



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

Comportamento Mecânico do Solo Mole do Baixo Mondego Quimicamente Estabilizado Com Adição de Fibras de Polipropileno

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Especialidade de Geotecnia

Autor

Dione Guerra Custódio

Orientadores

Professor Doutor Paulo José da Venda Oliveira

Professor Doutor António Alberto Santos Correia

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correcções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Outubro, 2013

AGRADECIMENTOS

Volvidos alguns meses de intensas pesquisas, de muitas experiências em laboratório e de momentos anímicos adversos, pois nem sempre as coisas me saíam bem, o certo é que cheguei ao fim! Das muitas e muitas horas que passei à volta deste meu trabalho, não seria possível concluí-lo se não tivesse tido a ajuda dos professores, dos meus colegas, dos meus amigos e, claro, da minha família. Agora é hora de se lhes fazer justiça ao mencionar os seus nomes como forma de agradecimento:

Ao Professor Doutor Paulo José da Venda Oliveira a sua disponibilidade, colaboração, conhecimentos transmitidos assim como a ajuda prestada ao longo de todo o processo de orientação científica desta dissertação.

Ao Professor Doutor António Alberto Santos Correia pelos conhecimentos transmitidos, pela constante disponibilidade demonstrada, pela preocupação, amizade e incentivo a cada momento, sempre motivador ao longo da concretização desta dissertação.

À Cimpor, nas pessoas do Eng^o Paulo Rocha e da Eng^a Teresa Martins, pela cedência dos ligantes e à Biu International, na pessoa do Eng^o Erik Ulrix pela cedência das fibras.

Ao meu colega e amigo João Teles pelo apoio constante, pelos conhecimentos que partilhou e pelo bom humor que amenizou os momentos difíceis.

Ao Senhor José António por toda a paciência e sentido prático com que sempre me ajudou nos trabalhos laboratoriais.

Aos meus pais, agradeço do fundo do meu coração, pelo amor incondicional e pela forma, como ao longo destes anos, tão bem, souberam ajudar-me.

Às minhas irmãs agradeço, com um carinho muito especial, o apoio, a amizade e a alegria que me presenteiam dia após dia.

Aos meus avós, de quem tenho muito orgulho e admiração

Ao Pedro Casaleiro, por ser uma pessoa muito especial para mim, agradeço o companheirismo, a compreensão e a força nas horas mais difíceis.

À minha tia, que considero uma irmã mais velha, pela paciência e ajuda nos momentos em que precisei.

A todos os meus amigos, em especial à Sofia Machado e ao Ricardo Almeida, que me ajudaram e acompanharam sempre neste percurso.

A Todos o meu MUITO OBRIGADO!

RESUMO

Os solos moles caracterizam-se pela sua elevada compressibilidade e baixa resistência, sendo as construções sobre estes consideravelmente problemáticas, o que leva a que a construção sobre estes implique a necessidade de aplicação de diversas técnicas de melhoramento de solos.

A técnica de estabilização química de solos é uma das técnicas possíveis de ser utilizada para viabilizar a construção neste tipo de formações geotécnicas, consistindo na mistura do solo natural com agentes estabilizadores, os quais induzem a alteração do comportamento mecânico. Esta técnica é utilizada neste trabalho com o objectivo de se analisar, por via experimental, a influência da adição de fibras de polipropileno no comportamento de misturas de solo-ligante, tanto em termos de resistência à tracção e compressão como de deformabilidade.

A utilização de fibras como reforço de solos moles é uma técnica relativamente recente e promissora, em que se pretende criar um novo material com propriedades e características específicas. Os parâmetros a analisar serão a dosagem de ligante, o tipo e a dosagem de fibras. A resistência à compressão será avaliada por ensaios de compressão simples (UCS), sendo a resistência à tracção determinada por três ensaios distintos: compressão diametral (CD), tracção (T) e flexão (F).

