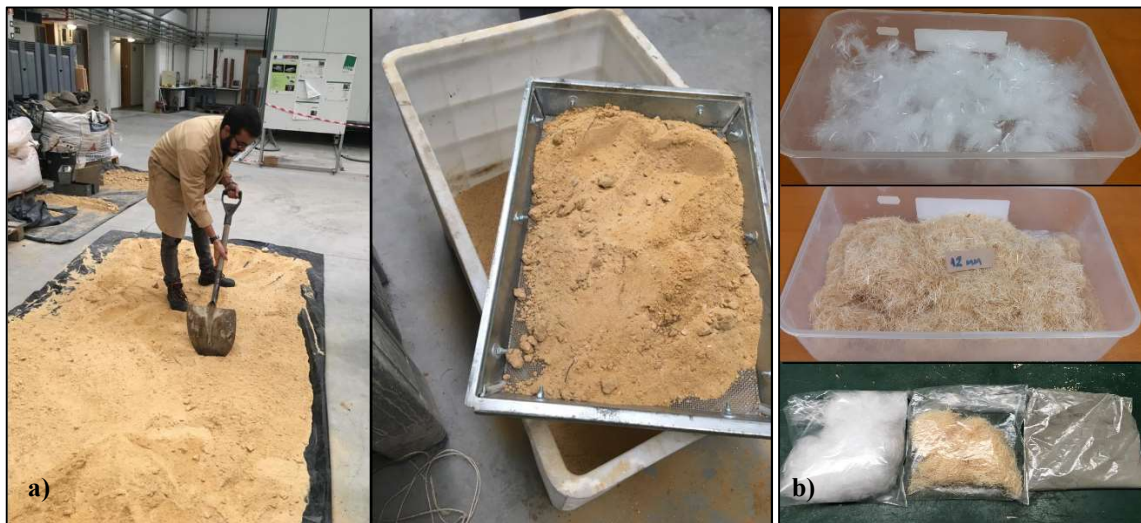


Figura 4.1 Etapas de preparação: a) Espalhamento e peneiramento do solo utilizado; b) Fibras e ligante pesados e acondicionados



Figura 4.2 Etapas de preparação: a) Mistura do ligante cimentício com água; b) Remoção do compósito das paredes laterais da misturadora; c) Pás utilizadas: “rabo de porco”, para polipropileno; comum, para fibras de sisal e restantes misturas

4.3 MOLDAGEM E DESMOLDAGEM DOS PROVETES

O processo de moldagem dos provetes teve início imediatamente após o fim da mistura do compósito. Para que este processo tivesse êxito utilizou-se o procedimento e o equipamento de compactação utilizado no ensaio de Proctor leve. Para o ajuste do número de pancadas, visto ser diferente a dimensão do molde dos provetes, estabeleceu-se um cálculo por forma a manter a mesma energia aplicada na compactação, tendo-se obtido valor de quatorze pancadas, divididas em três camadas, como suficiente para a compactação, conforme Anexo C.

Após a compactação de cada camada do provete, procedeu-se uma leve escarificação da superfície compactada. Esse procedimento teve como intuito impedir a separação entre camadas. Para as amostras dos ensaios de compressão diametral, monotônicos e cíclicos, realizou-se a correção do topo do provete com auxílio de uma espátula. Em seguida, a amostra era pesada, etiquetada com o respetivo código de identificação, e colocada dentro de sacos plásticos, e armazenada em câmara húmida. Nesta câmara húmida constava-se uma temperatura de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e humidade relativa de $95\pm 5\%$.

Assim que os tempos de cura estabelecidos no plano de ensaios eram atingidos, seguia-se para desmoldagem dos provetes. Este procedimento foi executado com o auxílio de um extrator hidráulico manual. Caso necessário, retificava-se o topo e base dos provetes. Esta correção visava reduzir excentricidades capazes de alterar os resultados obtidos. Após este processo, os provetes seguiam diretamente para a fase de ensaio propriamente dita.

De forma a assegurar a reprodutibilidade, todos os ensaios realizados possuíam pelo menos dois provetes, preparados em simultâneo, assim especificado na norma NP EN 206-1 (2007). Conforme esta norma, o ensaio é considerado válido se os resultados individuais de cada amostra estiveram no intervalo de $\pm 15\%$, em relação à média dos resultados. É demonstrado nas Figuras 4.3, e 4.4, alguns processos realizados, bem como os materiais utilizados.



Figura 4.3 Itens utilizados na moldagem.



Figura 4.4 Etapas de moldagem: a) Compactação dos provetes; b) Retificação das amostras.

4.4 ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL MONOTÓNICO (STS)

4.4.1 Plano de ensaios

Os parâmetros objeto de análise por meio dos ensaios de compressão diametral monotónicos (STS) são: i) tempo de cura (3, 7, 14 e 28 dias); ii) dosagem de ligante (0, 125 e 175 kg/m³); iii) tipo de fibra (sisal e polipropileno) e iv) dosagem de fibra (0 e 10 kg/m³).

Os Quadros 4.1 e 4.2 fornecem o plano de ensaios monotónicos (STS). Para facilitar a identificação dos provetes, foram definidos códigos, organizados da seguinte forma: “Ensaio_Material Compósito_Tempo de cura_Dosagem de ligante”. As siglas encontram-se definidas no fim do quadro.

Quadro 4.1 – Plano de ensaios de compressão diametral monotónicos (STS)

Material compósito	Dosagem de ligante (kg/m ³)	Tempo de cura (dias)	Dosagem de fibra (kg/m ³)	Código
Solo	-	-	-	STS_S_0_0
Solo + Sisal	-	-	10	STS_SF_0_0
Solo + Polipropileno	-	-	10	STS_PF_0_0
Solo + Ligante	125	3	-	STS_C_3_125
		7	-	STS_C_7_125
		14	-	STS_C_14_125
		28	-	STS_C_28_125
	175	3	-	STS_C_3_175
		7	-	STS_C_7_175
		14	-	STS_C_14_175
		28	-	STS_C_28_175

S_Solo natural / SF_Fibras de Sisal / PF_Fibras de Polipropileno / C_Cimento

Quadro 4.2 – Plano de ensaios de compressão diametral monotônicos (STS)

Material compósito	Dosagem de ligante (kg/m³)	Tempo de cura (dias)	Dosagem de fibra (kg/m³)	Código
Solo + Sisal + Ligante	125	3	10	STS_SF+C_3_125
		7		STS_SF+C_7_125
		14		STS_SF+C_14_125
		28		STS_SF+C_28_125
	175	3	10	STS_SF+C_3_175
		7		STS_SF+C_7_175
		14		STS_SF+C_14_175
		28		STS_SF+C_28_175
Solo + Polipropileno + Ligante	175	3	10	STS_PF+C_3_175
		7		STS_PF+C_7_175
		14		STS_PF+C_14_175
		28		STS_PF+C_28_175

S_Solo natural / SF_Fibras de Sisal / PF_Fibras de Polipropileno / C_Cimento

4.4.2 Procedimento Laboratorial

Para caracterizar a resistência à tração dos provetes, optou-se pela realização de ensaios de compressão diametral, comumente conhecido como “ensaio brasileiro”, executado de acordo com a norma brasileira NBR 7222 (2011). Este ensaio, desenvolvido inicialmente pelo Professor Lobo Carneiro na cidade do Rio de Janeiro, tinha como objetivo analisar elementos compostos por betão armado, tendo sido adaptado para misturas cimentadas (Carneiro, 1943). Este ensaio consiste na compressão de um provete cilíndrico, gerando contato entre as superfícies de aplicação de carga através de duas linhas geratrizes diametralmente opostas ao longo de seu comprimento. Este processo gera um plano axial de rotura que coincide com o eixo de aplicação da carga. Através de um cálculo simples é possível obter a resistência à tração de forma indireta (Figura 4.5).

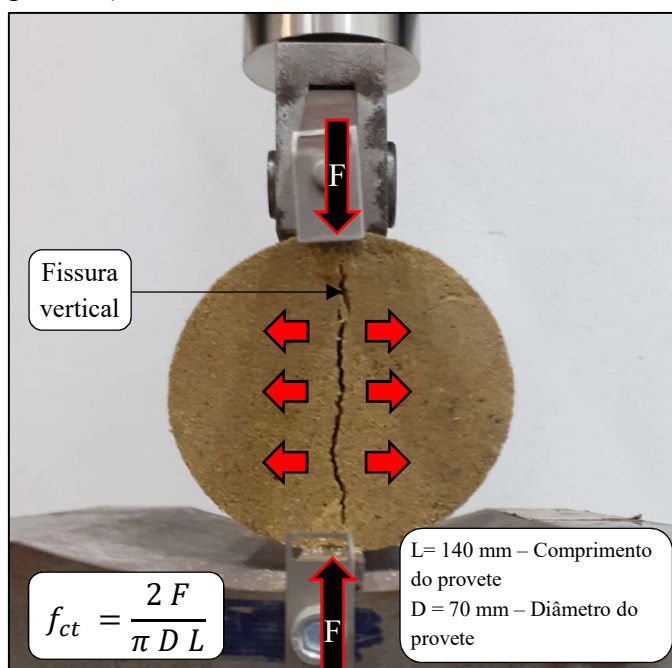


Figura 4.5 Cálculo de resistência à tração do ensaio de compressão diametral

Todos os ensaios de compressão diametral monotônicos foram realizados na prensa existente no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, modelo Tristar 5000kg Stepless Compression Test Machine, do fabricante Wykeham Farrance, o qual possui uma célula de carga de 50 kN capacidade com precisão de 0,1 kN e um transdutor de deslocamento de 50mm (Figura 4.6).

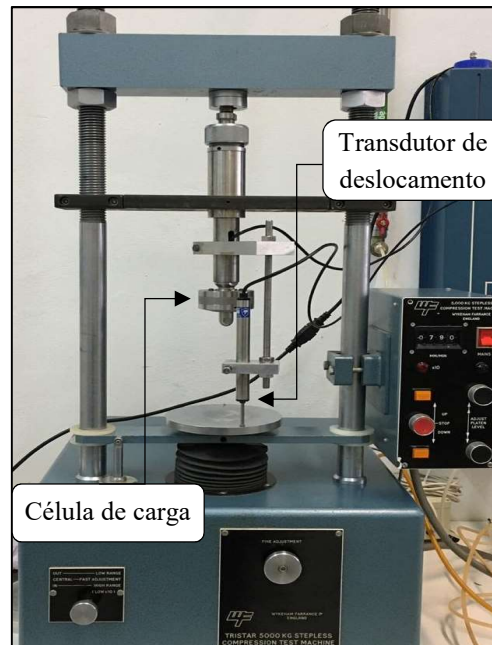


Figura 4.6 Prensa Tristar 5000kg Stepless Compression Test Machine

Foram realizadas leituras a cada 3 segundo durante o ensaio, registrando-se os valores de força aplicada (F) e extensão vertical (mm). Estes dados possibilitaram avaliar a resistência à tração indireta (f_{ct}) e a extensão axial (ϵ_a). Assim como demonstrado na Figura 4.5, a fórmula utilizada para determinação da resistência à tração relaciona a força aplicada com a área do provete:

$$f_{ct} = \frac{2F}{\pi A_{corr}} \rightarrow f_{ct} = \frac{2F}{\pi D \left(1 - \frac{\epsilon_a}{100}\right) L} \text{ (MPa)} \quad (4.1)$$

A área do provete deve passar por um cálculo de correção, devido às deformações radiais sofridas pelo elemento, ocasionando uma nova área longitudinal do provete. O procedimento do ensaio de compressão diametral monotônico consiste em 7 etapas, seguidas imediatamente após a desmoldagem dos provetes (secção 4.3), as quais são descritas abaixo:

- 1) O provete, devidamente retificado, é colocado na prensa do ensaio de compressão diametral, apoiando-se ao longe de uma geratriz em uma posição centrada em relação à célula de carga;
- 2) Ajusta-se o equipamento e coloca-se a zero os valores do transdutor de deslocamento, assim como o valor medido pela célula de carga;

- 3) A velocidade de deformação é ajustada para o valor de 1%/min, em relação ao diâmetro do provete. Este valor tem por base estudos prévios realizados no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da FCTUC (Correia, 2011), sendo este um valor intermédio em relação ao recomendado (0,5% a 2%/min) nas normas ASTM D2166 (2000) e BS 1377-7 (1990);
- 4) Verifica-se a ligação entre a prensa e o computador que regista os valores do transdutor de deslocamento e da célula de carga, bem como o *software* utilizado para leitura. Inicia-se o ensaio de compressão diametral, podendo ser acompanhado o gráfico referente à força e deslocamento aplicados na amostra, sem qualquer correção dos valores;
- 5) O fim do ensaio é determinado quando, após atingir a carga máxima de rotura do provete, a força aplicada se encontrar na curva descendente;
- 6) No fim do ensaio, fotografa-se a fissura do provete, e gravam-se os dados obtidos;
- 7) Retira-se o provete da prensa, e recolhem-se fragmentos do mesmo, os quais devem ser pesados em duas cápsulas e levados à estufa para avaliar o teor em água final.

O maior valor encontrado no gráfico força-deslocamento é considerado para cálculo da resistência à tração máxima (f_{ct_max}), parâmetro que servirá de referência para os ensaios cíclicos. Os valores encontrados neste ensaio permite representar a curva tensão-extensão ($f_{ct}-\epsilon_a$), o qual, em geral, necessita de correção do erro inicial (*bending error*), causado pelo ajuste de contato entre a prensa e o provete ensaiado. Este “*bending error*” ocorre no troço inicial do gráfico, e caracteriza-se por um alto crescimento na extensão com um baixo crescimento da tensão. Este erro deverá ser excluído da análise final. A correção deste erro baseia-se na reformulação da curva tensão-extensão, preservando as características de inclinação da curva e os valores máximos de resistência (Figura 4.7).

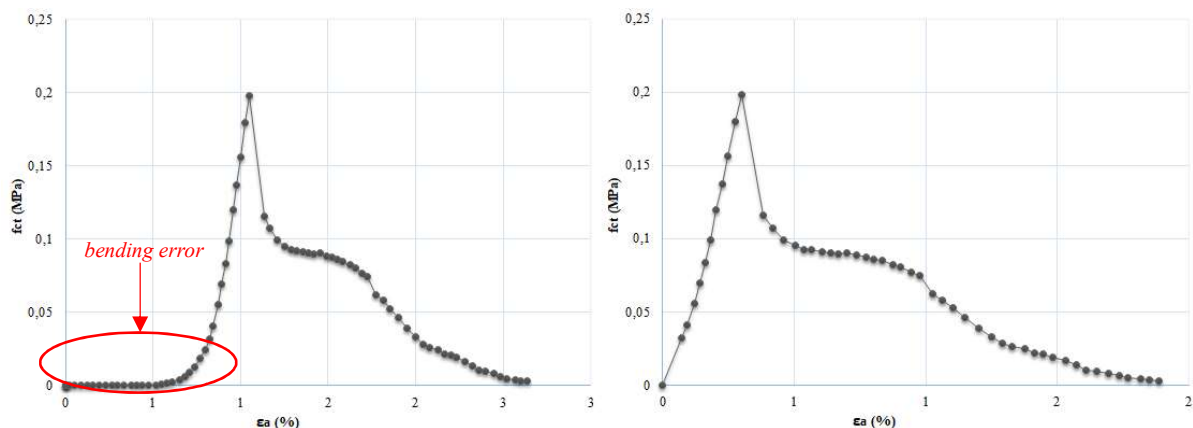


Figura 4.7 Correção do “*bending error*” da amostra STS_C_3_125_T1

4.5 ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL CÍCLICO (CIC)

4.5.1 Plano de ensaios

Os ensaios de compressão diametral cíclicos (CIC) foram realizados em provetes com 28 dias de cura, impondo-se um carregamento cíclico caracterizado por: i) 5000 ciclo; ii) nível de tensão de 50% e amplitude de carga de 7,5% referidos à resistência à tração máxima monotônica; iii) frequência de aplicação de carga a variar de 0,25, 1, 2 e 4 Hz.

O Quadro 4.3 resume o plano de ensaios de compressão diametral cíclicos. Importante citar que, para dosagem de ligante de 125kg/m³, foram realizados somente ensaios cíclicos com a frequência de aplicação de carga de 1 Hz, com objetivo de analisar a mudança de comportamento que a dosagem confere ao material compósito. Assim como anteriormente, foram definidos códigos, com o intuito de facilitar a identificação dos provetes, organizados na seguinte ordem: “Ensaio_Material Compósito_Dosagem de ligante_Frequência de aplicação da carga”.

Quadro 4.3 – Plano de ensaios de compressão diametral cíclicos (CIC)

Material compósito	Dosagem de ligante (kg/m ³)	Frequência de aplicação da carga (Hz)	Dosagem de fibra (kg/m ³)	Tempo de cura (dias)	Código
Solo + Ligante	125	1	-	28	CIC_C_125_1
		0,25			CIC_C_175_0,25
	175	1			CIC_C_175_1
		2			CIC_C_175_2
		4			CIC_C_175_4
Solo + Sisal + Ligante	125	1	10	28	CIC_SF+C_125_1
		0,25			CIC_SF+C_175_0,25
	175	1			CIC_SF+C_175_1
		2			CIC_SF+C_175_2
		4			CIC_SF+C_175_4
Solo + Polipropileno + Ligante	175	0,25	10	28	CIC_PF+C_175_0,25
		1			CIC_PF+C_175_1
		2			CIC_PF+C_175_2
		4			CIC_PF+C_175_4

S_Solo natural / SF_Fibras de Sisal / PF_Fibras de Polipropileno / C_Cimento

4.5.2 Procedimento Laboratorial

O ensaio cíclico tem por princípio a aplicação de um carregamento inicial no provete, correspondente a determinado nível de tensão, seguido das aplicações de carga de forma cíclica. Essa aplicação é caracterizada por três parâmetros, a frequência, a amplitude e número de ciclos. Estes parâmetros são responsáveis por definir, tanto o valor de tensão que o ensaio sofrerá continuamente, quanto o tempo de duração do ensaio, parâmetros estes que foram definidos na seção anterior. Abaixo é demonstrado a prensa utilizada nos ensaios de compressão diametral cíclicos, bem como os equipamentos de leitura (Figura 4.8).

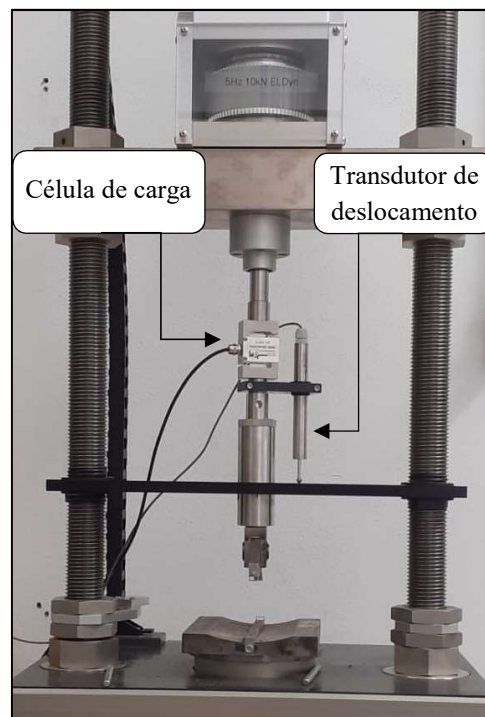


Figura 4.8 Prensa modelo ELDYN da GDS Instruments

O equipamento utilizado para realização do ensaio é uma prensa, propriedade do Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, modelo ELDYN, equipada com célula de carga de 10kN de capacidade e com transdutor de deslocamento de 50mm. Para realização do ensaio, teve-se em consideração o procedimento da secção 4.4.2, alterando a partir do ponto 5.

- 1) , 2), 3), 4) e 5) idem 4.4.2;
- 5) Após atingir 50% do nível de tensão máximo do provete (valor estabelecido nos ensaios monotónicos) inicia-se a aplicação de carga cíclica. A amplitude de carga, assim como a frequência de aplicação da carga e o número de ciclos são definidos;
- 6) A duração do ensaio irá variar conforme a sua frequência, uma vez que o número de ciclos é o mesmo para todos ensaios (5000 ciclos);
- 7) No fim da fase cíclica, retira-se o provete da prensa, e segue-se imediatamente para a prensa onde se realiza os ensaios monotónicos, levando-se o provete à rotura de forma monotónica (STS pós cíclico, STSpc), repetindo os procedimentos descritos na secção 4.4.2.

O equipamento utilizado regista automaticamente, através do *software* GDSLAB v2.5.4, as leituras de força (kN) e deslocamento vertical (mm) ao longo do tempo (Figura 4.9).

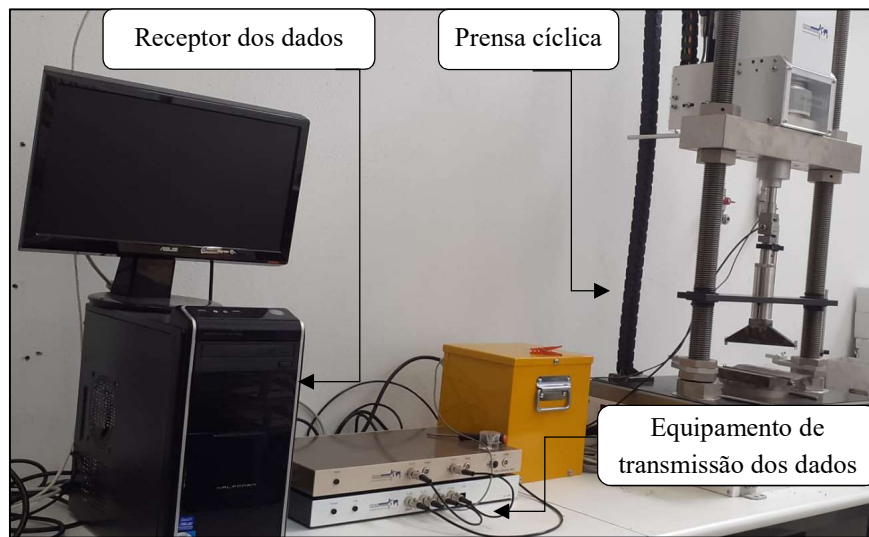


Figura 4.9 Sistema de controlo e aquisição de dados da prensa cíclica

Posteriormente, estes dados são utilizados para o cálculo de extensão axial permanente (ϵ_{ax_perm}) do provete. A Figura 4.10 ilustra a precisão da prensa em relação à força aplicada, podendo-se constatar que o sistema garante a aplicação das condições de carregamento cíclico.

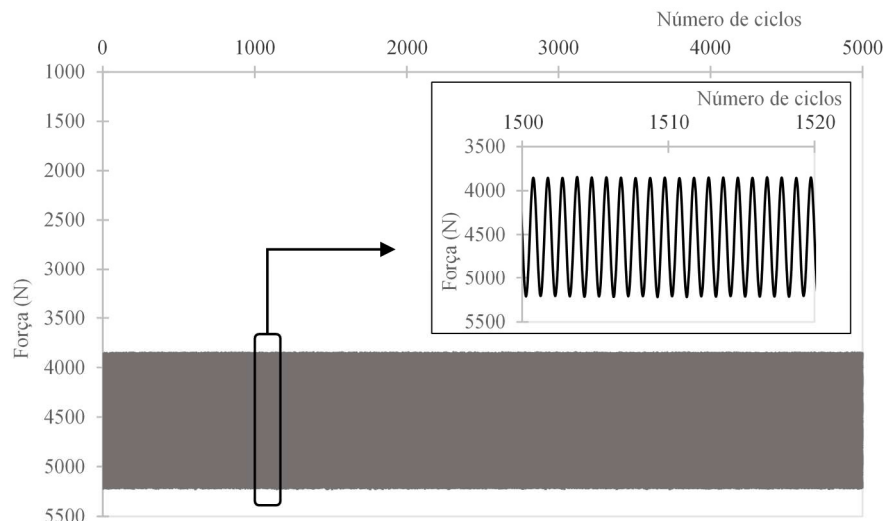


Figura 4.10 Evolução da força com o número de ciclos da amostra CIC_C_175_1_T1

Os ensaios cíclicos possibilitam a construção de um gráfico que relaciona a extensão axial permanente (ϵ_{ax_perm}) com número de ciclos do ensaio. O ensaio de compressão diametral pós ciclo (STSpC) realizado após a fase cíclica, permite analisar o efeito da aplicação de carga dinâmica no material compósito, obtendo novos valores de resistência à tração máxima (f_{ct_max}) e extensão axial de rotura (ϵ_{ax_rot}), conforme a frequência aplicada. A alteração de equipamento na fase de corte dos ensaios cíclicos é explicada pelo elevado valor de resistência dos materiais compósitos. De facto, em ensaios preliminares excedeu-se a capacidade da célula de carga do equipamento cíclico (10kN). Aliado a isto, o facto de se utilizar o mesmo equipamento nos ensaios que conduzem a amostra até a rotura por compressão diametral, contribui para uma maior confiabilidade na comparação dos resultados.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Introdução

Neste capítulo apresentam-se todos os resultados obtidos nos ensaios anteriormente descritos, separando as informações por tipo de material compósito ensaiado e, no fim, efetua-se uma comparação entre os mesmos. Este capítulo contará com três análises dentro de cada seção, sendo elas:

- 1) A primeira análise irá tratar dos ensaios de compressão diametral monotônicos de referência (STS), avaliando-se a resistência à tração máxima (f_{ct_max}), a extensão axial de rotura (ϵ_{ax-rot}) e o teor em água final (w_f);
- 2) A segunda análise foca-se nos ensaios de compressão diametral cíclicos (CIC), caracterizando a extensão axial permanente (ϵ_{ax_perm});
- 3) A terceira análise tem por objeto de estudo os ensaios de compressão diametral monotônico pós-ciclo (STSpC), realizados com os mesmos provetes do ensaios cíclico, avaliando-se a resistência à tração máxima (f_{ct_max}), a extensão axial de rotura (ϵ_{ax-rot}) e o teor em água final (w_f);

A discussão dos resultados tem como principal objetivo analisar a influência do tipo de fibra utilizada no estudo, a dosagem de ligante e do tempo de cura, bem como a influência da frequência de aplicação de carga cíclica nas características dos materiais compósitos.

Assim como descrito no plano de ensaios, foram produzidos 74 amostras para realização dos ensaios de compressão diametral monotônicos de referência e pós-cíclicos. Foi utilizado um solo granular, caracterizado como areia mal graduada, estabilizado quimicamente com a adição de cimento CEM I 42,5 R (0, 125 e 175kg/m³) e reforçado com dois tipos de fibras, Sisal e Polipropileno (10kg/m³).

5.2 Análise preliminar: Solo e Solo + Fibras

Os primeiros resultados apresentados são referentes ao solo natural e ao solo com adição somente de fibras, estando os mesmos resumidos no Quadro 5.1, onde se apresenta para além da resistência à tração (f_{ct}), de extensão axial na rotura (ϵ_{ax-rot}) e do teor em água final (w_f), os

valores médios dos parâmetros para os dois provetes ensaiados, e o desvio percentual em relação ao valor médio.

Quadro 5.1 – Resumo dos resultados obtidos para ensaios STS do “Solo”, “Solo+Sisal” e “Solo+Polipropileno”

Código	Dosagem de Fibra (kg/m ³)	f _{ct} -max (kPa)	f _{ct} -med (kPa)	ε _{ax-rot} (%)	ε _{ax-rot-med} (%)	Wf (%)	Wf-med (%)
STS_S_0_0	-	2,09	1,92	1,28	1,16	14,14	14,00
		1,74	(8,96 %)	1,03	(10,82 %)	13,86	(1,00 %)
STS_SF_0_0	10	6,22	6,51	1,82	1,80	13,77	13,98
		6,80	(4,65 %)	1,78	(1,09 %)	14,19	(1,50 %)
STS_PF_0_0	10	6,08	6,22	2,54	2,61	12,13	12,38
		6,37	(2,38 %)	2,68	(2,64 %)	12,63	(2,02 %)

(...) Desvio percentual

A análise dos valores e das curvas tensão-extensão, representada na Figura 5.1, demonstram a boa qualidade dos provetes e a fiabilidade na reprodução dos resultados.

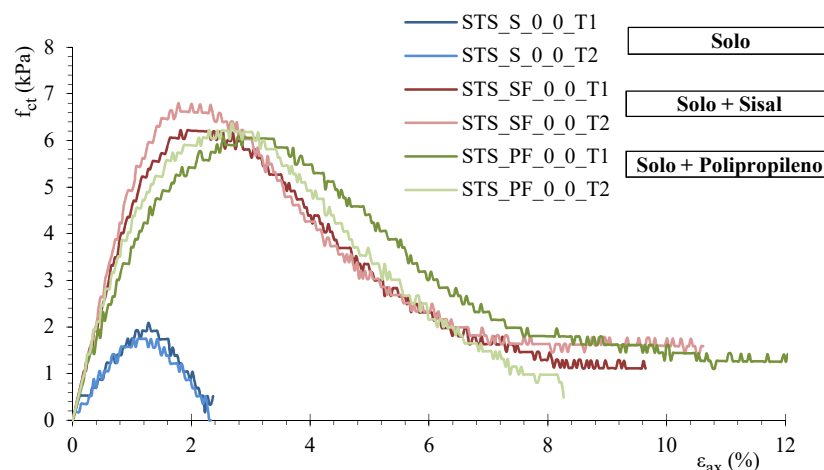


Figura 5.1 Resistência máxima à tração (f_{ct}-max) dos provetes: “Solo”; “Solo + Sisal”; “Solo + Polipropileno”

A interpretação dos valores encontrados e do comportamento das curvas demonstra que a inserção de fibras elevou a resistência à tração face ao solo natural, constatando-se que as fibras sintéticas exibem uma maior deformação na rotura, explicado pelo facto destas fibras serem mais flexíveis. O ganho de resistência é similar em ambos os casos de fibras. O teor em água nos provetes com fibras naturais é maior do que o de fibras sintéticas, o que corrobora a ideia da capacidade de absorção da água pelas fibras naturais.

5.3 Solo + Ligante

O Quadro 5.2 indica os valores encontrados para a mistura do solo com estabilização química de ligante cimentício.

Quadro 5.2 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios STS de referência para mistura “Solo+Ligante”

Código	Dosagem de ligante (kg/m ³)	Tempo de cura (dias)	f _{ct-max} (kPa)	f _{ct-med} (kPa)	ε ax-rot (%)	ε ax-rot-med (%)	Wf (%)	wf-med (%)
STS_C_3_125	125	3	198,02	198,02	0,246	0,23	11,37	12,03
			175,11	(6,14 %)	0,230	(3,5 %)	12,68	(5,45 %)
7		261,87	254,82	0,312	0,29	11,44	11,34	
		247,78	(2,76 %)	0,263	(8,47 %)	11,24	(0,88 %)	
14		263,17	261,34	0,259	0,26	11,01	10,94	
		259,52	(0,70 %)	0,266	(1,15 %)	10,88	(0,59 %)	
STS_C_28_125		28	308,66	291,43	0,283	0,28	11,11	11,12
				274,20	(5,91 %)	0,284	(0,13 %)	11,14
STS_C_3_175	175	3	427,07	396,58	0,46	0,49	11,16	11,08
			366,09	(7,69 %)	0,52	(5,77 %)	11,00	(0,72 %)
7		476,83	455,52	0,38	0,36	10,81	10,77	
		434,20	(4,68 %)	0,34	(5,88 %)	10,72	(0,42 %)	
14		568,56	565,46	0,21	0,25	10,86	10,82	
		562,37	(0,55 %)	0,28	(14,28 %)	10,79	(0,37 %)	
STS_C_28_175		28	583,07	579,43	0,31	0,33	11,00	10,72
				575,80	(0,63 %)	0,35	(6,06 %)	10,43

(...) Desvio percentual

O quadro evidencia maiores resistências à tração e extensões máximas de rotura e menor teor de água após os ensaios para os provetes com maior dosagem de ligante. Os resultados são explicados pelo facto de uma maior dosagem de ligante induzir a produção de maior quantidade ligações, produtos das reações cimentícias, responsáveis pela construção de uma matriz solida mais resistente e rígida, efeito este mais notório para maiores tempos de cura. A redução do teor em água explica-se devido ao maior teor de ligante “consumir” maiores quantidades de água nas reações de hidratação do ligante. A evolução da resistência máxima à tração dos provetes com o tempo de cura, considerando as dosagens de ligante em estudo, é representada na Figura 5.2.

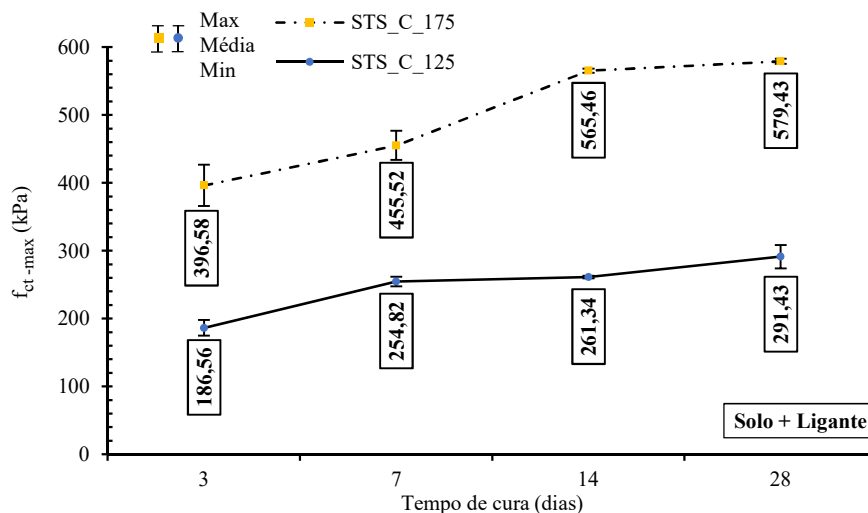


Figura 5.2 Ensaios STS monotónico de referência - Evolução da resistência máxima à tração (f_{ct-max}) dos provetes “Solo+Ligante”, com diferentes dosagens de ligante, em relação ao tempo de cura.

O ganho de resistência acompanhou o tempo de cura, i.e., quanto maior o tempo de cura do provete, maior a resistência máxima obtida. Também é possível estabelecer que o ganho de

resistência dos provetes ensaiados para as dosagens de ligante de 125kg/m^3 foram similares, em percentagem, ao ganho de resistência dos provetes com dosagens de ligante de 175kg/m^3 : para a menor dosagem de ligante, o ganho de resistência de 3 para 28 dias, foi de $\approx 47\%$, enquanto que para a maior dosagem, o ganho de resistência no mesmo intervalo de tempo de cura foi de $\approx 46\%$. A Figura 5.3 evidencia a mudança no comportamento do solo, e o ganho de resistência com o aumento do teor de ligante.

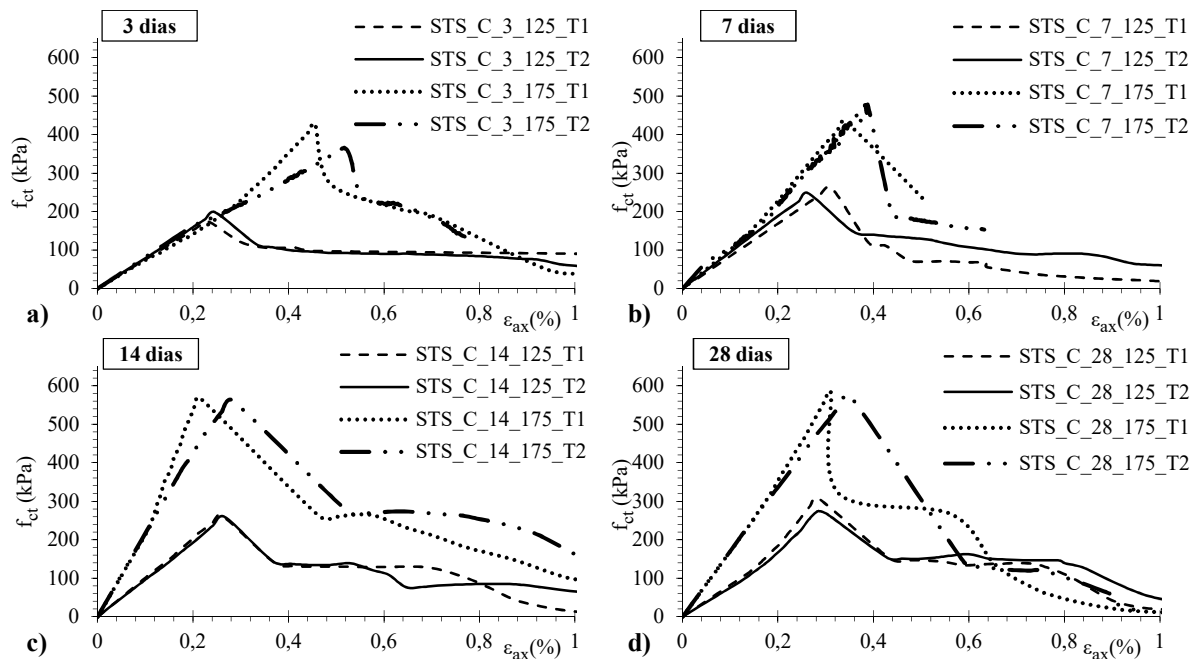


Figura 5.3 Curvas tensão-extensão “Solo+Ligante” conforme o tempo de cura, com diferentes dosagens de ligante, dos ensaios de referência (STS): a) 3 dias; b) 7 dias; c) 14 dias; d) 28 dias.

A estabilização com ligante torna frágil o comportamento do material compósito. É perceptível a queda abrupta de resistência à tração do compósito após a rotura, o que configura o comportamento frágil do material. Neste caso, a resistência do material é governada pelas ligações entre o solo e a matriz cimentícia.

O material compósito não possui nenhum elemento que redistribua as tensões aplicadas, e acaba por romper instantaneamente de forma abrupta. A grande rigidez do material impossibilita uma percepção ao olho nu desta consequência, uma vez que a extensão axial possui valores baixos, não demonstrando qualquer alteração significativa no provete.

Os ensaios cíclicos foram executados conforme o Quadro 5.3. Nas Figuras 5.4 e 5.5 são exibidos os gráficos que demonstram a evolução da extensão axial permanente em relação ao número de ciclos e tempo de ensaio, considerando as diferentes frequências de carga aplicada.

Quadro 5.3 – Parâmetros utilizados na realização dos ensaios cíclicos (CIC) “Solo+Ligante”

Código	Dosagem de ligante (kg/m ³)	Frequência de aplicação da carga (Hz)	f _{ct-med} (kPa)	50% f _{ct-med} (kPa)	Amplitude: 7,5% f _{ct-med} (kPa)
CIC_C_125_1	125	1	291,43	145,72	10,93
CIC_C_175_0,25		0,25			
CIC_C_175_1	175	1	579,43	289,72	21,73
CIC_C_175_2		2			
CIC_C_175_4		4			

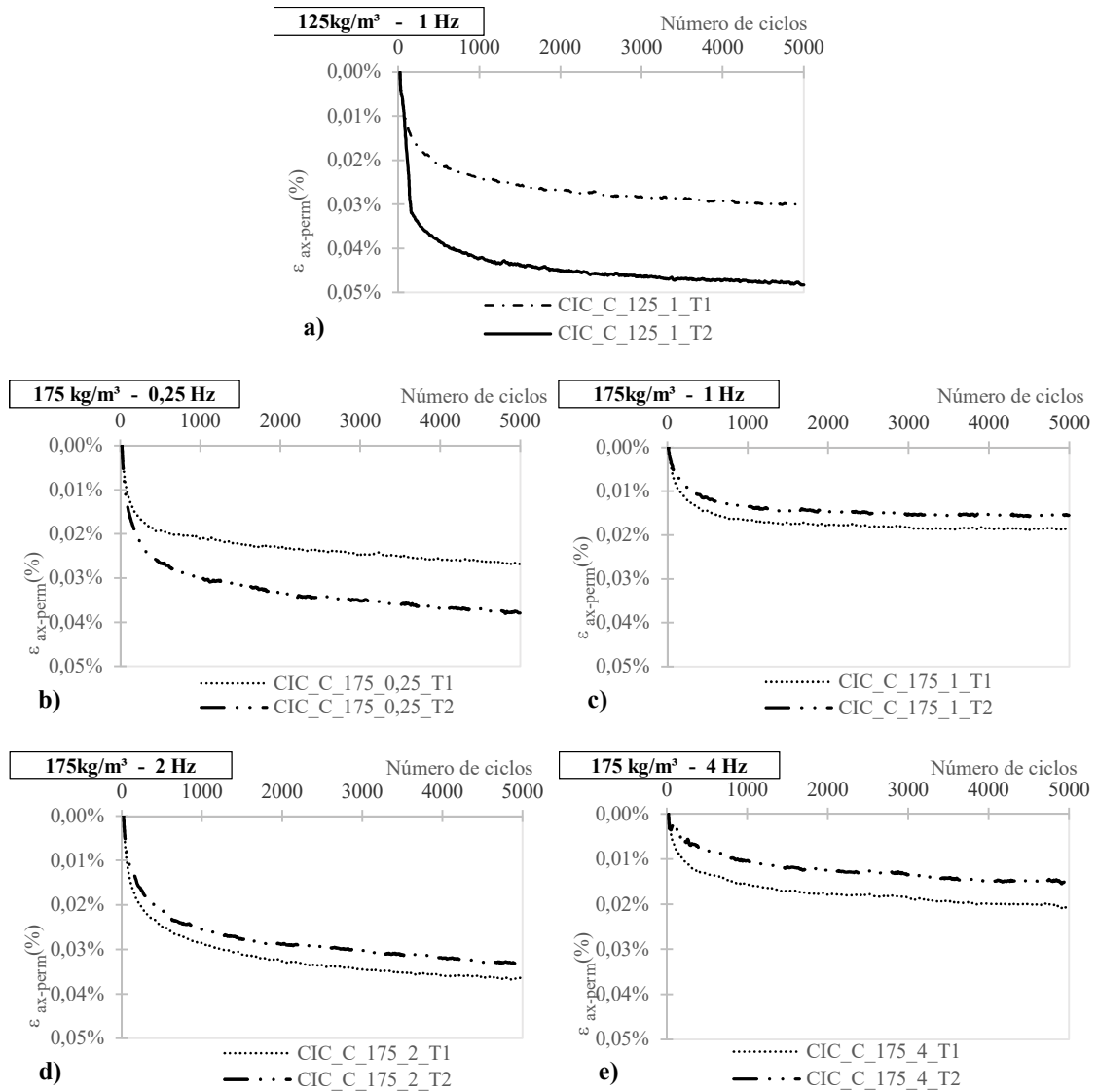


Figura 5.4 Extensão axial permanente ($\epsilon_{ax-perm}$) “Solo + Ligante” conforme a frequência de aplicação de carga dos ensaios cíclicos (CIC): Dosagem de ligante 125kg/m³: a) 1 Hz; Dosagem de ligante 175kg/m³: b) 0,25 Hz; c) 1 Hz; d) 2 Hz; e) 4 Hz.