Este trabalho experimental permitiu constatar que o comportamento pré-rotura é primordialmente condicionado pela dosagem de ligante, originando a inclusão de fibras o aumento da ductilidade do material bem como alguma resistência pós-rotura. Durante a realização dos resultados também se observou que as fibras, quando distribuídas aleatoriamente, e por não se encontrarem na posição mais ajustada, criam planos de fraqueza e planos de rotura preferenciais que condicionam a resistência obtida.

ABSTRACT

Soft soils are characterized by its high compressibility and low strength, being the constructions on these soils considerably problematic, which lead to a construction entailing the need of application of various soil improvement techniques.

The chemical stabilization of soils is one of the techniques that can be used to enable the construction on this type of geotechnical formations, consisting in the mixture of the natural soil with stabilizing agents, which induce a change in its mechanical behavior. This technique is used in this study in order to experimentally analyze the influence of adding polypropylene fibers in the behavior of soil-binder mixes, both in terms of tensile strength, compression strength and deformability.

The use of fiber reinforcement in soft soils is a relatively new and promising technique that intents to create a new material with specific properties and characteristics. Therefore, the parameters to be analyzed will be the binder quantity, and both type and quantity of fibers. The compressive strength will be evaluated by simple unconfined compression tests (UCS) being the tensile strength determined by three different tests: Split-Tensile Test or Brazilian Test (DC), Tensile Test (T) and Flexural Test (F).

This experimental research has revealed that the pre-failure behavior is primarily dependent on conditioned by the binder quantity, while the inclusion of fibers results in an increase of the material's ductility as well as some increase of the post-failure strength. It was also observed that the fibers, when randomly distributed and not in the adjusted position, create preferential plans of weakness and failure that affect the obtained strength.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE QUADROS	xi
SIMBOLOGIA	xii
ABREVIATURAS	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1.Contexto geral do trabalho	1
1.2.Estrutura da Dissertação	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1.Estabilização química dos solos	3
2.2.Reforço de solos com fibras.....	4
2.3.Solo estabilizado com ligante e reforçado com fibras.....	8
2.3.1. Influência do tipo de solo, tipo de ligante e tempo de cura.....	8
2.3.2. Influência da adição de fibras.....	9
3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	11
3.1.Caracterização geotécnica do solo	11
3.1.1.Introdução	11
3.1.2.Resultados da caracterização geotécnica do solo	12
3.1.2.1.Teor em água.....	12
3.1.2.2.Densidade das partículas sólidas	12
3.1.2.3.Limite de Plasticidade e Liquidez	12
3.1.2.4.Teor em matéria orgânica	12
3.1.2.5.Composição granulométrica.....	13
3.2.Ligantes	14
3.2.1.Cimento Portland CEM I 42,5R.....	14
3.2.2. Escória granulada de alto-forno	15
3.3.Fibras de polipropileno: <i>DuomixM12</i> e <i>DuomixM20</i>	15
4. PROCEDIMENTO E PLANO DE ENSAIOS.....	17
4.1.Introdução.....	17
4.2.Procedimento experimental.....	17
4.3.Descrição dos ensaios	21