Constata-se que em todos os provetes ensaiados as deformações axiais tiveram sua maior evolução até os primeiros 500 ciclos, traduzido por uma descida abrupta inicial, evoluindo gradualmente para estabilização dessas deformações com o aumento do número de ciclos.

Comparando as deformações axiais permanentes para a frequência de 1 Hz, mas com diferentes dosagens de ligante, verifica-se que as deformações são maiores no material compósito com menor dosagem, explicado pelo facto de ser o material menos rígido.

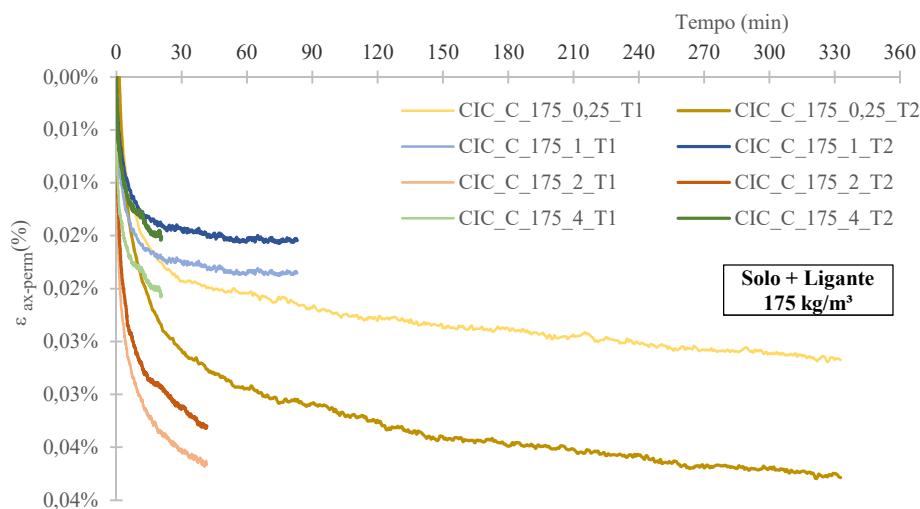


Figura 5.5 Extensão axial permanente ($\epsilon_{ax-perm}$) “Solo+Ligante” conforme a frequência de aplicação de carga dos ensaios cíclicos (CIC), em relação ao tempo de ensaio.

Analisando a Figura 5.5, verifica-se uma grande oscilação nos resultados encontrados para o ensaio com frequência de 0,25 Hz. Pode-se observar que, à exceção do provete T2 da frequência 0,25 Hz, a extensão axial permanente para as frequências de 0,25, 1 e 4 Hz, segue aproximadamente a mesma evolução no tempo, sugerindo que a deformação depende do número de ciclos aplicados, e não do tempo de aplicação da carga cíclica. Já quanto à frequência de 2 Hz as deformações axiais permanentes seguem outra evolução, sendo de maior magnitude, indicando que esta frequência origina maior nível de degradação do material compósito (pode-se estar próximo da frequência de vibração natural do material). Após o carregamento cíclico, os provetes seguiram para a fase de corte em ensaios de compressão diametral monotônicos, designados STSpc pós-ciclo (STSpc), como forma de comparação com os resultados encontrados nos ensaios monotônicos de referência (STS). No Quadro 5.4. e na Figura 5.6 são apresentados os resultados.

Quadro 5.4 – Resumo dos resultados obtidos para ensaios STSpc “Solo+Ligante” (28 dias de cura)

Código	Dosagem de ligante (kg/m ³)	Frequência de aplicação da carga (Hz)	f _{ct-max} (kPa)	f _{ct-med} (kPa)	ϵ_{ax-rot} (%)	$\epsilon_{ax-rot-med}$ (%)	w _f (%)	w _{f-med} (%)
STSpc_C_125_1	125	1	335,78	329,85	0,296	0,32	11,11	11,12
			323,91	(1,83 %)	0,340	(6,37 %)	11,14	(0,18 %)
STSpc_C_175_0,25	175	0,25	596,81	576,18	0,245	0,28	11,16	11,08
			555,56	(3,71 %)	0,309	(10,24%)	11,00	(0,73 %)
STSpc_C_175_1	175	1	616,76	624,29	0,320	0,31	10,81	10,77
			631,81	(1,19 %)	0,295	(4,20 %)	10,72	(0,47 %)
STSpc_C_175_2	175	2	511,47	503,18	0,259	0,24	11,43	11,00
			494,89	(1,68 %)	0,215	(10,31 %)	10,56	(4,17 %)
STSpc_C_175_4	175	4	598,28	576,14	0,323	0,33	11,18	10,79
			554,00	(4,00 %)	0,334	(1,74 %)	10,40	(3,75 %)

(...) Desvio percentual

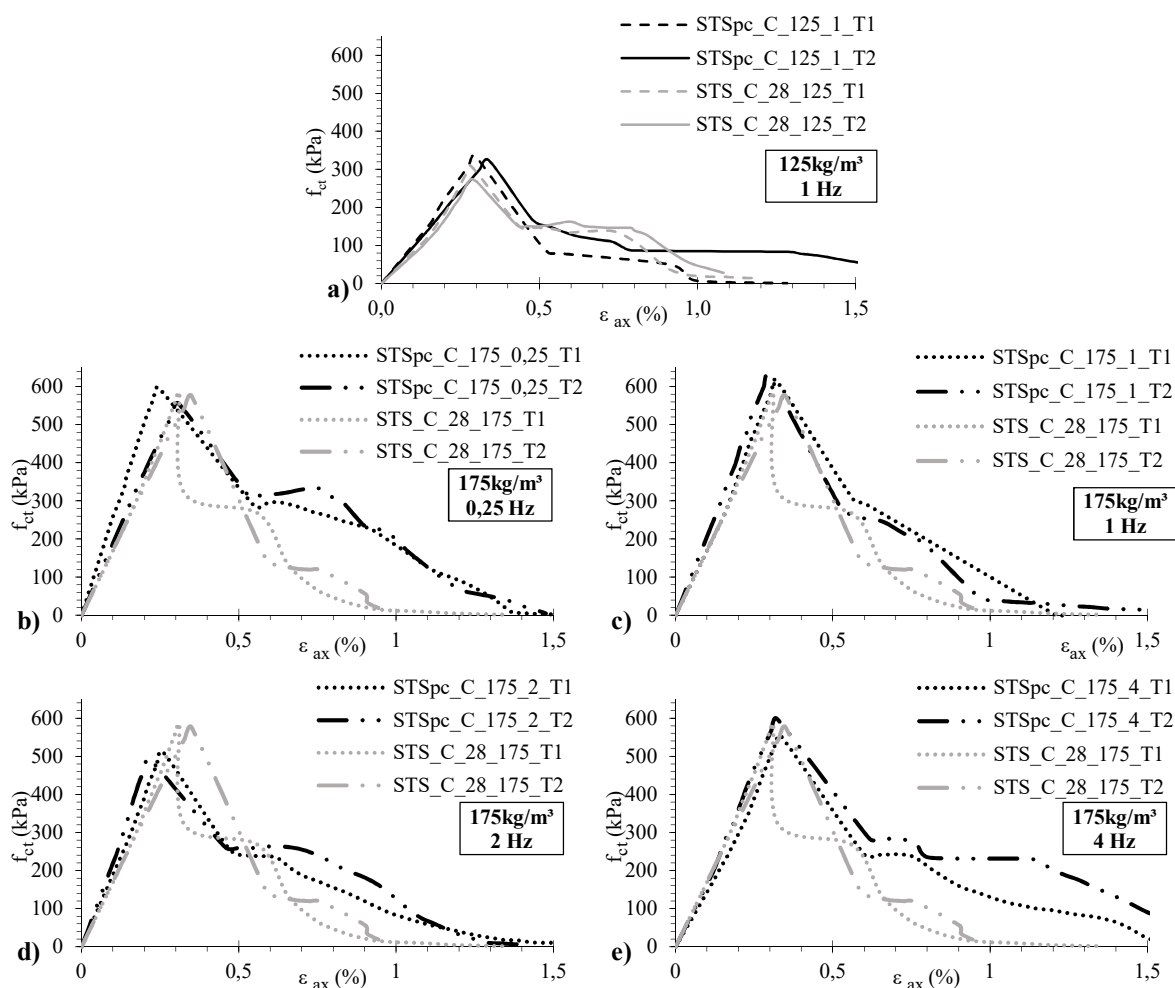


Figura 5.6 Curvas tensão-extensão “Solo+Ligante” conforme a frequência de aplicação de carga dos ensaios STSpc. Dosagem de ligante 125kg/m³: a) 1 Hz; Dosagem de ligante 175kg/m³: b) 0,25 Hz; c) 1 Hz; d) 2 Hz; e) 4 Hz

Analisando os resultados pós-cíclico, verifica-se que o aumento da dosagem de ligante promove a construção de uma matriz sólida mais resistente. Os resultados também permitem constatar que para a mesma dosagem, a variação de frequência tem expressão significativa no caso com aplicação de 2 Hz, havendo uma perda de resistência à tração do material, explicada pelas maiores deformações axiais permanentes ocorridas durante o ensaio cíclico para esta frequência. Quando se comparam os resultados dos ensaios de compressão diametral antes (STS) e após a fase cíclica (STSpc), verifica-se que para os ensaios sujeitos a carregamento com frequência de 1 Hz houve um ganho de resistência à tração ($\approx 10\%$) face à referência (STS). Para as frequências de 0,25 e 4 Hz o comportamento é praticamente o mesmo, enquanto que no caso da frequência de 2 Hz ocorre uma perda de resistência ($\approx 13\%$) face à referência (STS) (Figura 5.7).

Estes resultados parecem estar em concordância direta com o nível de deformação imposto aos provetes, ou seja, nos provetes sujeitos a maiores deformações axiais permanentes na fase

cíclica (quebra de um maior número de ligações cimentícias) a resistência à tração é menor. Este facto é bem ilustrado na Figura 5.8, onde se representa a totalidade de deformação axial sofrida pelos provetes.

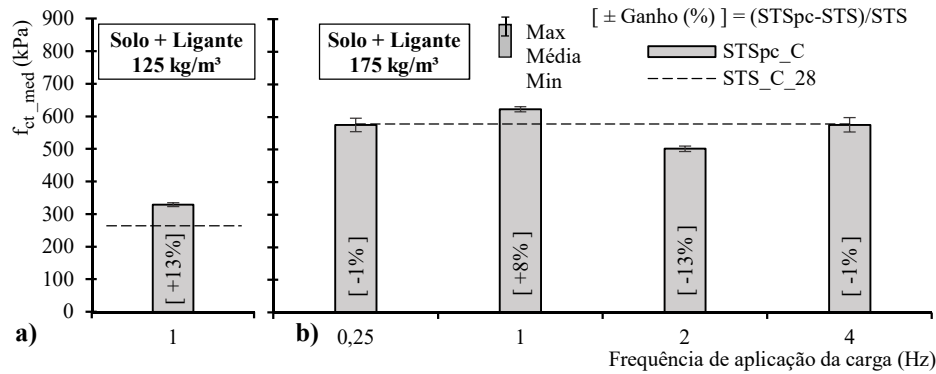


Figura 5.7 Resistência à tração média (f_{ct-med}) “Solo+Ligante” conforme a frequência de aplicação de carga dos ensaios pós-ciclo (STSpC). a) 125kg/m³; b) 175kg/m³

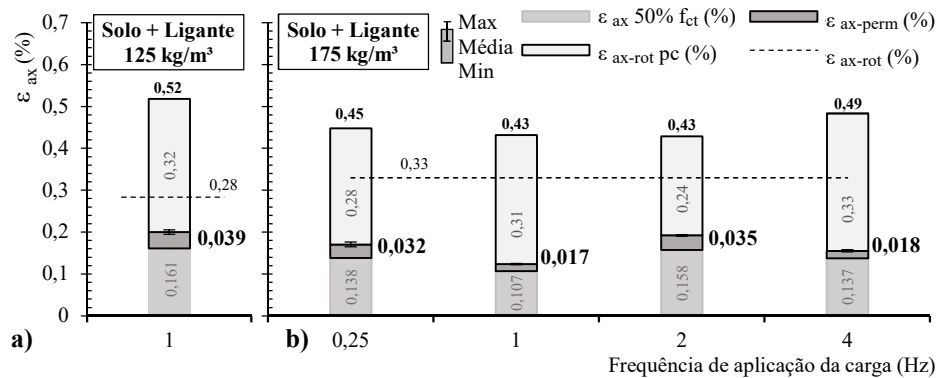


Figura 5.8 Extensão axial permanente média ($\epsilon_{ax-perm-med}$) “Solo+Ligante” conforme a frequência de aplicação de carga (CIC), em relação a extensão de rotura. a) 125kg/m³ b) 175kg/m³

Os resultado indicam que a frequência de carga aplicada na fase cíclica tem importância nas deformações permanentes do material composto, com implicações na quebra das ligações cimentícias (degradação) com conseqüente perda de rigidez e resistência.

5.4 Solo + Ligante + Sisal

O Quadro 5.5 indica os valores encontrados para mistura do solo com estabilização química e reforçada com fibras de sisal. O quadro evidencia maiores resistências à tração e extensões máximas de rotura, e menor teor de água, após os ensaios para os provetes com maior dosagem de ligante. Estes resultados são explicados, tal como no caso dos provetes “Solo + Ligante”, pelo facto de uma maior dosagem de ligante induzir a produção de maior quantidade de produtos das reações cimentícias (consumindo água nessas reações), permitindo a construção de uma matriz sólida mais resistente e rígida, efeito mais evidente para maiores tempos de cura.

Quadro 5.5 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios STS de referência para mistura “Solo+Ligante+Sisal”

Código	Dosagem de ligante (kg/m³)	Tempo de cura (dias)	f _{ct-max} (kPa)	f _{ct-med} (kPa)	ε _{ax-rot} (%)	ε _{ax-rot-med} (%)	Wf (%)	wf-med (%)
STS_SF+C_3_125	125	3	111,95	120,32	0,65	0,80	11,26	11,35
			128,69	(6,96 %)	0,90	(13,89%)	11,45	(0,88 %)
7		222,75	234,27	0,36	0,32	12,58	11,79	
		245,78	(4,92 %)	0,29	(10,94%)	10,99	(6,70 %)	
14		293,66	310,74	0,31	0,30	11,89	11,93	
		327,82	(5,50 %)	0,29	(3,44 %)	11,98	(0,42 %)	
28		370,75	362,56	0,43	0,39	11,27	11,31	
		354,38	(2,26 %)	0,36	(9,03 %)	11,35	(0,35 %)	
STS_SF+C_3_175	175	3	245,49	247,13	0,57	0,65	11,42	11,47
248,78			(0,67 %)	0,72	(13,32%)	11,51	(0,35 %)	
7		539,57	546,75	0,33	0,36	11,17	11,19	
		553,93	(1,33 %)	0,39	(9,08 %)	11,22	(0,27 %)	
14		556,05	559,81	0,30	0,32	10,52	10,92	
		563,58	(0,68 %)	0,33	(4,54 %)	11,33	(3,75 %)	
28		569,67	574,73	0,21	0,22	10,33	10,46	
		579,79	(0,89 %)	0,23	(4,29 %)	10,58	(1,25 %)	

(...) Desvio percentual

Ao se comparar estes resultados com os dos ensaios “Solo + Ligante” (Quadro 5.2), constata-se que a adição das fibras de Sisal é prejudicial para menores tempos de cura. De facto a presença das fibras pode impedir o estabelecimento de algumas ligações cimentícias com as partículas do solo, mas este efeito tende a anular-se à medida que se desenvolvem as reações de hidratação. É igualmente interessante observar-se que a presença das fibras tem maior efeito quando a dosagem de ligante é menor, pois o material menos rígido irá se deformar mais, mobilizando a resistência das fibras. A Figura 5.9 mostra a evolução, em relação ao tempo, da resistência máxima à tração.

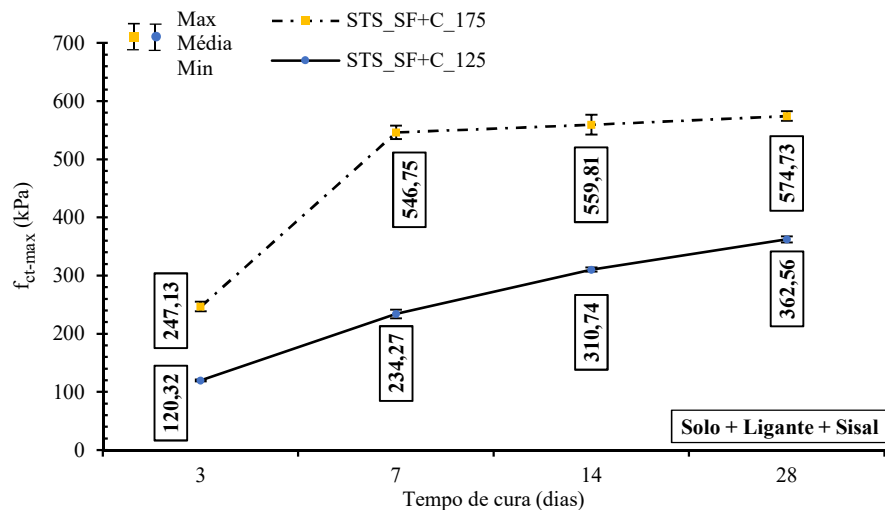


Figura 5.9 Ensaios STS monotônico de referência - Evolução da resistência máxima à tração (f_{ct-max}) dos provetes “Solo+Ligante+Sisal”, com diferentes dosagens de ligante, em relação ao tempo de cura.

O ganho de resistência acompanhou o tempo de cura. Os provetes com menor dosagem de ligante a resistência máxima obtida aos 28 dias de cura cresceu ≈ 201% em relação aos 3 dias de cura. Enquanto nos provetes com maior dosagem de ligante, esse valor se eleva em ≈ 132%,

para o mesmo período. Estes resultados demonstram a maior ação das fibras nos provetes com menor dosagem de ligante. Entre os 3 e 7 dias de cura, a diferença de resistência chega a ser de $\approx 121\%$, na maior dosagem de ligante. Essa diferença cai para $\approx 94\%$ na menor dosagem. Evidenciando que, quando se tem um maior teor de ligante, a ligação matriz-fibra só ocorre de forma satisfatória a partir dos 7 dias de cura.

A Figura 5.10 evidencia o desenvolvimento das curvas tensão-extensão em relação ao tempo de cura, podendo observar-se a mudança no comportamento do solo conforme a evolução do tempo de cura.

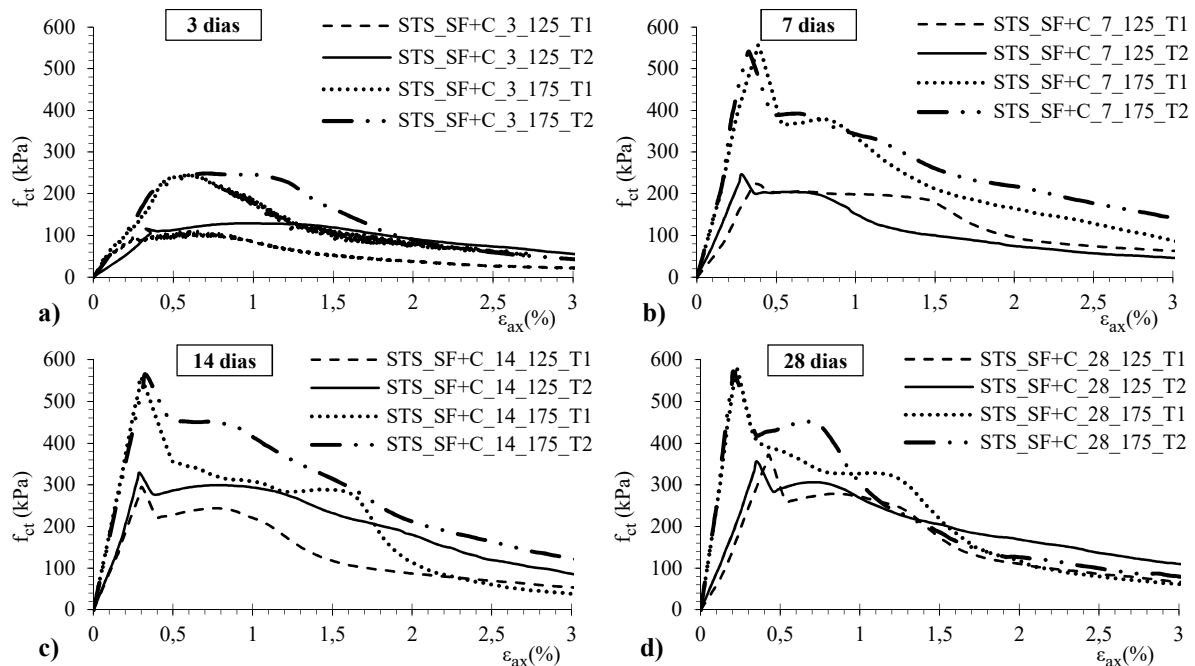


Figura 5.10 Curvas tensão-extensão “Solo+Ligante+Sisal” conforme o tempo de cura, com diferentes dosagens de ligante, dos ensaios de referência (STS): a) 3 dias; b) 7 dias; c) 14 dias; d) 28 dias.

A adição de fibras naturais ao solo altera o comportamento do material compósito, bastando comparar com os resultados dos ensaios “Solo+Ligante” (Figura 5.3), podendo observar-se que, após a rotura, a perda de resistência é parcial, mantendo o material com uma significativa capacidade resistente com a evolução das deformações. Isto é, a incorporação de fibras de Sisal confere ao material compósito alguma ductilidade, caracterizada por uma resistência residual. Isto é evidente ao se comparar a resistência mobilizada no material para 1% da deformação (Figura 5.3 *versus* Figura 5.10).

Ainda é possível observar na Figura 5.10 que a resistência residual tende para igual valor, independente da dosagem de ligante, uma vez que a dosagem das fibras é a mesma nos materiais. De facto, a perda de resistência ocasionada pela rotura, faz com que os elementos de reforço entrem em funcionamento, transferindo tensões da matriz cimentícia para as fibras. Este efeito é denominado “ponte”, por ser capaz de criar “pontes” de tensões no elemento. A partir

deste ponto o material passa a ser governado pela resistência à tração das fibras, adquirindo um comportamento dúctil, causando uma perda gradual da resistência com a deformação, na medida que ocorre a rotura progressiva das fibras, seja por arranque, seja por tração.

As Figuras 5.11 e 5.12 e o Quadro 5.6 exhibe-se os valores e os gráficos de evolução da extensão axial permanente em relação ao número de ciclos do ensaio.

Quadro 5.6 – Parâmetros utilizados na realização dos ensaios cíclicos (CIC) “Solo+Ligante+Sisal”

Código	Dosagem de ligante (kg/m ³)	Frequência de aplicação da carga (Hz)	f _{ct-med} (kPa)	50% f _{ct-med} (kPa)	Amplitude: 7,5% f _{ct-med} (kPa)
CIC_SF+C_125_1	125	1	362,56	181,28	12,60
CIC_SF+C_175_0,25	175	0,25	574,73	287,37	21,55
CIC_SF+C_175_1		1			
CIC_SF+C_175_2		2			
CIC_SF+C_175_4		4			

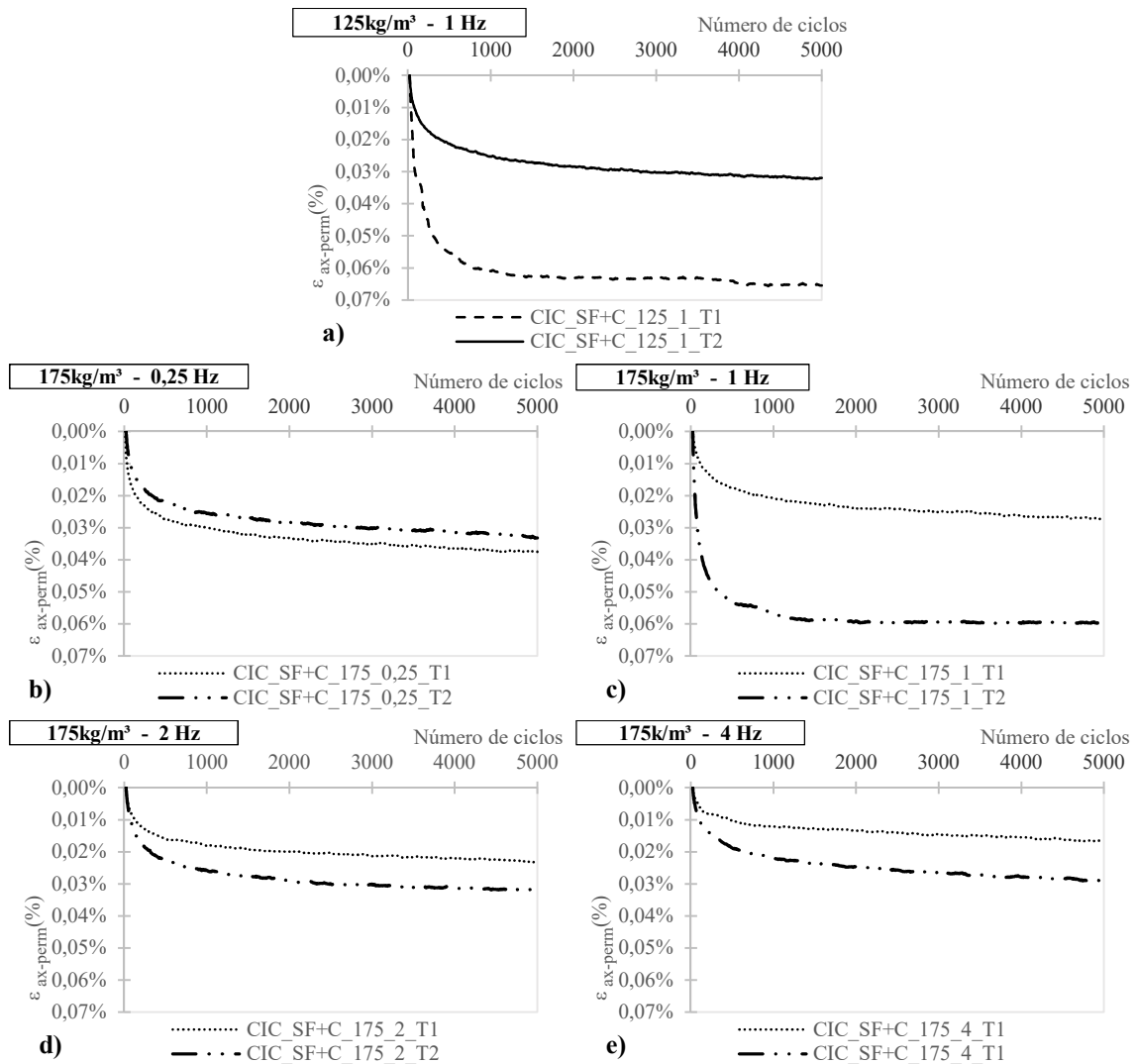


Figura 5.11 Extensão axial permanente ($\epsilon_{ax-perm}$) “Solo+Ligante+Sisal” conforme a frequência de aplicação de carga dos ensaios cíclicos (CIC): Dosagem de ligante 125kg/m³ a) 1 Hz; Dosagem de ligante 175kg/m³ b) 0,25 Hz; c) 1 Hz; d) 2 Hz; e) 4 Hz.

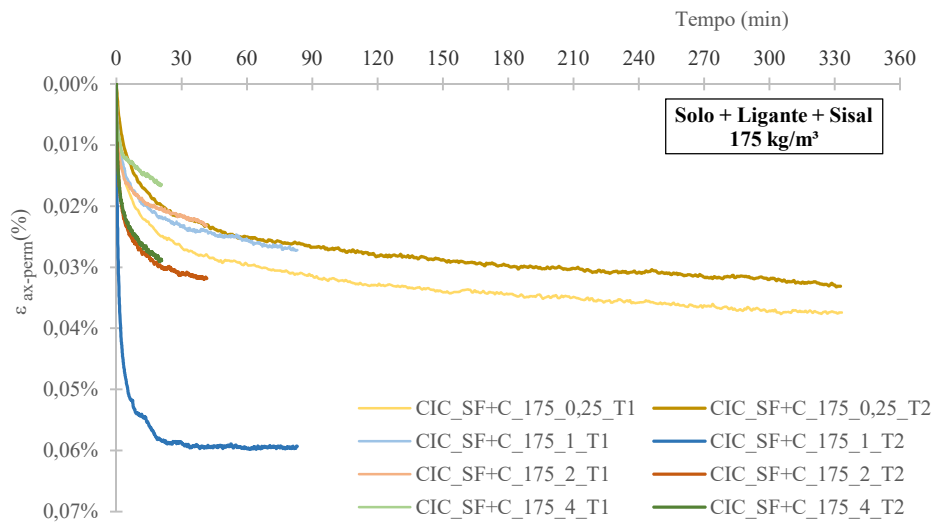


Figura 5.12 Extensão axial permanente ($\epsilon_{ax-perm}$) “Solo+Ligante+Sisal” com o tempo para diferentes frequências de aplicação de carga dos ensaios cíclicos (CIC)

Constata-se que em todos os provetes ensaiados as deformações axiais tiveram sua maior evolução até os primeiros 500 ciclos, traduzido por uma descida abrupta inicial, evoluindo gradualmente para estabilização dessas deformações com o aumento do número de ciclos. Comparando as deformações axiais permanentes para a frequência de 1 Hz, mas com diferentes dosagens de ligante, verifica-se que as deformações são similares, sendo ligeiramente menores no material compósito com maior dosagem, explicado pelo facto de ser o material menos rígido. A presença das fibras é capaz de inibir o estabelecimento das ligações no material, originando uma matriz menos rígida, logo, mais deformável. Este efeito é muito ligeiro quando se comparam as Figuras 5.4 e 5.11, o que pode ser explicado pelo nível de tensão-deformação imposto aos provetes, o qual está muito aquém da rotura. Logo, as fibras ainda não entraram em funcionamento, sendo o comportamento controlado pela matriz cimentícia.

Analisando a Figura 5.12, verifica-se uma grande oscilação nos resultados encontrados para o ensaio com frequência de 1 Hz. Pode-se observar que, à exceção do provete T2 da frequência 1 Hz, a evolução da extensão axial permanente para as frequências restantes segue, aproximadamente, a mesma evolução no tempo, sugerindo que a deformação depende do número de ciclos aplicados, e não do tempo de aplicação da carga cíclica.

Após o carregamento cíclico, os provetes seguiram para a fase de corte em ensaios de compressão diametral monotónicos, designados STS pós-ciclo (STSpC), como forma a comparar com os resultados encontrados nos ensaios monotónicos de referência (STS). No Quadro 5.7. e na Figura 5.13 são apresentados os resultados.

Quadro 5.7 – Resumo dos resultados obtidos para ensaios STSpc “Solo+Ligante+Sisal” (28 dias de cura)

Código	Dosagem de ligante (kg/m ³)	Frequência de aplicação da carga (Hz)	f _{ct} -max (kPa)	f _{ct} -med (kPa)	ε _{ax-rot} (%)	ε _{ax-rot-med} (%)	Wf (%)	Wf-med (%)
STSpc_SF+C_125_1	125	1	377,31	375,42	0,257	0,29	11,27	11,20
			373,53	(0,51%)	0,323	(10,21%)	11,13	(0,62 %)
STSpc_SF+C_175_0,25	175	0,25	698,89	683,99	0,378	0,43	11,66	11,42
			669,10	(2,23%)	0,473	(10,02%)	11,18	(2,10 %)
STSpc_SF+C_175_1	175	1	861,42	844,33	0,402	0,44	11,30	11,33
			827,24	(2,07%)	0,484	(8,40%)	11,37	(0,26 %)
STSpc_SF+C_175_2	175	2	730,48	721,28	0,342	0,40	12,16	11,24
			712,09	(1,29%)	0,456	(12,4%)	10,32	(8,18 %)
STSpc_SF+C_175_4	175	4	740,26	709,98	0,350	0,33	10,78	10,49
			679,70	(4,45%)	0,315	(5,52%)	10,20	(2,76%)

(...) Desvio percentual

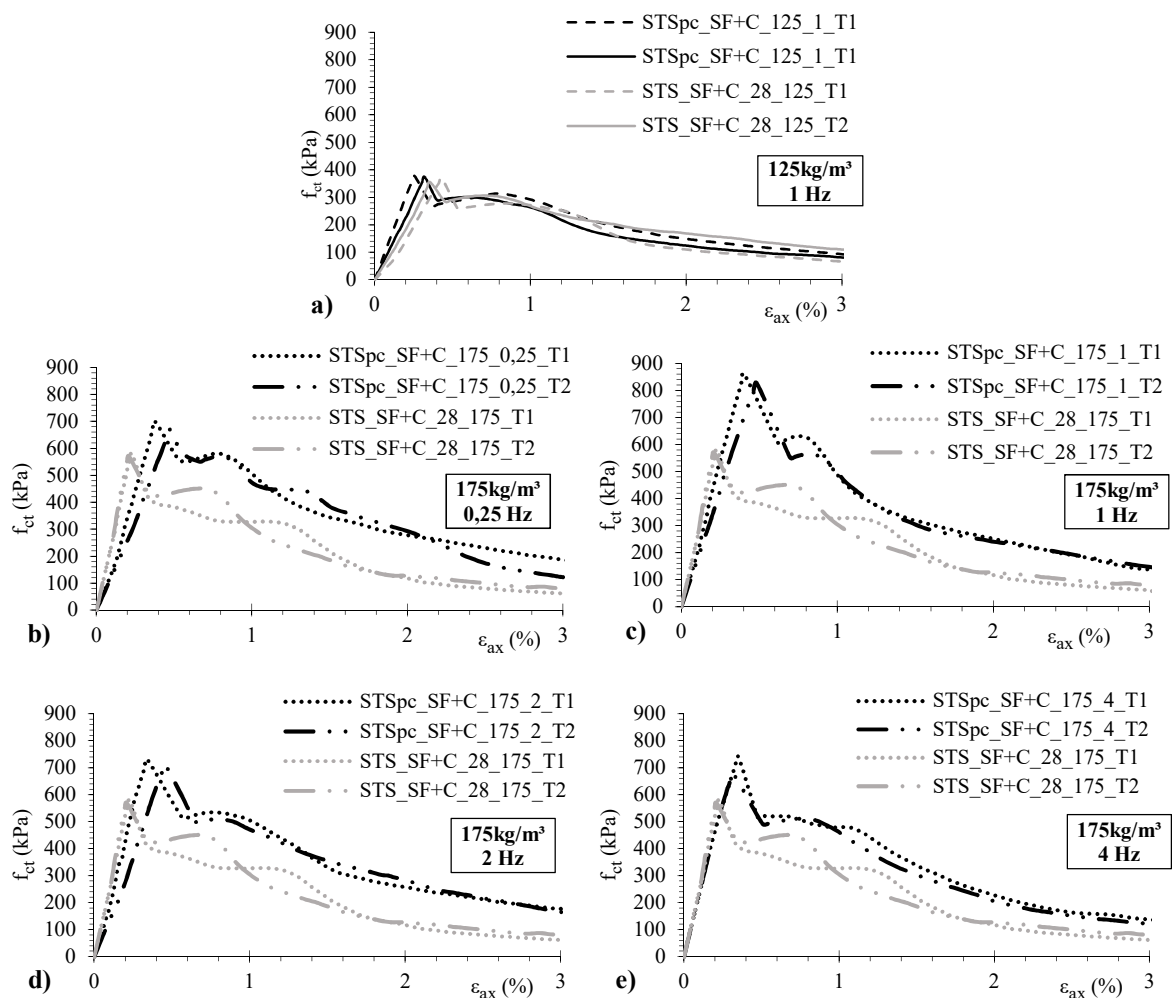


Figura 5.13 Curvas tensão-extensão “Solo+Ligante+Sisal” conforme a frequência de aplicação de carga dos ensaios STSpc. Dosagem de ligante 125kg/m³ a) 1 Hz; Dosagem de ligante 175kg/m³ b) 0,25 Hz; c) 1 Hz; d) 2 Hz; e) 4 Hz

Analisando os resultados pós-cíclico, verifica-se que o aumento da dosagem de ligante promove a construção de uma matriz sólida mais resistente e mais rígida. Os resultados também permitem constatar que para a mesma dosagem, independentemente do nível de frequência

aplicada, quando se comparam os resultados dos ensaios de compressão diametral antes (STS) e após a fase cíclica (STSpC), verifica-se que todos ensaios sujeitos a carregamento cíclico obtiveram ganho de resistência à tração de até $\approx 47\%$ face à referência (STS) (Figura 5.14). Se obteve efeito idêntico para a resistência residual.

Estes resultados parecem estar em concordância direta com o nível de deformação imposto aos provetes, ou seja, nos provetes sujeitos a maiores deformações axiais permanentes na fase cíclica (quebra de um maior número de ligações cimentícias) a resistência à tração passa a sofrer influência das fibras de sisal, fazendo com que se atinja uma resistência maior do elemento. Este facto é bem ilustrado na Figura 5.15, onde se representa a totalidade de deformação axial sofrida pelos provetes.

Este aumento de resistência após carregamento cíclico pode ser explicado pelas deformações que ocorrem durante a fase cíclica (micro fissuração), as quais permitem mobilizar a resistência das fibras antes da rotura de pico nos ensaios de compressão diametral pós-ciclo (STSpC). Ou seja, estas microfissuras são como “zonas preferenciais” de deformação, as quais permitem mobilizar mais cedo a resistência das fibras.

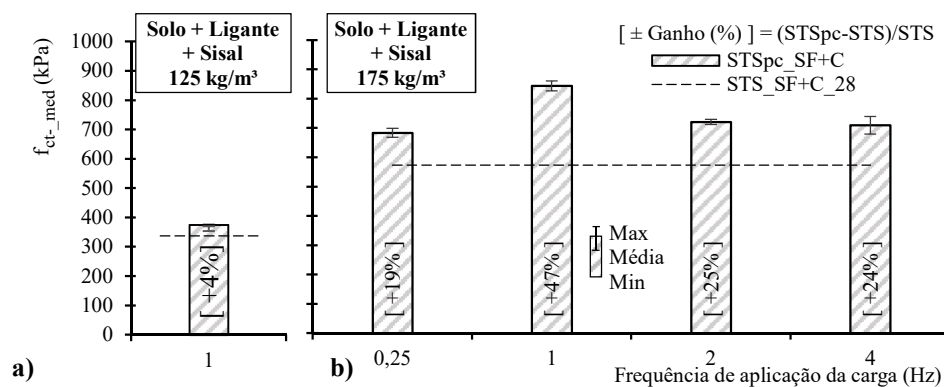


Figura 5.14 Resistência à tração média (f_{ct-med}) “Solo+Ligante+Sisal” conforme a frequência de aplicação de carga dos ensaios pós-ciclo (STSpC). a) 125kg/m³; b) 175kg/m³

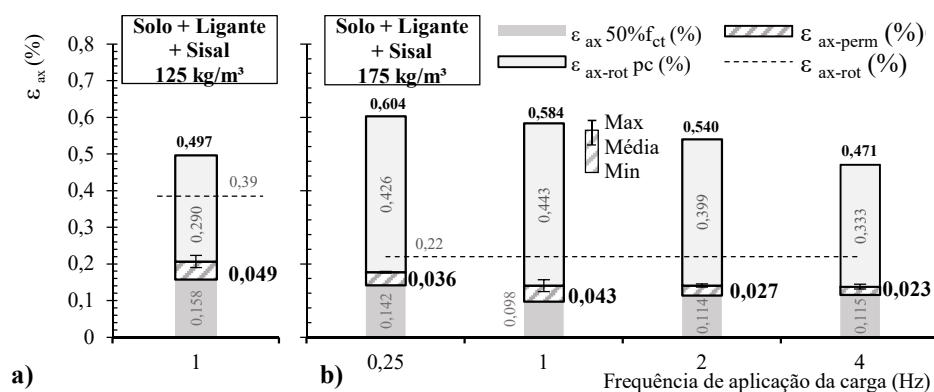


Figura 5.15 Extensão axial permanente média ($\epsilon_{ax-perm-med}$) “Solo+Ligante+Sisal” conforme a frequência de aplicação de carga (CIC), em relação a extensão de rotura. a) 125kg/m³ b) 175kg/m³

Os resultado da Figura 5.15 indicam que para a menor dosagem de ligante há uma queda na extensão de rotura final, enquanto no material com maior dosagem há um aumento na extensão de rotura de até 100%. Assim, o carregamento cíclico é vantajoso em termos de resistência, permitindo acomodar maiores deformações, devido ao facto de as fibras serem mobilizadas antes da rotura.