4.3.1. Ensaio de compressão simples não confinada (UCS)	22
4.3.1.1. Procedimento do ensaio	22
4.3.1.2. Determinação de parâmetros	22
4.3.2. Ensaio de tração simples (T)	23
4.3.2.1. Procedimento do ensaio	23
4.3.2.2. Determinação de parâmetros	25
4.3.3. Ensaio de compressão diametral (CD)	25
4.3.3.1. Procedimento do ensaio	25
4.3.3.2. Determinação de parâmetros	26
4.3.4. Ensaio de flexão (F)	26
4.3.4.1. Procedimento do ensaio	26
4.3.4.2. Determinação de parâmetros	27
5. ANÁLISE DE RESULTADOS	28
5.1. Introdução	28
5.2. Ensaio de Compressão Simples (UCS)	28
5.2.1. Ensaio de UCS - provetes sem fibras	29
5.2.2. Ensaio de UCS - provetes com fibras <i>DuomixM12</i>	31
5.2.2.1. Influência da dosagem de fibras	31
5.2.2.2. Influência da dosagem de ligante	33
5.2.3. Influência do tipo de fibra <i>DuomixM20</i> (comprimento da fibra)	35
5.3. Ensaio de Tração Simples (T)	36
5.3.1. Ensaio de Tração - provetes sem fibras	37
5.3.2. Ensaio de Tração - provetes com fibras <i>DuomixM12</i>	39
5.3.2.1. Influência da dosagem de fibras	39
5.3.2.2. Influência da dosagem de ligante	41
5.3.3. Influência do tipo de fibra <i>DuomixM20</i> (comprimento da fibra)	43
5.4. Ensaio de Compressão Diametral (CD)	44
5.4.1. Ensaio de CD - provetes sem fibras	45
5.4.2. Ensaio de CD - provetes com fibras <i>DuomixM12</i>	47
5.4.2.1. Influência da dosagem de fibras	47
5.4.2.2. Influência da dosagem de ligante	49
5.4.3. Influência do tipo de fibra <i>DuomixM20</i> (comprimento da fibra)	50
5.5. Ensaio de Flexão Simples (F)	51
5.5.1. Ensaio de F - provetes sem fibras	52
5.5.2. Ensaio de F - provetes com fibras <i>DuomixM12</i>	54
5.5.2.1. Influência da dosagem de fibras	54
5.5.2.2. Influência da dosagem de ligante	56
5.5.3. Influência do tipo de fibra <i>DuomixM20</i> (comprimento da fibra)	57

5.6.Comparação de Resultados	58
6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	60
6.1.Conclusões	60
6.2.Sugestões para trabalhos futuros	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Curvas tensão-deformação axial das misturas sem cimento (adaptado de Feuehermel, 2000).....	6
Figura 2.2 – Curvas tensão-deformação axial das misturas com cimento (adaptado de Feuehermel, 2000).....	6
Figura 2.3 – Curvas tensão-deformação: a) amostras não-cimentadas reforçadas com fibras de diferentes dosagens após 28 dias de cura; b) amostras não reforçadas cimentadas com diferentes dosagens de cimento após 28 dias de cura; c) amostras cimentadas com 5% de cimento reforçadas com diferentes dosagens de fibras após 28 dias de cura (Tang et al, 2007).	7
Figura 2.4 – Resistência à compressão simples para alguns solos tratados com cal em função: a) da quantidade de cal (curados em 7dias); b) do tempo de cura (adaptado de Inglês e Metcalf, 1972).	9
Figura 3.1 – Curva granulométrica do solo em estudo.	13
Figura 3.2 – Classificação granulométrica do solo segundo o triângulo de Feret.	14
Figura 3.3 – Geometria das Fibras: a) DuomixM12 e b) DuomixM20.	16
Figura 3.4 – Ilustração comparativa das dimensões das fibras DuomixM12 e DuomixM20.	16
Figura 4.1 – Misturadora Sammic BM11.	18
Figura 4.2 – a) Moldes em PVC para ensaios de UCS e T; b) Moldes em PVC para ensaios de CD; c) Moldes metálicos para ensaios de F.....	19
Figura 4.3 – a) Prensa universal WYKEHAM FARRANCE LTD Tristar 5000kg; b) Aspecto final de uma amostra após ensaio de UCS.	22
Figura 4.4 – Gráfico do ensaio UCS375_M12P50_1: a) curva original com o efeito do bedding-error (representado dentro da elipse); b) após correcção do bedding-error.	23
Figura 4.5 – a) Prensa de ensaios SERVOSIS MUF 404/100; b) Aspecto da amostra durante o ensaio de T; c) Aspecto final da amostra após ensaio de T.....	24
Figura 4.6 – Esquema de funcionamento do ensaio (adaptado de Conterato, 2011).....	25
Figura 4.7 – Aspecto da amostra durante o ensaio de CD.	26
Figura 4.8 – Esquema de ensaio F, adaptado da norma EN 12390-5 (2009).	27
Figura 4.9 – Aspecto da amostra durante o ensaio de F.	27
Figura 5.1 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados em provetes sem fibras: variação da dosagem de ligante.....	30

Figura 5.2 – Ensaio UCS realizados em provetes sem fibras – análise da evolução de: a) $q_u^{máx}$; b) ϵ_a ; c) E_{u50} e d) w_f com a variação da dosagem de ligante.	30
Figura 5.3 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados em provetes com fibras DuomixM12 por variação da dosagem de fibras (dosagem de ligante = 375 kg/m^3).	32
Figura 5.4 – Ensaio UCS realizados em provetes com fibras DuomixM12 e igual dosagem de ligante (375 kg/m^3) – análise da evolução de: a) $q_u^{máx}$; b) ϵ_a ; c) E_{u50} e d) w_f com a variação da dosagem de fibras.	32
Figura 5.5 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados em provetes com fibras DuomixM12 por variação da dosagem de ligante (dosagem de fibras = 50 kg/m^3).	34
Figura 5.6 – Ensaio UCS realizados em provetes com fibras DuomixM12 (na dosagem de 50 kg/m^3): análise da evolução de: a) $q_u^{máx}$; b) ϵ_a ; c) E_{u50} e d) w_f com a variação da dosagem de ligante.	34
Figura 5.7 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados em provetes com e sem incorporação de fibras de dois tipos: DuomixM12 e DuomixM20 (dosagem de fibras = 50 kg/m^3 ; dosagem de ligante = 375 kg/m^3).	36
Figura 5.8 – Curvas tensão-extensão de ensaios T realizados em provetes sem fibras por variação da dosagem de ligante.	38
Figura 5.9 – Ensaio T realizados em provetes sem fibras – análise da evolução de: a) $q_t^{máx}$; b) ϵ_a ; c) E_{u50} e d) w_f com a variação da dosagem de ligante.	38
Figura 5.10 – Curvas tensão-extensão de ensaios T realizados em provetes com fibras DuomixM12 por variação da dosagem de fibras (dosagem de ligante = 375 kg/m^3).	39
Figura 5.11 – Ensaio T realizados em provetes com fibras DuomixM12 e igual dosagem de ligante (375 kg/m^3) – análise da evolução de: a) $q_t^{máx}$; b) ϵ_a ; c) E_{u50} e d) w_f com a variação da dosagem de fibras.	40
Figura 5.12 – Curvas tensão-extensão de ensaios T realizados em provetes com fibras DuomixM12 por variação da dosagem de ligante (dosagem de fibras = 50 kg/m^3).	42
Figura 5.13 – Ensaio T realizados em provetes com fibras DuomixM12 (50 kg/m^3) – análise da evolução de: a) $q_t^{máx}$; b) ϵ_a ; c) E_{u50} e d) w_f com a variação da dosagem de ligante.	42
Figura 5.14 – Curvas tensão-extensão de ensaios T realizados em provetes com e sem incorporação de fibras de dois tipos: DuomixM12 e DuomixM20 (dosagem de fibras = 50 kg/m^3 ; dosagem de ligante = 375 kg/m^3).	43
Figura 5.15 – Curvas força-deslocamento vertical de ensaios CD realizados em provetes sem fibras por variação da dosagem de ligante.	46