5.5 Solo + Ligante + Polipropileno

O Quadro 5.8 indica os valores encontrados para a mistura do solo com estabilização química de ligante cimentício e reforçado com fibras de polipropileno.

Quadro 5.8 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios STS de referência para mistura “Solo+Ligante+Polipropileno”

Código	Dosagem de ligante (kg/m ³)	Tempo de cura (dias)	fct-max (kPa)	fct-med (kPa)	ε ax-rot (%)	ε ax-rot-med (%)	wf (%)	wf-med (%)
STS_PF+C_3_175	175	3	475,89	473,60	0,82	0,80	11,05	10,92
			471,32	(0,48 %)	0,78	(2,49 %)	10,78	(1,17 %)
STS_PF+C_7_175		7	507,55	540,17	0,29	0,33	11,02	11,06
			540,79	(6,43 %)	0,37	(12,85 %)	11,09	(0,27 %)
STS_PF+C_14_175		14	581,07	587,85	0,74	0,63	10,75	10,72
			594,63	(1,15 %)	0,52	(14,21 %)	10,69	(0,28 %)
STS_PF+C_28_175		28	608,77	608,65	0,81	0,77	10,61	10,70
			608,53	(0,02 %)	0,73	(5,15 %)	10,79	(0,84 %)

(...) Desvio percentual

Os teores de água não sofrem grande variação ao longo do tempo de cura dos provetes e são da mesma ordem de grandeza dos valores obtidos para o “Solo + Ligante” (Quadro 5.2) e “Solo + Ligante + Sisal” (Quadro 5.5). Estes resultados atestam que as fibras sintéticas não absorvem água. Novamente o ganho de resistência acompanhou o tempo de cura, fruto do desenvolvimento das ligações cimentícias, responsáveis pela construção de uma matriz sólida, resistente e rígida. Observa-se que a resistência à tração é maior na mistura “Solo + Ligante + Polipropileno”, qualquer que seja o tempo de cura, do que a obtida nos provetes “Solo + Ligante” (Quadro 5.2) e “Solo + Ligante + Sisal” (Quadro 5.5).

De facto, as fibras de Polipropileno, por serem de menor diâmetro que as de Sisal, têm menor ação de impedirem o estabelecimento de algumas ligações cimentícias, logo, permitem a construção de uma matriz mais resistente. As maiores resistências obtidas com as fibras de Polipropileno sugerem que estas têm a capacidade de melhor distribuição de tensões dentro do material compósito, e, por existirem em grande número, asseguram a construção de um elemento mais homogêneo.

É possível compreender a existência de uma ligação forte entre a matriz e as fibras desde os 3 dias de cura dos provetes, uma vez que a resistência máxima obtida aos 28 dias cresceu $\approx 27\%$

em relação aos 3 dias. A resistência e o comportamento do material compósito ao longo do tempo de cura é indicada nas Figuras 5.16 e 5.17.

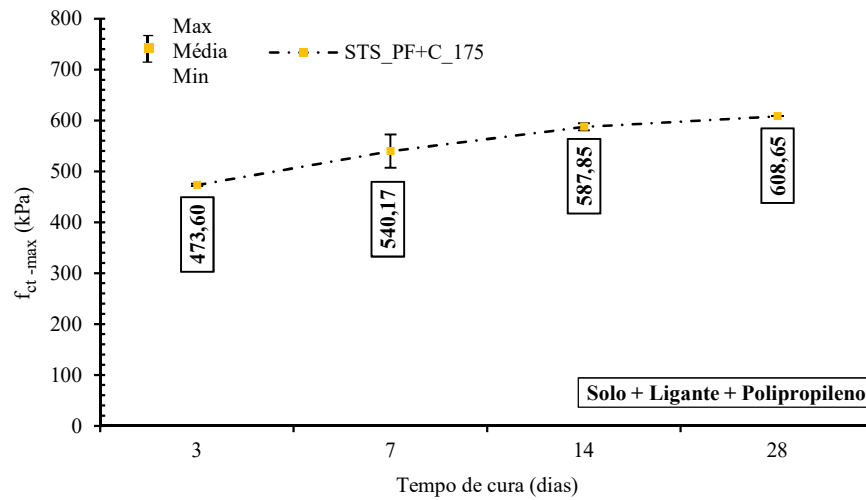


Figura 5.16 Ensaio STS monotônico de referência - Evolução da resistência máxima à tração (f_{ct-max}) dos provetes “Solo+Polipropileno+Ligante”, em relação ao tempo de cura.

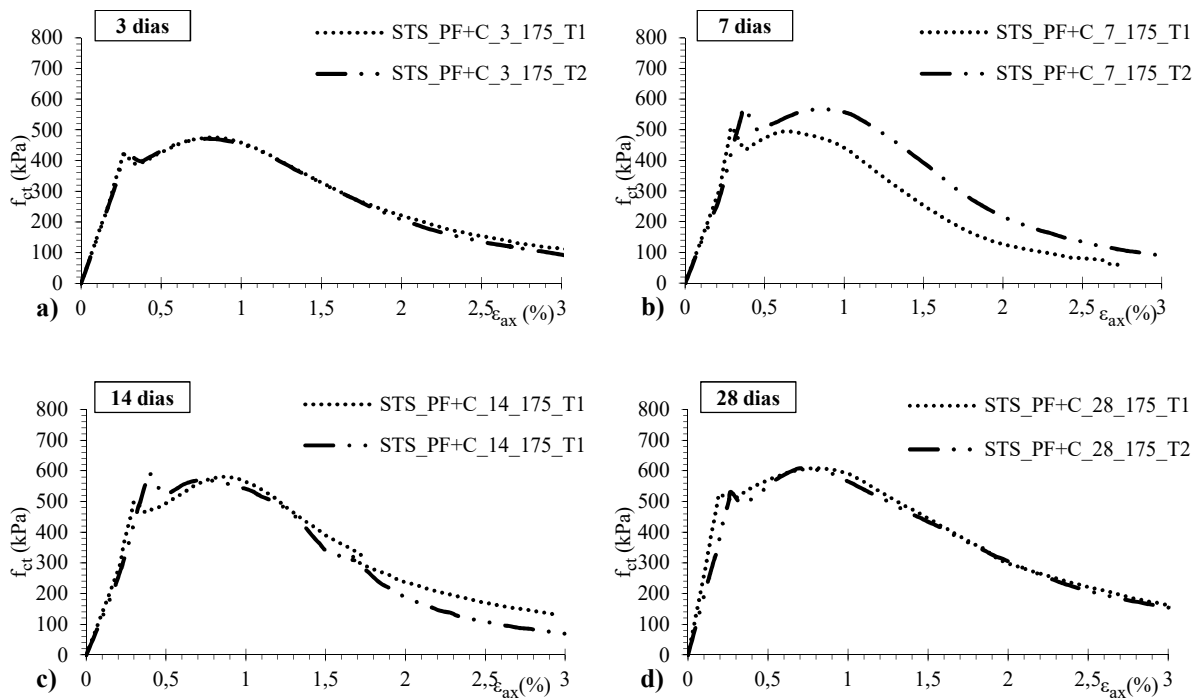


Figura 5.17 Curvas tensão-extensão “Solo+Ligante+Polipropileno” conforme o tempo de cura, dos ensaios de referência (STS): a) 3 dias; b) 7 dias; c) 14 dias; d) 28 dias.

Da análise das curvas tensão-extensão (Figura 5.17) constata-se que a presença das fibras altera o comportamento do material de frágil (Figura 5.3) para predominantemente dúctil, caracterizado por um patamar de resistência e pela existência de resistência residual. Este comportamento dúctil é mais evidente para as fibras de Polipropileno do que nas de Sisal (Figura 5.10). Ou seja, a Figura 5.17 demonstra que as fibras de polipropileno têm influência

no material antes de se atingir a rotura, causando um aumento de sua resistência máxima, assim como estabelecido para as fibras naturais, ocorre um efeito de transferência de tensões para as fibras, o que leva o material a ser governado pela resistência à tração das fibras, adquirindo um comportamento dúctil, causando uma queda gradual da tensão com o aumento da deformação.

Os ensaios cíclicos foram executados conforme o Quadro 5.9.

Quadro 5.9 – Parâmetros utilizados na realização dos ensaios cíclicos (CIC) “Solo+Ligante+Polipropileno”

Código	Dosagem de ligante (kg/m ³)	Frequência de aplicação da carga (Hz)	f _{ct-med} (kPa)	50% f _{ct-med} (kPa)	Amplitude: 7,5% f _{ct-med} (kPa)
CIC_PF+C_175_0,25	175	0,25	608,65	304,33	22,82
CIC_PF+C_175_1		1			
CIC_PF+C_175_2		2			
CIC_PF+C_175_4		4			

Abaixo, nas Figura 5.18 e 5.19, são exibidos os gráficos que demonstram a evolução da extensão axial permanente em relação ao número de ciclos do ensaio, e ao tempo de ensaio, considerando as diferentes frequências de carga aplicada.

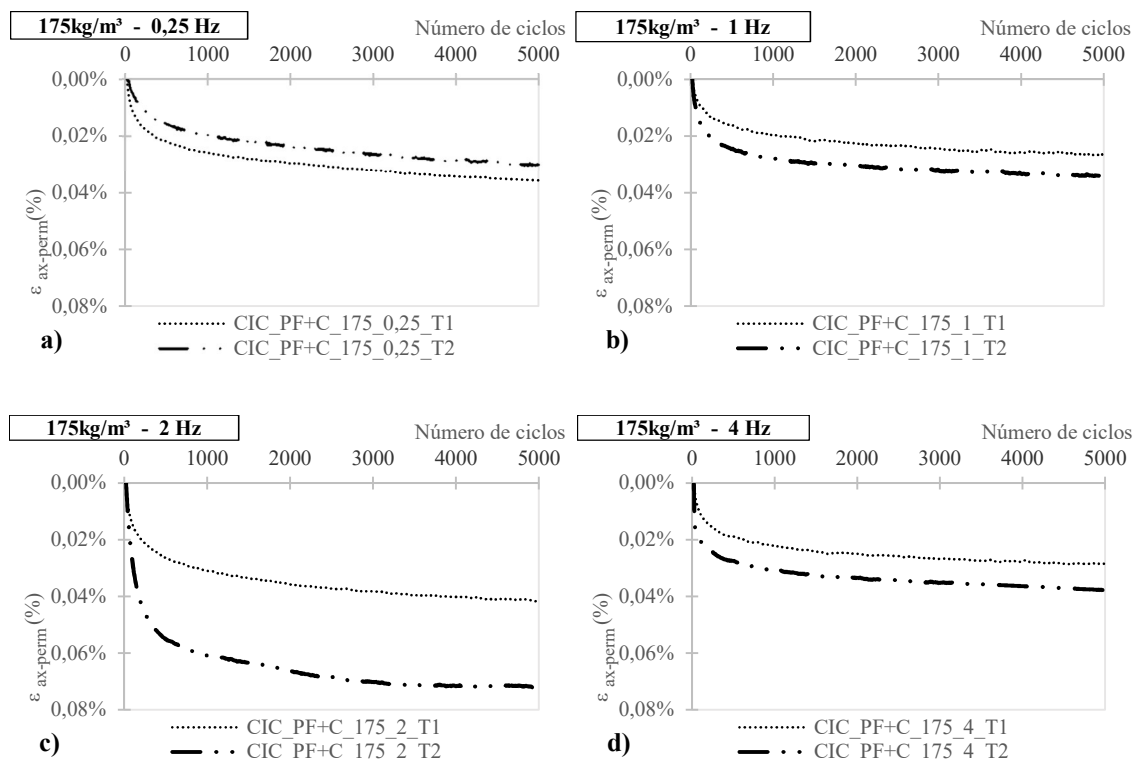


Figura 5.18 Extensão axial permanente ($\epsilon_{ax-perm}$) “Solo+Ligante+Polipropileno” conforme a frequência de aplicação de carga dos ensaios cíclicos (CIC). Dosagem de ligante 175kg/m³ a) 0,25 Hz; b) 1 Hz; c) 2 Hz; d) 4 Hz.

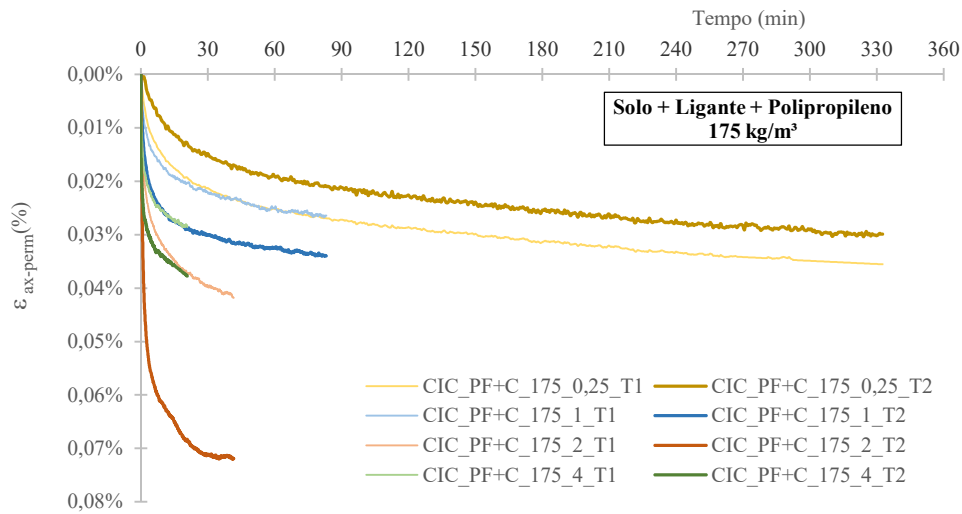


Figura 5.19 Extensão axial permanente ($\epsilon_{ax-perm}$) “Solo+Ligante+Polipropileno” com o tempo para diferentes frequências de aplicação de carga dos ensaios cíclicos (CIC)

Em todos os provetes ensaiados as deformações axiais tiveram sua maior evolução nos primeiros 500 ciclos, observando-se um comportamento semelhante ao outros materiais compósitos. Importante citar que a deformação axial permanente é sensivelmente semelhante para as frequências de 0,25 Hz, 1 e 4 Hz, sugerindo que a deformação depende do número de ciclos e não do tempo de aplicação da carga cíclica. Já quanto à frequências de 2 Hz, as deformações axiais permanentes parecem ser de maior magnitude, sugerindo que se possa estar próximo da frequência de vibração natural do material, tal como observado para o material “Solo + Ligante”.

Após o carregamento cíclico, os provetes seguiram para a fase de corte em ensaios de compressão diametral monotônicos, designados STS pós-ciclo (STSpC), como forma a comparar com os resultados encontrados nos ensaios monotônicos de referência (STS). No Quadro 5.10 e na Figura 5.20 são apresentados os resultados.

Quadro 5.10 – Resumo dos resultados obtidos para ensaios STSpC “Solo+Ligante+Polipropileno” (28 dias de cura)

Código	Dosagem de ligante (kg/m ³)	Frequência de aplicação da carga (Hz)	fct-max (kPa)	fct-med (kPa)	ϵ_{ax-rot} (%)	$\epsilon_{ax-rot-med}$ (%)	Wf (%)	Wf-med (%)
STSpC_PF+C_175_0,25	175	0,25	685,69	698,55	0,366	0,714	8,30	8,24
			711,42	(1,81%)	1,063	(32,77%)	8,18	(0,73%)
STSpC_PF+C_175_1		1	623,18	647,05	0,914	0,845	8,75	8,88
			670,92	(3,56%)	0,775	(8,95%)	9,00	(1,33%)
STSpC_PF+C_175_2		2	601,24	617,99	0,863	0,842	9,97	9,61
			607,31	(0,50%)	0,821	(2,49%)	9,25	(3,75%)
STSpC_PF+C_175_4		4	633,99	629,55	0,763	0,822	10,20	9,92
			625,10	(0,71%)	0,881	(6,74%)	9,64	(2,91%)
(...) Desvio percentual								

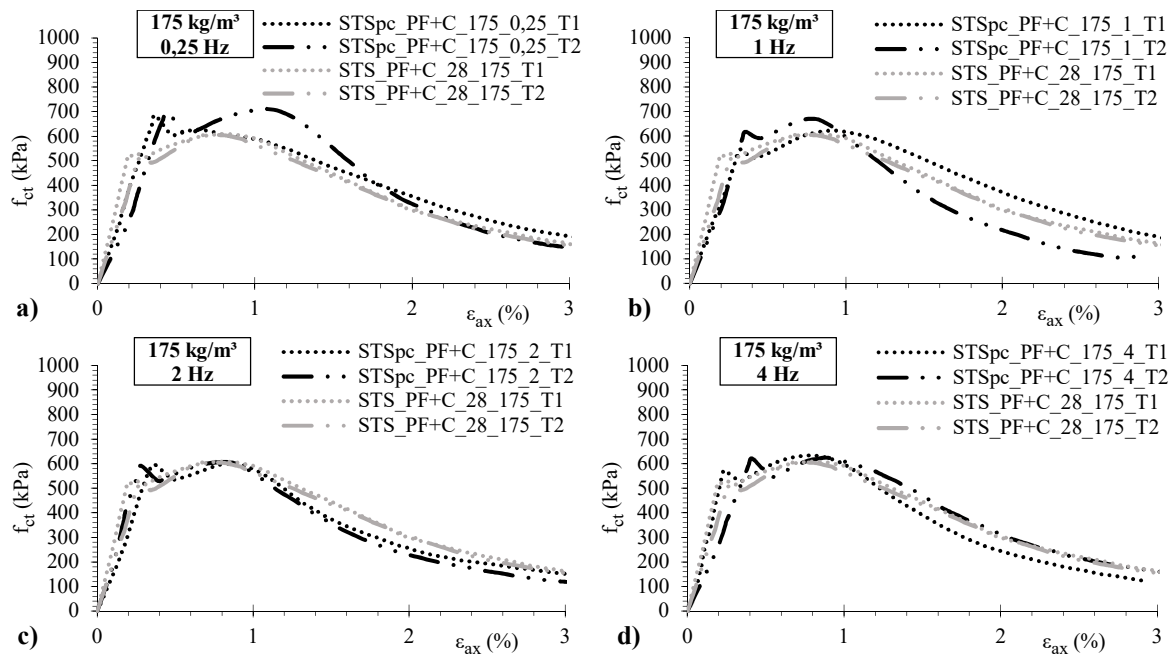


Figura 5.20 Curvas tensão-extensão “Solo+Ligante+Polipropileno” conforme a frequência de aplicação de carga dos ensaios pós-cíclico (STSpC). Dosagem de ligante 175kg/m³ a) 0,25 Hz; b) 1 Hz; c) 2 Hz; d) 4 Hz

A queda do teor em água dos provetes é relevante. Isso se explica devido os caminhos preferenciais criados pelas fibras, uma vez que elas não absorvem a água, facilitando a saída de água através dos vazios do provete, tal como descrito na secção 2.32, ocorrida durante o ensaio cíclico. Os resultados registrados no Quadro 5.10 estão em concordância, uma vez que os menores teores em água são obtidos para os ensaios realizados com menor frequência, logo, maior tempo de duração dos ensaios. Analisando os resultados pós-cíclico, as resistências e extensões de rotura não tiveram relevante alteração após os ciclos, evidenciado nas Figura 5.20, 5.21 e 5.22.

Quando se comparam os resultados dos ensaios de compressão diametral antes (STS) e após a fase cíclica (STSpC), verifica-se que todos ensaios sujeitos a carregamento cíclico obtiveram ganho de resistência à tração de até $\approx 15\%$ face à referência (STS) (Figura 5.21). Consta-se que o menor ganho de resistência foi obtido para os provetes com frequência de 2 Hz, os quais foram os materiais que tiveram maiores deformações durante a fase cíclica, logo, maior degradação.

As deformações ocorridas na fase cíclica permitiram mobilizar mais cedo a resistência das fibras, contribuindo desta forma para o ganho de resistência. Este facto é bem ilustrado na Figura 5.22, onde se representa a totalidade de deformação axial sofrida pelos provetes.

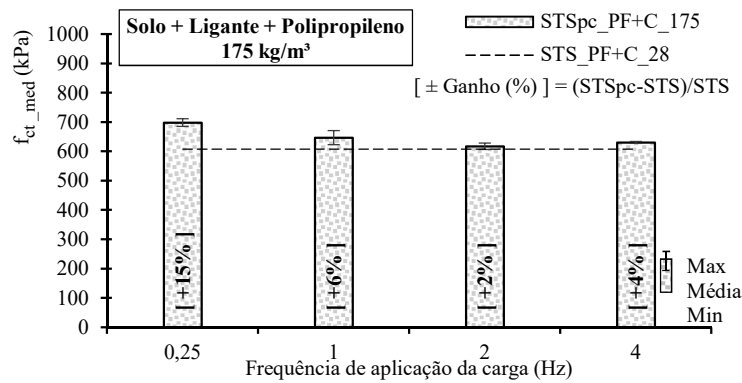


Figura 5.21 Resistência à tração média (f_{ct-med}) “Solo+Ligante+Polipropileno” conforme a frequência de aplicação de carga dos ensaios pós-ciclo (STSpC). Dosagem de ligante 175kg/m³.