Figura 5.16 – Ensaio CD realizados em provetes sem fibras – análise da evolução de: a) f_{ct} ; b) \square_v e c) w_f com a variação da dosagem de ligante.	46
Figura 5.17 – Curvas força-deslocamento vertical de ensaios CD realizados em provetes com fibras DuomixM12 por variação da dosagem de fibras (dosagem de ligante = 375 kg/m ³).	47
Figura 5.18 – Ensaio CD realizados em provetes com fibras DuomixM12 para igual dosagem de ligante (375 kg/m ³) – análise da evolução de: a) f_{ct} ; b) \square_v e c) w_f com a variação da dosagem de fibras.	48
Figura 5.19 – Curvas força-deslocamento vertical de ensaios CD realizados em provetes com fibras DuomixM12 por variação da dosagem de ligante (dosagem de fibras = 50 kg/m ³).	49
Figura 5.20 – Ensaio CD realizados em provetes com fibras DuomixM12 (na dosagem de 50kg/m ³): análise da evolução de: a) f_{ct} ; b) \square_v e c) w_f com a variação da dosagem de ligante.	50
Figura 5.21 – Curvas tensão-extensão de ensaios CD realizados em provetes com e sem incorporação de fibras de dois tipos: DuomixM12 e DuomixM20 (dosagem de fibras = 50kg/m ³ ; dosagem de ligante = 375 kg/m ³).	51
Figura 5.22 – Curvas força-flecha de ensaios F realizados em provetes sem fibras por variação da dosagem de ligante.	53
Figura 5.23 – Ensaio F realizados em provetes sem fibras – análise da evolução de: a) f_{cf} ; b) flecha e c) w_f com a variação da dosagem de ligante.	53
Figura 5.24 – Curvas força-flecha de ensaios F realizados em provetes com fibras DuomixM12 por variação da dosagem de fibras (dosagem de ligante = 375 kg/m ³).	54
Figura 5.25 – Ensaio F realizados em provetes com fibras DuomixM12 e igual dosagem de ligante (375 kg/m ³) – análise da evolução de: a) f_{cf} ; b) flecha e c) w_f , com a variação da dosagem de fibras.	55
Figura 5.26 – Curvas força-flecha de ensaios F realizados em provetes com fibras DuomixM12 por variação da dosagem de ligante (dosagem de fibras = 50 kg/m ³).	56
Figura 5.27 – Ensaio F realizados em provetes com fibras DuomixM12 (na dosagem de 50kg/m ³): análise da evolução de: a) f_{cf} ; b) flecha e c) w_f com a variação da dosagem de ligante.	57
Figura 5.28 – Curvas força-flecha de ensaios F realizados em provetes com e sem incorporação de fibras de dois tipos: DuomixM12 e DuomixM20 (dosagem de fibras = 50kg/m ³ ; dosagem de ligante = 375 kg/m ³).	58

Figura 5.29 – Comparação entre resistências obtidas para ensaios UCS, T, CD e F:
análise da evolução de: a) $f_{cfméd}^{(F)} / q_{tméd}^{(T)}$, $f_{ctméd}^{(CD)} / q_{tméd}^{(T)}$ e $q_{tméd}^{(T)} / q_{uméd}^{(UCS)}$ com a
variação da dosagem de fibras DuomixM12..... 59

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Quadro resumo com as principais características do solo mole do Baixo Mondego, obtidas por Coelho (2000), Correia (2011), e no presente estudo, para uma profundidade de 2,5m.	11
Quadro 3.2 – Composição Química dos ligantes utilizados (dados do fabricante).	15
Quadro 4.1 – Esquema de ensaios.	21
Quadro 5.1 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de compressão simples (UCS). ..	29
Quadro 5.2 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de tracção simples (T).....	37
Quadro 5.3 – Resumo dos resultados obtidos para os ensaios de CD.	45
Quadro 5.4 – Resumo dos resultados obtidos para os ensaios de F.....	52
Quadro 5.5 – Comparação entre resistências obtidas para ensaios UCS, T, CD e F, para diferentes dosagens de ligante e diferentes tipos e dosagens de fibras de polipropileno.	58

SIMBOLOGIA

Alfabeto Latino:

C_c - Índice de compressibilidade

C_r - Índice de recompressibilidade

C_α - Coeficiente de consolidação secundária

e - Índice de vazios

E - Módulo de deformabilidade (ou módulo de elasticidade de Young)

$E_{0,02}$ - Módulo de deformabilidade definido para 0,02% da tensão de rotura

E_{50} - Módulo de deformabilidade definido para 50% da tensão de rotura

E_u - Módulo de deformabilidade não drenado

f_{cf} - Resistência à flexão (ensaios F)

f_{ct} - Resistência à tracção por compressão diametral (ensaios CD)