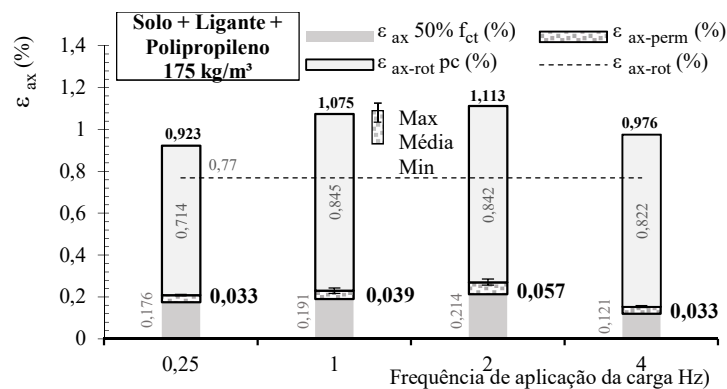


Figura 5.22 Extensão axial permanente média ($\epsilon_{ax-perm-med}$) “Solo+Ligante+Polipropileno” conforme a frequência de aplicação de carga (CIC), em relação a extensão de rotura.

É possível indicar que a frequência de carga na fase cíclica tem importância nas deformações permanentes do material compósito, com implicações na quebra das ligações cimentícias (degradação) e consequente mobilização das fibras, com mudança para comportamento dúctil associado a um ligeiro ganho de resistência.

5.6 Comparativo

Esta secção irá abordar as comparações entre os materiais compósitos (“Solo + Ligante”, “Solo + Ligante + Sisal” e “Solo + Ligante + Polipropileno”), descrevendo a diferença entre os mesmos.

5.6.1 Influência da dosagem de ligante

Os ensaios realizados com variação da dosagem de ligante dizem respeito aos materiais “Solo + Ligante” e “Solo + Ligante + Sisal”. Para melhor representação do efeito da dosagem de ligante, a Figura 5.23 demonstra as curvas de tensão-extensão obtidas nos ensaios monotônicos de referência.

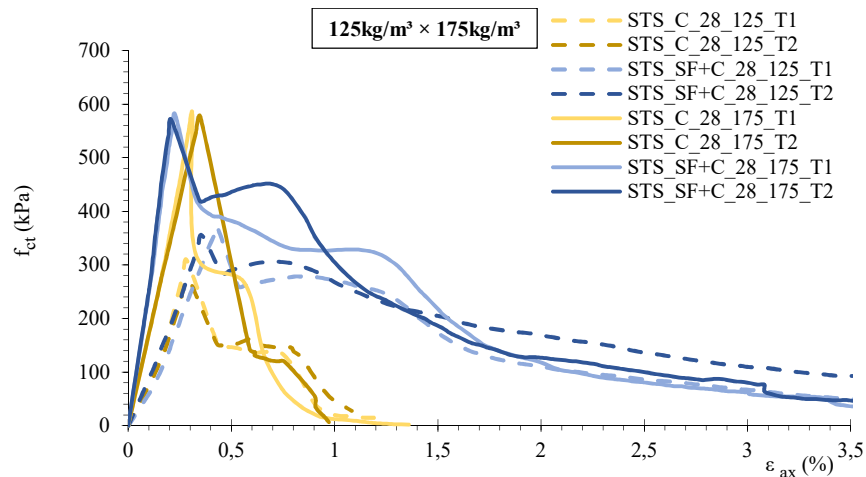


Figura 5.23 Comparação das curvas tensão-extensão com diferente dosagem de ligante (STS)

Nos ensaios monotónicos percebemos que, nos provetes com maior dosagem de ligante, as fibras não acrescentam valor relevante de resistência máxima ao compósito em comparação aos provetes sem fibras. A presença das fibras altera o comportamento do material pós-rotura, dotando-a de resistência residual devido à transferência de tensões da matriz para as fibras. Este facto é diferente para os provetes com menor dosagem de ligante, os quais aumentam a resistência máxima do provete em 24% quando possuem as fibras, quando se comparado aos provetes somente com ligante. Este efeito é explicado pelo facto de os provetes com menor dosagem de ligante possuírem uma matriz menor rígida, logo, mais deformável, permitindo mobilizar a resistência das fibras antes da rotura. Este compósito ainda demonstra possuir uma resistência residual igual aos compósitos mais rígidos, indicando que o comportamento pós rotura do elemento é, maioritariamente, governado pela ação das fibras. Para a análise da deformação axial permanente destes materiais é utilizada a Figura 5.24, que relaciona o número de ciclos com a extensão axial permanente.

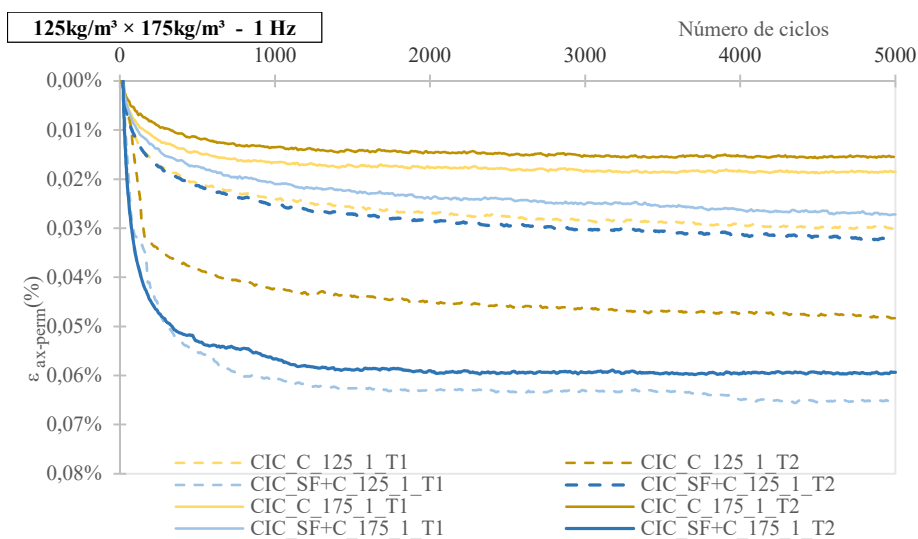


Figura 5.24 Comparação das curvas de extensão axial permanente ($\epsilon_{ax-perm}$), com diferente dosagem de ligante, durante ensaio cíclico de 1 Hz

No compósito com menor teor de ligante, apesar da oscilação presente nos provetes, é notável a maior extensão axial permanente, sempre maior nos provetes com a inclusão das fibras. Esta constatação parece ocorrer devido à provável inibição das ligações cimentícias pela inserção das fibras. Quando se elevou o teor de ligante, as fibras continuaram a não influenciar positivamente o material compósito. Percebe-se que a elevada rigidez proveniente da cimentação do elemento, reduz as extensões permanentes, e a presença das fibras naturais de Sisal não contribuem de forma contundente no controle das extensões durante as situações de carregamento cíclico. A comparação da resistência à tração após carregamento cíclico (STSpC) está contida na Figura 5.25.

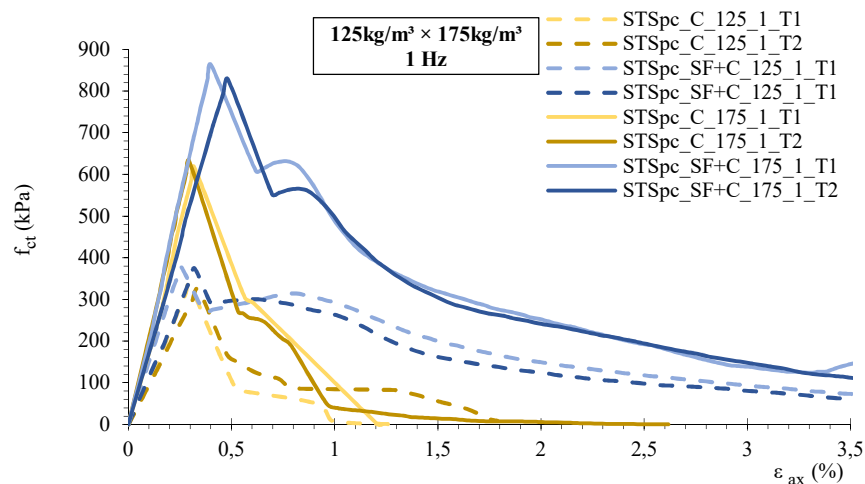


Figura 5.25 Comparação das curvas tensão-extensão com diferente dosagem de ligante, após ensaio cíclico (STSpC)

Nos ensaios monotônicos pós-ciclo, para o maior dosagem de ligante, as fibras naturais elevam a resistência, ao contrário do observado nos ensaios de referência, não sendo notável para a menor dosagem de ligante. Este efeito parece ser consequência da deformação ocorrida nos provetes durante a fase cíclica, permitindo mobilizar a resistência das fibras antes da rotura por pico. Um outro efeito associado à presença das fibras é o aumento da resistência residual, efeito que é tanto maior quanto maior a dosagem de ligante. Logo, após o carregamento cíclico, quando se possui maior cimentação, a inclusão das fibras contribuem na melhoria das características de resistência de pico e residual dos provetes.

5.6.2 Influência do tipo de fibra

A seguir, são apresentados gráficos de tensão-extensão monotônicos e pós-ciclo, e a evolução da extensão axial permanente, todos para a dosagem de 175kg/m³. Será analisado o diferente comportamento das fibras, constatando a diferença das curvas e dos resultados obtidos, conforme a Figura 5.26.

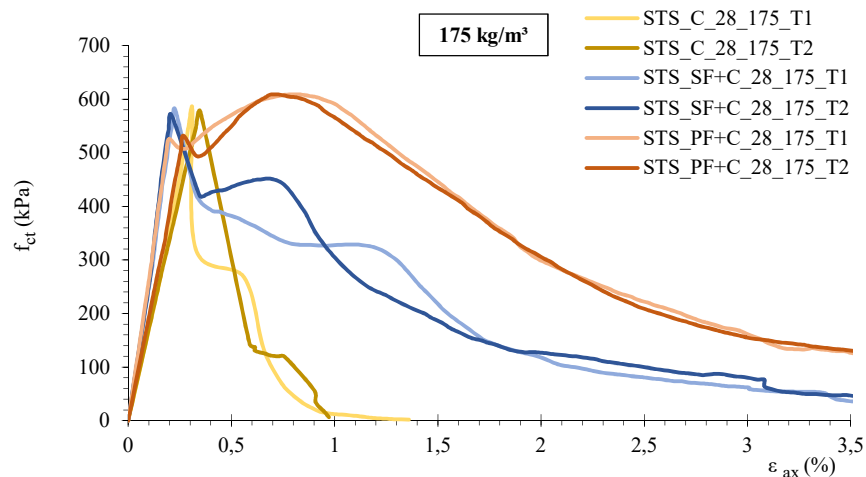


Figura 5.26 Comparação das curvas tensão-extensão dos ensaios de referência monotônicos (175 kg/m³)

Na Figura 5.26, referente aos ensaios de referência monotônicos, nota-se a influência das fibras no comportamento do material compósito. A resistência máxima dos provetes somente com ligante, e ligante com fibras de sisal são quase as mesmas, sendo governadas pela ação da matriz cimentícia. Enquanto no material compósito com ligante e fibras de polipropileno a resistência máxima é obtida para um maior nível de deformação devido à ação das fibras. É perceptível que com inserção de fibras o material passa a exibir resistência residual, a qual é maior nas fibras de polipropileno. Este efeito pode ser explicado pelo menor diâmetro das fibras de Polipropileno (impedindo o estabelecimento de um maior número de ligações cimentícias), pela existência em maior número destas fibras (permitindo uma matriz mais homogênea), e pela sua menor rigidez (permitindo a sua mobilização para maiores níveis de deformação). Nota-se que a inserção de qualquer que seja o tipo de fibras, naturais ou sintéticas, proporciona uma mudança maior no comportamento do material, de frágil para dúctil. Abaixo, nas Figuras 5.27 até 5.30, é expresso as comparações entre as diferentes frequências aplicadas nos provetes, com dosagem de 175kg/m³, sem fibras, com fibras naturais e com sintéticas.

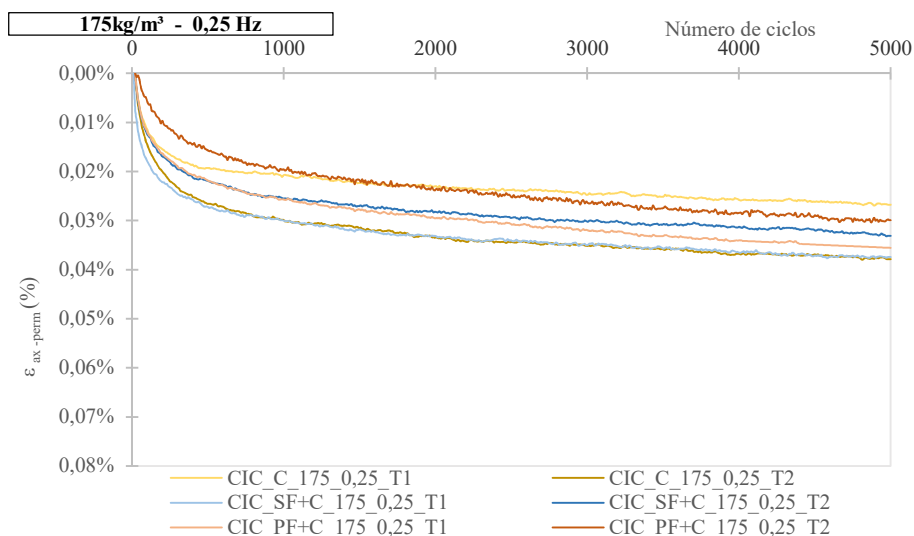


Figura 5.27 Comparação das curvas de extensão axial permanente ($\epsilon_{ax-perm}$) durante ensaio cíclico de 0,25 Hz

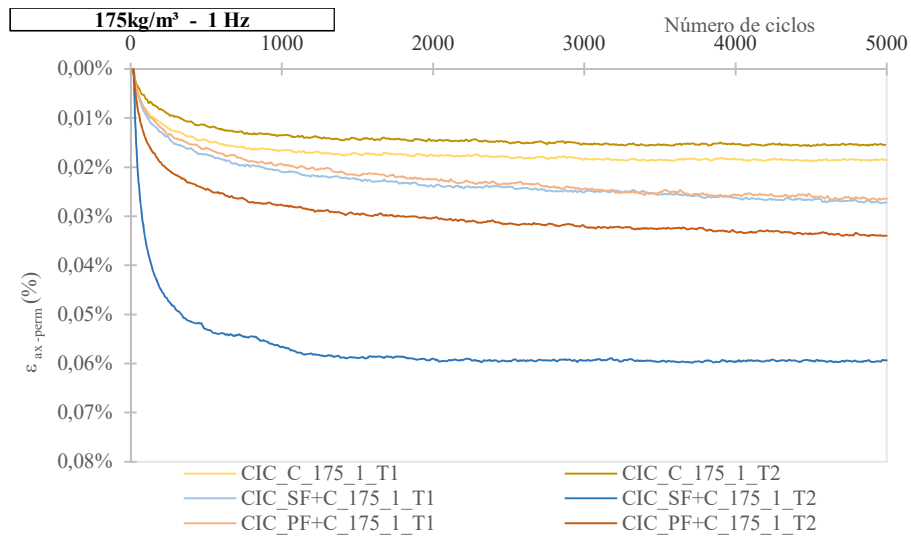


Figura 5.28 Comparação das curvas de extensão axial permanente ($\epsilon_{ax-perm}$) durante ensaio cíclico de 1 Hz

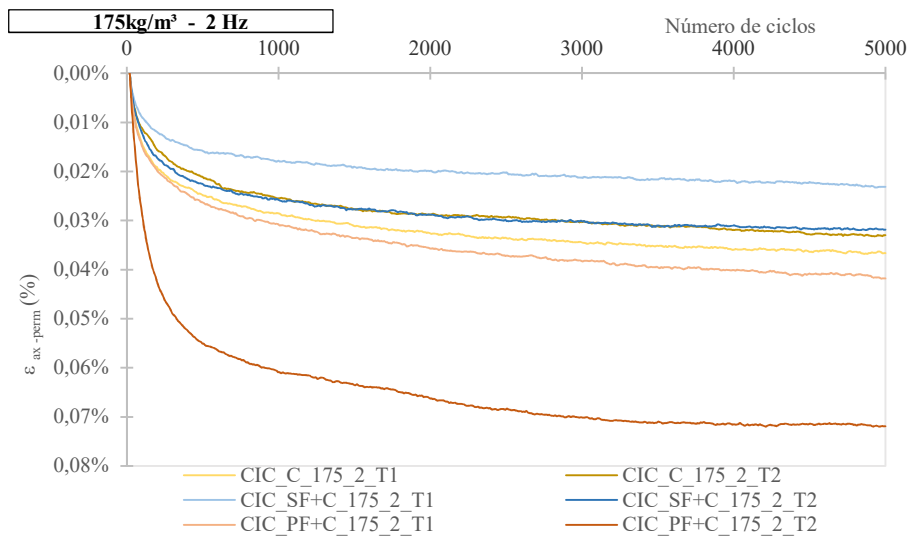


Figura 5.29 Comparação das curvas de extensão axial permanente ($\epsilon_{ax-perm}$) durante ensaio cíclico de 2 Hz

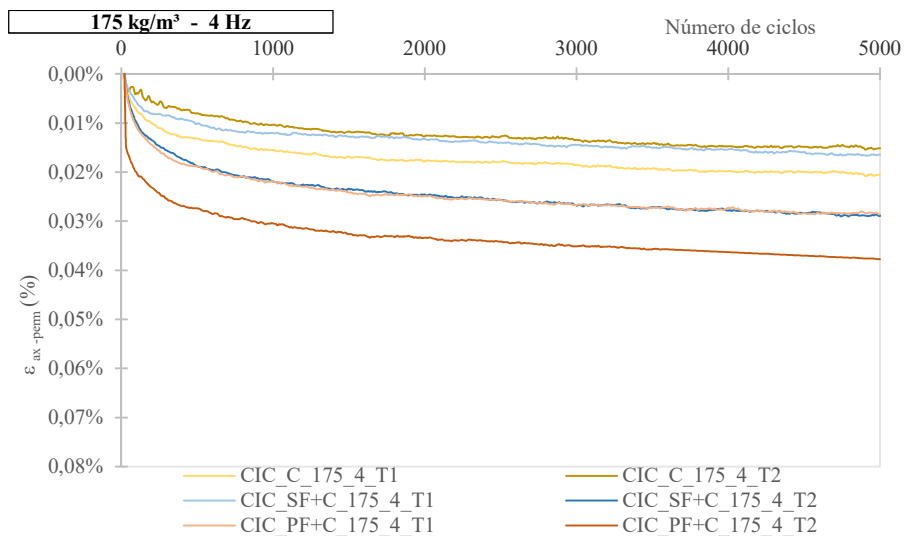


Figura 5.30 Comparação das curvas de extensão axial permanente ($\epsilon_{ax-perm}$) durante ensaio cíclico de 4 Hz

Em termos globais, e numa primeira análise, o carregamento cíclico parece induzir níveis de deformações permanentes muito semelhantes (0,02 a 0,03%), com ligeiras variações consoante a frequência aplicada e o tipo de fibra. Na frequência de 1 Hz, a presença das fibras parece induzir maior deformação, tal como para os ensaios com frequência de 4 Hz. Em qualquer destes casos, as maiores deformações ocorrem nas fibras de Polipropileno, o que pode ser explicado pelo facto de serem fibras menos rígidas. Outro aspecto que pode justificar este comportamento é o facto de as fibras de Sisal terem maior rugosidade e serem capazes de estabelecer uma melhor ligação com a matriz cimentícia. Na Figura 5.31 até a Figura 5.34, são apresentados os gráficos de resistência consoante a frequência de carga aplicada nos ensaios cíclicos.