G - Densidade das partículas sólidas

h - Altura

I_p - Índice de plasticidade

OCR - Grau de sobreconsolidação

OM - Teor em matéria orgânica

q_u - Tensão obtida para ensaios UCS

$q_u^{máx}$ - Resistência máxima ou tensão última ou de rotura obtida para ensaios UCS

q_t - Tensão obtida para ensaios T

$q_t^{máx}$ - Resistência máxima ou tensão última ou de rotura obtida para ensaios T

S - Grau de saturação

w - Teor em água

w_{nat} - Teor em água natural do solo

w_L - Limite de liquidez

w_p - Limite de plasticidade

Alfabeto Grego:

γ_{sat} - Peso volúmico saturado

δ - Deslocamento

ε_a - Extensão de rotura

\emptyset - Diâmetro

Notação Química:

Al_2O_3 - Alumina (ou óxido de alumínio)

CaO - Cal viva (ou óxido de cálcio)

Fe_2O_3 - Óxido de ferro

H_2O - Água

MgO - Óxido de magnésio

SiO_2 - Sílica (ou dióxido de silício)

SO_3 - Óxido Sulfúrico (ou trióxido de enxofre)

ABREVIATURAS

ASTM - American Society for Testing and Materials

CEM I 42,5 R - Cimento Portland CEM I 42,5 R

CD - Compressão Diametral

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

E - Escória(s) de Alto-Forno

EN - Norma Europeia (European Standard)

F - Flexão

FCTUC - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NP - Norma Portuguesa

PVC - Policloreto de Vinilo

T - Tracção

UC - Universidade de Coimbra

UCS - Compressão Simples ou Uniaxial (Unconfined Compressive Strength)

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contexto geral do trabalho

Nem sempre, nas áreas de Construção Civil e de Geotecnia, o solo se encontra com características geotécnicas adequadas à necessidade do projecto. Ter-se-á então de procurar a solução técnica mais indicada para o caso em estudo, de modo a tornar as obras de engenharia mais económicas e menos agressivas ao meio ambiente.

Actualmente, é cada vez mais comum modificar e melhorar as propriedades do solo através de diferentes técnicas, entre as quais se destacam a injeção de materiais estabilizantes, estabilização por processos físico-químicos e reforço de solos com a inclusão de elementos resistentes, criando assim um novo material mais resistente e/ou menos compressível.

É neste contexto que se insere a técnica de estabilização química de solos, existindo diferentes tecnologias que permitem o tratamento “in situ” do solo, isto é, desestruturam o solo existente e misturam-no com vários tipos de ligantes, sendo o cimento o mais usual.

Com o presente trabalho, pretende-se estudar a viabilidade prática de se utilizar a técnica de estabilização química do solo mole do Baixo Mondego com cimento Portland e escórias de alto-forno, com inclusão de fibras de polipropileno. Este trabalho surge na sequência de outros já efectuados no Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, os quais abordam a caracterização geotécnica de solos moles e a aplicação da técnica de *deep mixing* a este tipo de solos (Garcia, 2010; Correia, 2011; Lopes, Silva, Teles, 2013).

Assim, o objectivo do trabalho é avaliar a influência da adição de fibras sintéticas, compreender a interacção da mistura solo-ligante-fibras e estimar a dosagem óptima de ligante e de fibras para se potenciar as características do solo melhorado, particularmente em termos de resistência.

1.2. Estrutura da Dissertação

A dissertação desenvolve-se em sete capítulos. Para além da introdução onde se faz uma breve descrição dos objectivos e das motivações que impulsionaram este trabalho, o presente documento é constituído por mais seis capítulos, cada um com uma determinada especificidade, a saber:

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica: Faz-se uma reflexão teórica sobre conceitos e estudos importantes que serviram de base à análise de pressupostos enunciados neste trabalho.