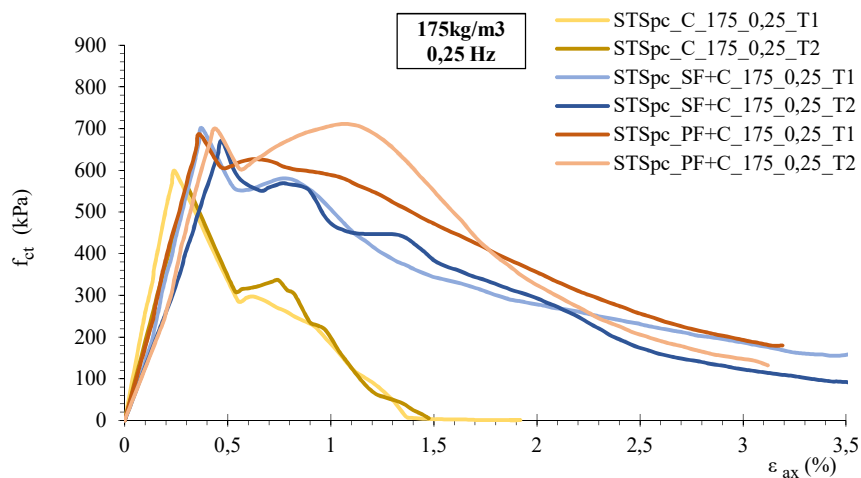


Figura 5.31 Comparação das curvas tensão-extensão após ensaio cíclico de 0,25 Hz

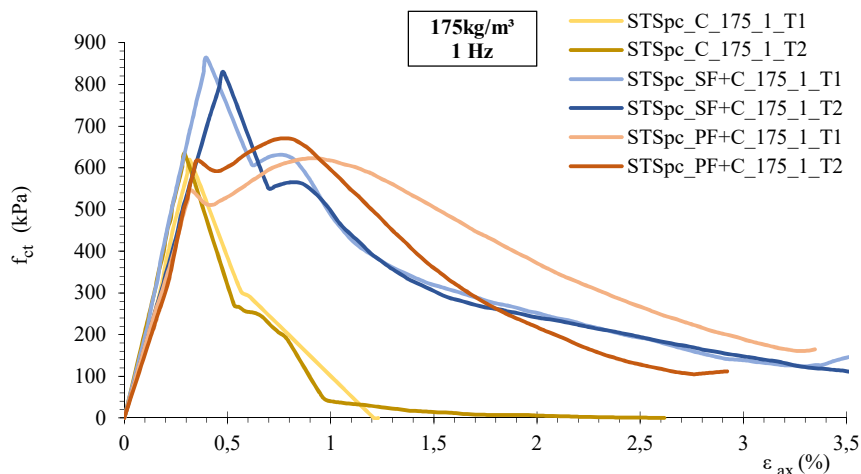


Figura 5.32 Comparação das curvas tensão-extensão após ensaio cíclico de 1 Hz

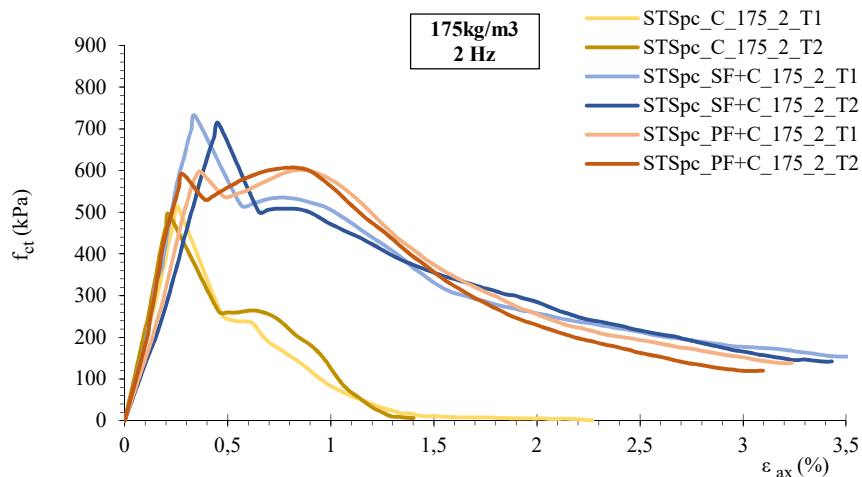


Figura 5.33 Comparação das curvas tensão-extensão após ensaio cíclico de 2 Hz

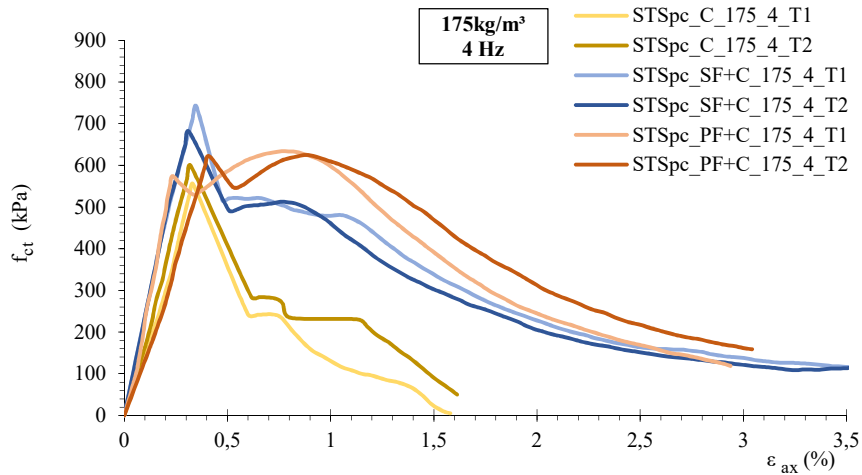


Figura 5.34 Comparação das curvas tensão-extensão após ensaio cíclico de 4 Hz

Os ensaios monotônicos pós-ciclo confirmaram que a frequência de aplicação de carga, a presença, e o tipo de fibra tem forte influência na resistência e no comportamento dos materiais compósitos. Em termos globais, constata-se que as fibras de Polipropileno conferem maior ductilidade ao material, caracterizado por um “patamar” de resistência máxima e pela existência de resistência residual. Também se observa que a inserção de fibras, sejam naturais ou sintéticas, confere resistência residual aos materiais, havendo uma gradual convergência da resistência com o aumento do nível de deformação, independentemente da frequência aplicada.

Em termos de resistência máxima à tração (Figura 5.35), as fibras naturais de Sisal permitem obter maiores resistências, o que pode ser explicado pela maior rigidez e resistência destas fibras quando comparadas com as fibras de Polipropileno. Em todos casos, e tal como já referido nas secções anteriores, o aumento de resistência proporcionado pela inserção das fibras nos ensaios STS pós-ciclos face aos ensaios STS de referência, é explicado pelas deformações ocorridas durante a fase cíclica, as quais permitem a mobilização da resistência das fibras mais cedo, antes da rotura.

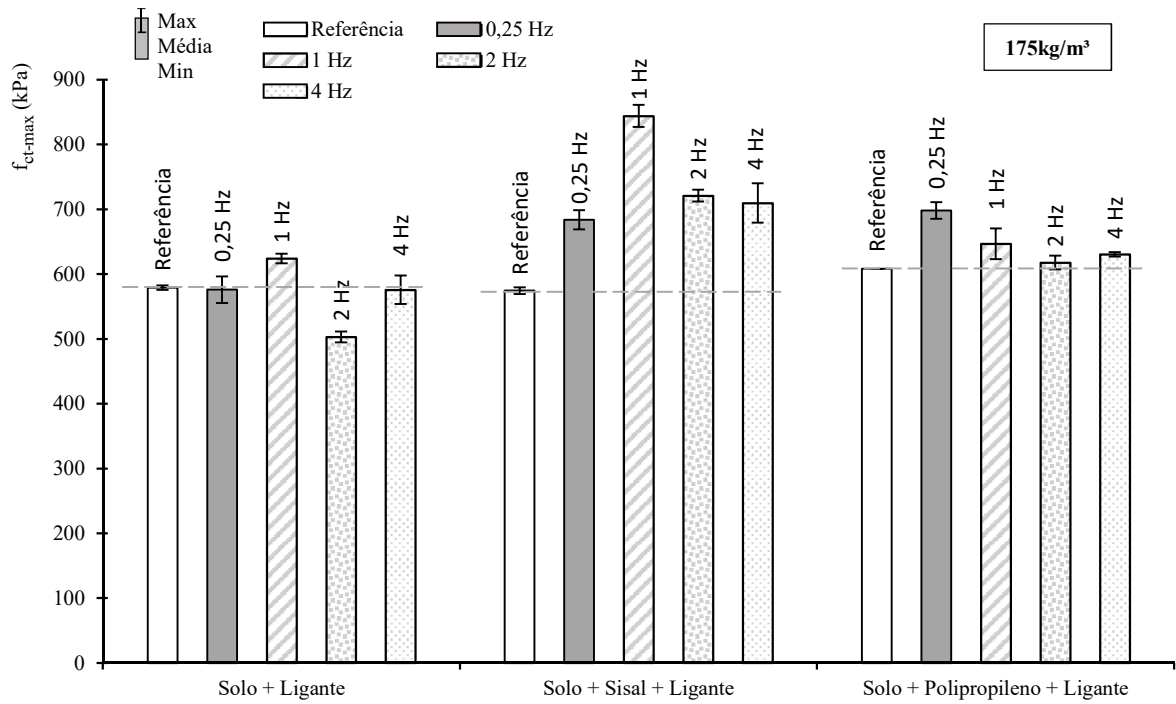


Figura 5.35 Valores de resistência máxima à tração conforme frequência aplicada

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES FINAIS

Os materiais compósitos apresentados neste estudo, baseados em materiais sintéticos (fibras de polipropileno) e matérias-primas abundantes na natureza (solo natural e fibras de sisal), poderão ser usados na composição de elementos mais sustentáveis, que reduzam a utilização de cimento.

No desenvolvimento da presente dissertação, buscou-se estipular as diferenças existentes entre as características mecânicas dos diferentes materiais compósitos em estudo: “Solo + Ligante”, “Solo + Ligante + Sisal” e “Solo + Ligante + Polipropileno”.

O estudo baseou-se em ensaios de compressão diametral monotônicos (STS) e ensaios de compressão diametral com carregamento cíclico (CIC/STSp). Os ensaios serviram para analisar a influência do tipo de fibra no comportamento mecânico das misturas, bem como verificar o comportamento das fibras naturais quando em situações com diferente dosagem de ligante. Este estudo contribui para uma compreensão mais ampla do comportamento e limites dos materiais utilizados, desenvolvendo informações que possibilitam a sua aplicação de forma satisfatória. Os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais permitem determinar as seguintes conclusões:

- A inserção de fibras no solo possibilita uma ligação entre os elementos internos do material compósito, ocasionando uma estrutura emaranhada entre as fibras e a areia.
- No solo cimentado, as fibras contribuem na redistribuição das tensões, através do efeito “ponte”. A existência do ligante tem grande importância na adesão das fibras com a estrutura do provete. Se o material possuir elevado teor de cimento, ou seja, elevada rigidez, sua resistência será governada pela matriz cimentícia, e as fibras não irão contribuir para a resistência máxima. Se o teor de cimento dos provetes decresce, as fibras começam a ter maior influência na resistência máxima.
- Foi observado um ganho de resistência máxima à tração ao longo do tempo de cura, o qual é explicado pelo desenvolvimento no tempo das reações de hidratação do ligante.

- Dos 3 materiais compósitos em estudo, é no material com fibras de Polipropileno que se obtém as maiores resistências máximas à tração, qualquer que seja o tempo de cura. Este resultado deve-se ao menor diâmetro destas fibras e ao facto de existirem em muito maior número, o que contribui para uma redistribuição mais homogênea das tensões.
- Todos os compósitos atingiram valores próximos de resistência máxima à tração, aos 28 dias, após o carregamento monotónico, entre 570 à 600 kPa.
- Ambos os compósitos com fibras evidenciaram uma mudança no comportamento em relação ao elemento somente com ligante. É perceptível que após a resistência de pico, as fibras começam a ser mobilizadas, contribuindo para o aumento de resistência (fibras de Polipropileno) e para a existência de resistência residual.
- A inserção de fibras confere ductilidade ao comportamento dos materiais compósitos, sendo este efeito de maior expressão nas fibras de polipropileno, dado serem menos rígidas. Este efeito é ainda mais visível no comportamento pós ensaio cíclico, havendo uma maior mobilização das fibras de Polipropileno devido às deformações ocorridas na fase cíclica.
- Durante o carregamento cíclico, a extensão axial permanente cresce significativamente nos primeiros 500 ciclos, evoluindo gradualmente. No material sem adição de fibras, as deformações são de maior magnitude para a frequência de 2 Hz, sugerindo estar-se próximo da frequência de vibração natural do material.
- A presença das fibras contribui para o aumento da deformação axial permanente durante o carregamento cíclico, o que se deve ao facto das fibras impedirem o estabelecimento de algumas ligações cimentícias, logo, construindo uma matriz mais deformável.
- A evolução das deformações axiais permanentes com o tempo segue evolução similar em todos casos, sugerindo que é o número de ciclos aplicado na fase de carregamento cíclico que controla a resposta, e não a frequência ou o tempo de aplicação do carregamento.
- As fibras de Polipropileno conferem maior ductilidade ao material, ao passo que as fibras de Sisal permitem obter maiores resistências (máxima e residual) à tração após a fase cíclica, devido à sua maior rigidez e resistência.

É possível assinalar a aplicação destes materiais como forma a reduzir a utilização de cimento, obtendo materiais de menor impacto ambiental, que poderão ser usados como alternativa aos métodos convencionais de estabilização e reforço de solos, contribuindo para uma melhor resposta mecânica do material sob ações estáticas e dinâmicas.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento deste estudo, diversas possibilidades surgiram, a medida que o entendimento da interação dos elementos aumentava. Contudo, estas possibilidades foram deixadas de lado em detrimento ao escopo inicial da pesquisa. Assim, é possível elaborar sugestões para trabalhos futuros, visando acrescentar o conhecimento sobre a temática analisada nesta dissertação:

- Estudar, ao nível da microestrutura, a interação fibra-matriz, observando a diferença dessa relação em fibras naturais e sintéticas.
- Estudar os efeitos causados em obras reais da utilização de misturas de cimento e fibras. Avaliar as dificuldades na preparação em grande escala, além de criar uma correlação entre os valores encontrados em laboratório.
- Estudar os efeitos com outros tipos de fibras naturais (cânhamo, coco) e fibras sintéticas (borracha), avaliando o impacto do tipo de fibra no comportamento tensão-extensão.
- Avaliar o efeito causado por outros comprimentos de fibras, bem como outras dosagens.
- Estudar influência do nível de tensão, e amplitude de carga, no comportamento tensão-extensão-resistência.
- Estudar a influência do número de ciclos do carregamento cíclico no comportamento dos materiais compósitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adaska, W. S. (1991). Soil Cement--A Material With Many Applications. *Concrete International*, 13, 49-52.
- Agopyan, V., & Savastano Jr., H. (1997). Uso de materiais alternativos a base de fibras vegetais na construção civil: experiência brasileira. *Seminário Iberoamericano de materiales fibrorreforzados*. Cali: Universidad del Valle.
- Araya-Letelier, G., Concha-Riedel, J., & Antico, F. (20 de Fevereiro de 2019). Experimental mechanical-damage assessment of earthen mixes reinforced with micro polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 198, pp. 762-776. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.261>
- ASTM - 2487. (1998). *Standard classification of soils for engineering purposes (Unified soil classification system)*.
- ASTM - BS 1377-3. (1990). *Methods of test for soils for civil engineering purposes*. ASTM.
- ASTM - D2166. (2000). *Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. Annual Book of ASTM Standards*. ASTM.
- Bentur, A., & Mindess, S. (2007). *Fibre Reinforced Cementitious Composites* (2ª ed.). Abingon, UK: Taylor & Francis.
- Bordoloi, S., Hussain, R., Garg, A., Sreedeeep, S., & Zhou , W.-H. (2017). Infiltration characteristics of natural fiber reinforced soil. *Transportation Geotechnics*, pp. 37-44. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.08.007>
- Cai, Y. S. (2006). Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil. *Engineering Geology*, 87(3-4), pp. 230-240. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.07.007>
- Cajada, J. C. (2017). *Estabilização Química de Diferentes Solos com Adição de Fibras de Polipropileno*. Universidade de Coimbra, Dissertação de Mestrado, Dep. de Engª Civil da FCTUC, Coimbra, Portugal.

- Carneiro, F. L. (1943). Um Novo Método para Determinação da Resistência à Tração dos Concretos. *Reunião Associação Brasileira de Normas Técnicas, Comunicação, 5*. Publ. Inst. Nac. Tecnol., Rio De Janeiro.
- Casagrande, M. D. (2001). *Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais*. 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/10183/3349>
- Catton, M. D. (1962). Soil-cement Technology – a Résumé. *Portland Cement Association – Research Department*.
- Chang, T., & Woods, R. D. (1992). Effect of particle contact bond on shear modulus. *Journal of the Geotechnical Engineering, 118*(8), 1216-1233.
- Chauhan, M. S., Mittal, S., & Mohanty, B. (2008). Performance evaluation of silty sand subgrade reinforced with fly ash and fibre. *Geotextiles and Geomembranes*, pp. 429-435. doi:10.1016/j.geotexmem.2008.02.001
- 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, N. C., Bassani, M. A., & Festugato, L. (2010). Effect of fiber-reinforcement on the strength of cemented soils. *Geotextiles and Geomembranes, 28*, pp. 344-351.
- 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), pp. 759-763.
- Consoli, N. C., Montardo, J. P., Prietto, P. D., & Pasa, G. S. (2002). Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 128*(6), 462-472.
- Consoli, N. C., Vendruscolo, M. A., Fonini, A., & Dalla Rosa, F. (2009). Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range. *Geotextiles and Geomembranes, 27*(3), pp. 196-203.
- Correia, A. A. (2011). *Aplicabilidade da técnica de deep mixing aos solos moles do Baixo Mondego*. Universidade de Coimbra, Tese de Mestrado, Dep. de Eng^a Civil da FCTUC, Coimbra, Portugal.

- Correia, A. A., Venda Oliveira, P. J., & Custodio, D. G. (2015). Effect of polypropylene fibres on the compressive and tensile strength of a soft soil, artificially stabilised with binders. *Geotextiles and Geomembranes*, 43, pp. 97-106. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2014.11.008>
- Costa, J. N. (2012). *Estabilização de solos por via química e biológica*. Universidade de Coimbra, Dissertação de Mestrado, Dep. de Eng^a 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.
- Cruz, M. d. (2004). *Novas tecnologias da aplicação de Solo-Cimento*. Universidade do Minho, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil.
- Danso, H., & Manu, D. (2020). Influence of coconut fibres and lime on the properties of soil-cement mortar. *Case Studies in Construction Materials*, 12. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00316>
- Davies, J., & Fendukly, L. (1994). Behaviour of soil-cement specimens in unconfined dynamic compression. *Journal of Materials Science*, 29(12), 3255–3260.
- Dupas, J.-M., & Pecker, A. (1979). Static and dynamic properties of sand-cement. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 105(3), 419-436.
- E196. (1966). *Solos - Análise granulométrica*. Lisboa, Portugal: LNEC.
- E197. (1966). *Solos - Ensaio de compactação*. Lisboa, Portugal: LNEC.
- E201. (1967). *Solo - Determinação do teor em matéria orgânica*. . Lisboa, Portugal: LNEC.
- Falorca, I. M. (2002). *Comportamento do solo microreforçado com fibras sintéticas de pequeno comprimento*. Universidade de Coimbra, Dissertação de Mestrado, Dep. de Eng^a Civil da FCTUC, Coimbra, Portugal.
- Festugato, L., Fourie, A., & Consoli, N. C. (2013). Cyclic shear response of fibre-reinforced cemented paste backfill. *Géotechnique Letters*, 3(1), pp. 5-12. doi:<https://doi.org/10.1680/geolett.12.00042>
- 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>

- Floss, M. F. (2012). *Parâmetros de controle da resistência e rigidez de solos granulares artificialmente cimentados*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, Brasil. Fonte: <http://hdl.handle.net/10183/75906>
- Foppa, D. (2005). *Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados*. 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/10183/7845>
- Freitag, D. R. (1986). Soil randomly reinforced with fibers. *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(8), 823-826.
- Ghavami, K., Tôledo Filho, R., & Barbosa, N. (1999). Behaviour of composite reinforced with natural fibres. *Cement & Concrete Composites*, 21(1), pp. 39-48.
- Hamidi, A., & Hooresfand, M. (2013). Effect of fiber reinforcement on triaxial shear behavior of cement treated sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 36, pp. 1-9.
- Hammond, A. (1981). Measurement of autogenous healing in stabilized soils. *X International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 3, pp. 671-676. Stockholm, Sweden.
- Heineck, K. S. (2002). *Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, Brasil. Fonte: <http://hdl.handle.net/10183/2653>
- 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>
- Hoare, D. J. (1979). Laboratory study of granular soils reinforced with randomly oriented discrete fibres. *International Conference on Soil Reinforcement*, 1, pp. 47-52. Paris.
- Hollaway, L. (1994). Polymers and polymer composites. Em J. M. Illston, *Construction Materials; their nature and behavior* (2 ed., pp. 321-358). London, U.K.: E & FN Spon.
- Ingles, O. G., & Metcalf, J. B. (1972). *Soil stabilization : principles and practice*. Sydney, Australia: Butterworth-Heinemann Ltd.
-

- Jiang, H., Cai, Y., & Liu, J. (2010). Engineering properties of soils reinforced by short discrete polypropylene fiber. *Journal of Material in Civil Engineering*, 22(12), 1315-1322.
- Kafodya, I., & Okonta, F. (2018). Effects of natural fiber inclusions and pre-compression on the strength properties of lime-fly ash stabilised soil. *Construction and Building Materials*, pp. 737-746. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.194>
- Kodicherla, S. P., Muktinuthalapati, J., & Revanna, N. (2018). Effect of Randomly Distributed Fibre Reinforcements on Engineering Properties of Beach Sand. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 12(1).
- Lehne, J., & Preston, F. (2018). *Making Concrete Change - Innovation in Low-carbon - Cement and Concrete*. Energy, Environment and Resources Department . Londres: The Royal Institute of International Affairs.
- Leroueil, S., & Vaughan, P. R. (1990). The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks. *Géotechnique*, 40(3), 467-488. doi:<https://doi.org/10.1680/geot.1990.40.3.467>
- Maher, M. H., & Gray, D. (1990). Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(11), 1661-1677.
- Maher, M. H., & Woods, R. D. (1990). Dynamic response of sand reinforced with randomly distributed fibers. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(7), 1116-1131.
- Maher, M., & Ho, Y. (1994). Mechanical properties of fiber soil composite. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(8), 1381-1393.
- Martins, A. P. (2014). *Desenvolvimento, caracterização mecânica e durabilidade de compósitos solo-cimento autoadensáveis reforçados com fibras de sisal*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese de PhD, COPPE/Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, Brasil.
- McGown, A., Andrawes, K. Z., & Al-Hasani, M. M. (1978). Effect of inclusion properties on the behavior of sand. *Geotechnique*, 28(3), 327-346.
- Melo Filho, J. (2012). *Durabilidade Química e Térmica e Comportamento Mecânico de Compósitos de Alto Desempenho Reforçados com Fibras de Sisal*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese de D.Sc., COPPE, Rio de Janeiro, Brasil.
- Methacanon, P., Weerawatsophon, U., Sumransin, N., Praharn, C., & Bergado, D. T. (2010). Properties and potential application of the selected natural fibers as limited life geotextiles. *Carbohydrate Polymers*, 82(4), pp. 1090-1096.

- Montardo, J. P. (1999). *Comportamento Mecânico de Compósitos Solo-Cimento-Fibra: Estudo do Efeito das Propriedades dos Materiais Constituintes*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação. Porto Alegre, Brasil: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Nataraj, M., Addula, H., & McManis, K. (1996). Strength and deformations characteristics of fiber reinforced soils. *International Symposium on Environmental Geotechnology. 1*, pp. 826-835. San Diego, U.S.A.: Technomic Publishing Co.
- NBR 7222. (2011). *Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Nicholson, P. (2014). *Soil Improvement and Ground Modification Methods* (1 ed.). Butterworth-Heinemann. doi:<https://doi.org/10.1016/C2012-0-02804-9>
- Noorzad, R., & Zarinkolaei, S. T. (2015). Comparison of mechanical properties of fiber-reinforced sand under triaxial compression and direct shear. *Open Geosciences*, 7(1), pp. 547-558. doi:10.1515/geo-2015-0041
- 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*. Norma Portuguesa Definitiva.
- NP EN 12390-3. (2011). *Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão de provetes*. Norma Portuguesa Definitiva.
- NP EN 206-1. (2007). *Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*. Norma Portuguesa Definitiva.
- NP-143. (1969). *Solos – Determinação dos Limites de Consistência*. Norma Definitiva Portuguesa.
- NP-83. (1965). *Solos – Determinação da Densidade das Partículas Sólidas*. Norma Definitiva Portuguesa.
- Núñez, W. P. (1991). *Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação*. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre, Brasil: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Fonte: <http://hdl.handle.net/10183/151325>
- Olgun, M. (2013). Effects of polypropylene fiber inclusion on the strength and volume change characteristics of cement-fly ash stabilized clay soil. *Geosynthetics International*, 20(4), pp. 263–275. doi:<http://dx.doi.org/10.1680/gein.13.00016>

- Oliveira, T. G., Mendes, G. d., Pereira, E. L., & Ferreira, L. D. (2016). Análise comparativa entre o granulômetro a laser e o método convencional de granulometria por sedimentação. *XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - O futuro sustentável do Brasil passa por Minas*. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: ABMS.
- Park, S. (2009). Effect of fibre reinforcement and distribution on unconfined compressive strength of fibre-reinforced cemented sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(2), pp. 162–166.
- Park, S.-S. (2011). Unconfined compressive strength and ductility of fiber-reinforced cemented sand. *Construction and Building Materials*, 25(2), pp. 1134–1138. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.07.017
- Paula, T. M., Consoli, N. C., Festugato, L., Favretto, F., & Daronco, J. V. (2019). Behaviour of fibre-reinforced cemented sand under flexural tensile stress. *E3S Web Conf. - 7th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials*, 92, p. 6. Glasgow, Scotland. doi:<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199212005>
- PCA. (1971). *Soil-Cement Construction Handbook*. E.U.A.: Portland Cement Association.
- Pino, L. F., & Baudet, B. A. (2015). The effect of the particle size distribution on the mechanics of fibre-reinforced sands under one-dimensional compression. *Geotextiles and Geomembranes*, 43(3), 250-258. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.02.004>
- 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.
- Pitta, M. R. (1984). *Dimensionamento de pavimentos com camadas estabilizadas com cimento*. São Paulo, Brasil: ABCP.
- Pitta, M. R. (1995). *Estabilização com solo-cimento* (Vol. 17). São Paulo, Brasil: Revista Techné. Pini.
- Porém, M. V. (2016). *Comportamento Cíclico de um Solo Mole Estabilizado Quimicamente com Adição de Fibras de Polipropileno*. Universidade de Coimbra, Dissertação de Mestrado, Dep. de Eng^a Civil da FCTUC, Coimbra, Portugal.
- 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.

- Ramos, N. M. (2014). *Ensaio de adensamento oedométrico em solos reforçados com cal, cimento portland, e cinza de casca de arroz*. Universidade Federal do Pampa, Trabalho de Conclusão de Curso.
- Rios, S. (2011). *A general framework for the geomechanical characterisation of artificially cemented soil*. Porto University, PhD thesis. Porto, Portugal: FEUP.
- Samuel, O. D., Agbo, S., & Adekanye, T. A. (2012). Assessing mechanical properties of natural fibre reinforced composites for engineering applications. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 11(1), 780-784. Fonte: <http://www.SciRP.org/journal/jmmce>
- Saran, S. (2010). *Reinforced Soil and Its Engineering Applications* (2 ed.). New Delhi: I. K. International Publishing House Pvt Ltd.
- Savastano Jr, H., Warden, P. G., & Coutts, R. S. (2005). Microstructure and mechanical properties of waste fibre–cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 7(5), pp. 583-592. doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.09.009
- Sbahieh, S., & Teymur, B. (2019). The effect of fiber reinforcement on the behavior of cemented sand. *XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Reykjavik, Iceland. doi:10.32075/17ECSMGE-2019-0549
- Silva, A. C. (2002). *Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose*. Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, São Paulo, Brasil.
- 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, M., Bueno, B. S., & Lima, D. (1995). Estabilização de solos com inclusões curtas aleatórias. *II Simpósio Brasileiro sobre aplicação de Geossintético*, (pp. 327-335). São Paulo, Brasil.
- Silva, S. R. (2011). *A General Framework for the Geomechanical Characterisation of Artificially Cemented Soil*. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Soğancı, A. S. (2015). The Effect of Polypropylene Fiber in the Stabilization of Expansive Soils. *International Journal of Geological and Environmental Engineering*, 9(8), 994-997. doi:doi.org/10.5281/zenodo.1108654
-

- Specht, L. (2000). , *Comportamento de misturas de solo-cimento-fibra submetidos a carregamentos estáticos visando à pavimentação*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Tese de D.Sc., Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Rio Grande do Sul.
- Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F., & Cai, Y. (2006). Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes*, pp. 194-202. doi:10.1016/j.geotexmem.2006.11.002
- 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^a Civil da FCTUC, Coimbra.
- Teodoro, J. M. (1999). *Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas*. USP, Dissertação de Mestrado, EESC, São Carlos.
- Terashi, M. (1997). Deep Mixing Method - Brief state of the art. *14 International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, (pp. 2475–2478). Hamburg, Germany. Fonte: https://www.issmge.org/uploads/publications/1/31/1997_04_0065.pdf
- Tôledo Filho, R. D., Joseph, K., Ghavami, K., & England, G. L. (1999). The use of sisal fibre as reinforcement in cement based composites. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 3(2), 245-256.
- Venda Oliveira, P. J., Correia, A. A., & Cajada, J. C. (2018). Effect of the type of soil on the cyclic behaviour of chemically stabilised soils unreinforced and reinforced with polypropylene fibres. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 336-343.
- 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>
- Viana da Fonseca, A., Rios, S., Amaral, M. F., & Panico, F. (2013). Fatigue Cyclic Tests on Artificially Cemented Soil. *Geotechnical Testing Journal*, 36(2), 1-9. doi:10.1520/GTJ20120113
- Wambua, P. I. (2003). Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and technology*, pp. 1259–1264. doi:10.1016/S0266-3538(03)00096-4

- Wang, H., Tang, C., Gu, K., Shi, B., & Inyang, H. (2019). Mechanical behavior of fiber-reinforced, chemically stabilized dredged sludge. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, pp. 1-15. doi:10.1007/s10064-019-01580-5
- Wang, L. (2002). *Cementitious Stabilization of soils in the presence of sulfate*. Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College. Louisiana: Department of Civil & Environmental Engineering. (PhD. thesis).
- Wei, J., & Meyer, C. (2014). Sisal fiber-reinforced cement composite with Portland cement substitution by a combination of metakaolin and nanoclay. *Journal of materials science*, pp. 7604–7619. doi:10.1007/s10853-014-8469-8
- Yoshinaka, R., & Yamabe, T. (1981). Deformation Behaviour of Soft Rocks. *International Symposium on Weak Rock - Soft, Fractured and Weathered Rock - Preprints. Theme 1 : Engineering Property on the Weak Rock* (pp. 82-87). Japan: ISRM.

ANEXO A - ENSAIO À TRAÇÃO DAS FIBRAS DE SISAL

Para determinação da resistência à tração das fibras de sisal, foram realizados ensaios de tração. Os ensaios ocorreram no Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra, utilizando o equipamento SHIMADZU AG-X, com célula de carga com capacidade para 5 kN (Figura A.1).



Figura A.1 Equipamento para ensaios de tração SHIMADZU AG-X

Para este ensaio, as fibras foram fixadas no equipamento e levadas até a rotura, obtendo-se os valores de resistência à tração a partir da medição da força (N) aplicada às mesmas, conforme Figura A.2.

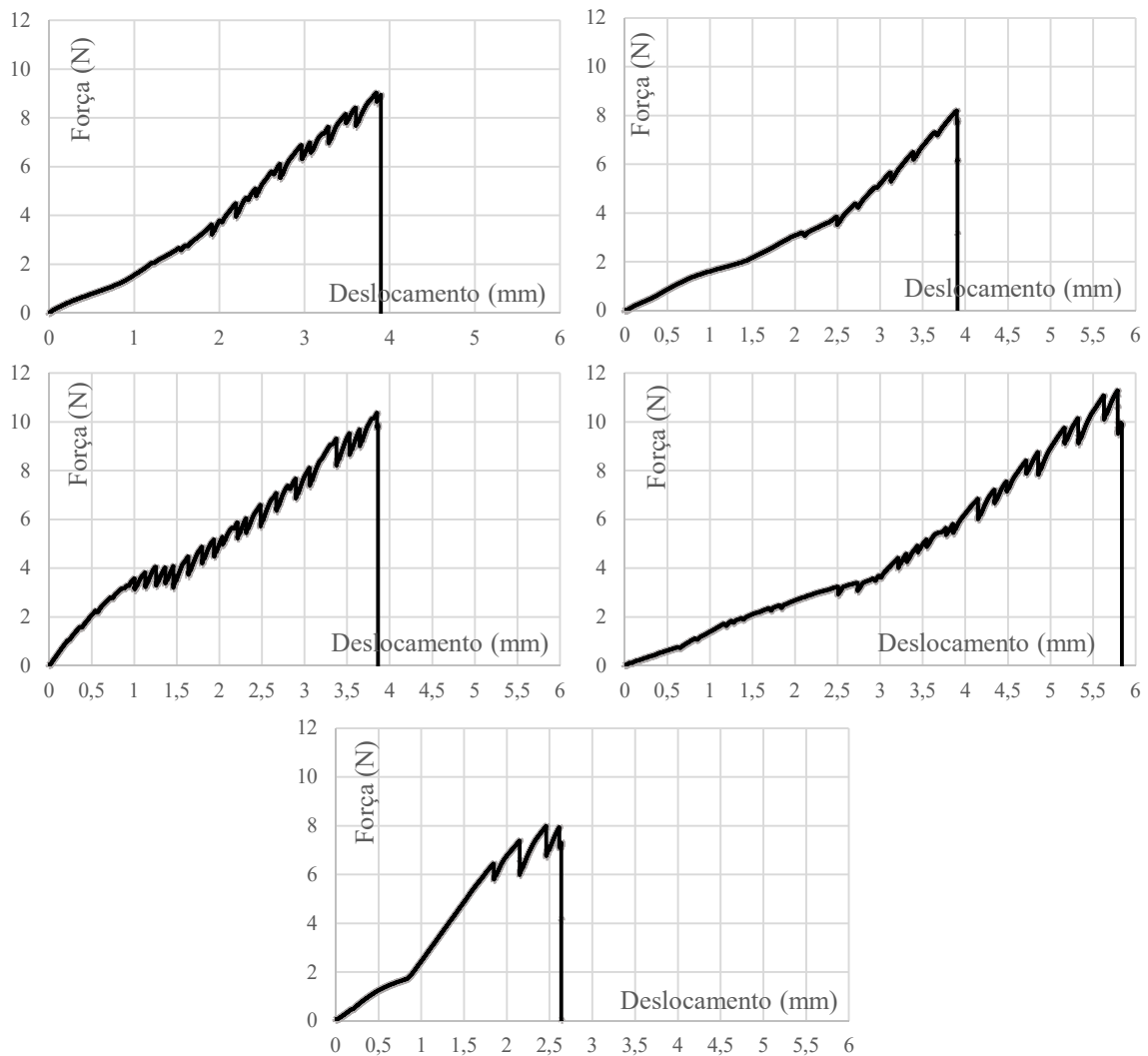


Figura A.2 Curvas força-deslocamento dos ensaios de tração das fibras de sisal

No segmento inicial do ensaio as fibras sofrem um efeito de ajuste na amarração das mesmas. Esse ajuste deve-se à dificuldade de amarração da fibra no equipamento. Através dos cinco ensaios realizados, obteve-se uma média de 8,60 N como força máxima aplicada no ensaio. Considerando que o diâmetro das fibras é de 140 μm , a resistência à tração encontrada para uma fibra de Sisal é de **558 N/mm²**.

ANEXO B - ENSAIO DE MOLHAGEM DAS FIBRAS DE SISAL

Para análise da capacidade de absorção de água das fibras de Sisal, com o intuito de comprovar que a mesma é capaz de reter água quando molhada, realizou-se o ensaio a seguir descrito. O ensaio de molhagem da fibra consistiu em imergir a mesma numa cápsula com água, retirando-a quando se atingisse um tempo pré-determinado, verificando se a fibra absorve água mediante pesagem. Para esta verificação, foram estabelecidos 3 pontos de verificação em relação ao tempo: 15, 30, e 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, conforme a Figura B.1. Após a pesagem, as fibras foram imersas em 15 mililitros de água, conforme a Figura B.1.b).

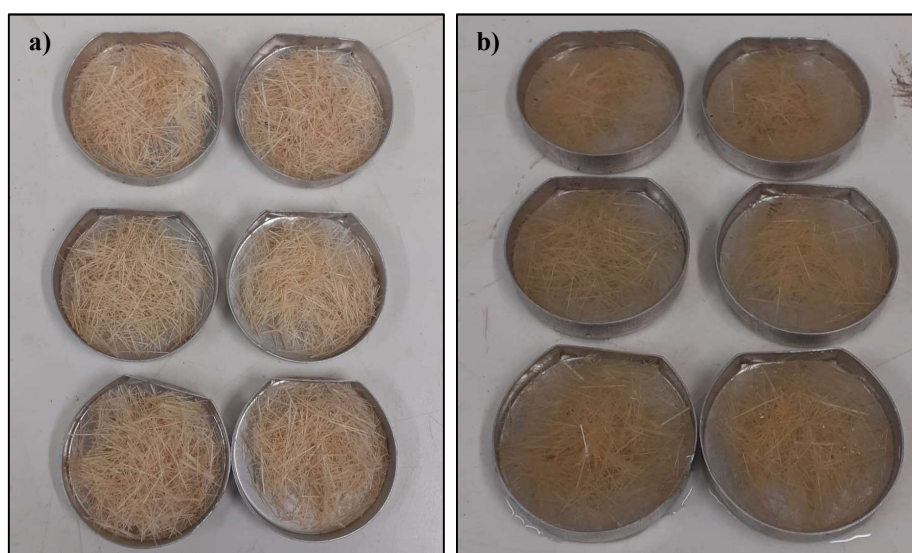


Figura B.1 Ensaio de molhagem das fibras de sisal: a) antes e b) após a imersão em água

Após os tempos de leitura, as fibras eram retiradas e, com o auxílio de uma folha de papel absorvente, retirado o máximo de água contida na superfície das mesmas. Em seguida, eram pesadas para averiguar a sua massa após a molhagem. Os resultados são expressos no Quadro B.1, podendo-se constatar que as fibras de sisal absorvem água, facto este refletido no índice de absorção (IA) que reflete a massa de água absorvida pelas fibras face à massa seca das mesmas.

Quadro B.1 – Resumo dos resultados obtidos no ensaio de molhagem das fibras de sisal

Tempo de leitura (min)	Peso do material seco (g)	Água utilizada (ml)	Peso do material húmido (g)	IA (%)
15	0,503	15	0,994	97,61
	0,509		1,085	113,16
30	0,512		1,202	134,76
	0,523		1,570	200,19
60	0,516		1,770	243,02
	0,535		1,996	273,08

IA = índice de absorção de água (Phúmido-Pseco)/Pseco

Foi observado ainda o ganho de diâmetro, chegando a ser medido até 0,22 mm após 1 hora de imersão das fibras. Isso corrobora as características higroscópicas e hidrofílicas das fibras, que se expandem durante a molhagem, e retraem na medida 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 com o solo, elas absorvem água.

ANEXO C - ENERGIA DE COMPACTAÇÃO DOS PROVETES

Para a determinação da energia aplicada nos provetes compactados neste estudo, utilizou-se como base a energia de compactação aplicada no ensaio de Proctor leve. Levando em conta que o molde deste ensaio era maior que os provetes do estudo, ajustou-se o número de pancadas mantendo a energia aplicada. A determinação da energia aplicada no provete passou por uma correlação entre os volumes com a energia do Proctor leve, calculando assim a energia total necessária para compactar um provete.

1. ENSAIO PROCTOR LEVE

a. Características do ensaio

- * Volume do molde $\rightarrow 958,49 \text{ cm}^3$
- * Massa do pilão $\rightarrow 2,49 \text{ kg}$
- * Altura de queda do pilão $\rightarrow 30,5 \text{ cm}$
- * Número de pancadas do ensaio $\rightarrow 75$

b. Energia de compactação do ensaio

- * Energia potencial gravítica $\rightarrow E = m \times g \times h$
- * Aceleração da gravidade $\rightarrow g = 9,8 \text{ m} / \text{s}^2$
- * Energia por pancada $\rightarrow 2,49 \times 9,8 \times 305 \times 10^{-3} \rightarrow 7,443 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$
- * Energia do ensaio $\rightarrow E = 7,443 \times 75 \rightarrow 558,196 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$

2. PROVETES DO ENSAIO

a. Características do provete

- * Altura $\rightarrow h = 140 \text{ mm}$
- * Diâmetro interno $\rightarrow d = 70 \text{ mm}$
- * Volume do provete $\rightarrow V_{\text{provete}} = \pi \times (70/2)^2 \times 140 \times 10^{-3} = 538,783 \text{ cm}^3$

b. Energia de compactação dos provetes

- * Energia de compactação $\rightarrow E_{\text{provete}} = \frac{V_{\text{provete}} \times E}{V} \rightarrow 313,77 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$
- * Número total de pancadas $\rightarrow n = 313,77 / 7,443 \rightarrow \approx 42 \text{ pancadas}$
- * Número de pancadas para 3 camadas $\rightarrow n = 42/3 \rightarrow \approx 14 \text{ pancadas}$

Com isso, para uma correta compactação dos provetes, determinou um número de 14 pancadas para cada uma das 3 camadas do provete do estudo.)