Capítulo 3 – Caracterização geotécnica do solo: Apresenta-se os principais parâmetros característicos do solo.

Capítulo 4 – Procedimento experimental e plano de ensaios: Faz-se uma breve apresentação dos procedimentos que serviram de base à realização dos trabalhos experimentais; faz-se igualmente uma descrição do plano de ensaios e o processo adoptado para a sua concretização.

Capítulo 5 – Apresentação e análise de resultados: Apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios realizados e procede-se à análise crítica e comparação dos mesmos.

Capítulo 6 – Conclusões e trabalhos futuros: Procede-se à apresentação das conclusões obtidas e faz-se menção à possibilidade de realizações futuras no âmbito deste estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Estabilização química dos solos

O conceito “estabilização do solo” consiste num processo no qual se pretende uma melhoria do comportamento mecânico do solo, quando este está sob o efeito de cargas aplicadas, tornando-o mais resistente e menos deformável que o solo original.

A técnica de estabilização de solos é bastante antiga, uma vez que a sua utilização remonta à construção dos templos da antiga Babilónia, há mais de três mil anos. De acordo com Cristelo (2001), a estabilização de solos teve a sua importância histórica durante a Segunda Guerra Mundial, quando se utilizou cimento como aditivo para a estabilização de solos em aeroportos e vias de acesso.

Apesar da existência de vários métodos de estabilização de solos, o que se tem revelado mais prático e eficaz para fins construtivos, é o da estabilização química. A estabilização química inclui o uso de aditivos que interagem com as partículas do solo, procurando uma melhoria e estabilidade nas suas propriedades. Entre as muitas técnicas de estabilização química destacam-se o solo-cimento, solo-cal e a estabilização do solo com cinzas volantes e escórias de alto-forno.

Ao longo das últimas três décadas tem-se assistido a um forte crescimento da técnica de estabilização química dos solos, quer no que diz respeito ao volume de solos tratados, quer às diferentes aplicações (desde a estabilização de solos de fundação até à mitigação da propagação de vibrações), quer aos avanços e variantes tecnológicos (realce-se a tecnologia de *Jet Grouting* - mistura por processos hidráulicos - e o *Deep Mixing* - mistura por processos mecânicos). A técnica de *Deep Mixing* foi desenvolvida no Japão e na Suécia, em meados dos anos 70, onde se realizaram estudos laboratoriais e as primeiras aplicações práticas (Bruce et al, 1998).

A técnica compreende duas fases fundamentais. Na primeira fase, o solo é desestruturado e desagregado mecanicamente através de ferramentas de corte compostas por pás misturadoras ou hélices que rodam em torno de um eixo vertical. A segunda fase acontece aquando da extracção do equipamento e introdução em simultâneo do ligante, por exemplo a cal ou cimento, na forma seca (*dry mixing*) ou na forma de calda (*wet mixing*), de modo a construírem-se elementos de um novo material compósito a que se pode chamar solo-ligante.

Discorre das palavras de Pinto (2010), que hoje em dia a aplicação desta tecnologia é bastante vasta, possibilitando a construção em solos geotecnicaamente pobres, conseguindo-se obter proveitos a nível tecnológico, económico e ambiental.

2.2. Reforço de solos com fibras

A técnica de reforço de solos consiste na introdução de determinados elementos resistentes no solo, produzindo um material capaz de alterar de modo substancial o processo de redistribuição das tensões internas, relativamente ao maciço original não reforçado. Verifica-se que tais reforços poderão assumir naturezas e geometrias diferentes, tendo-se como exemplo os geotêxteis e geogrelhas, fibras naturais, metálicas e fibras de polipropileno.

Historicamente, o reforço de solos é uma técnica já muito conhecida e utilizada pelo Homem, podendo-se encontrar vestígios desta técnica na pirâmide de Ziggurat e na torre de Agar Quf, na Mesopotâmia (1400 a.C.) em que se intercalaram camadas de solo com mantas de raízes. Esta técnica foi também utilizada em algumas partes da Grande Muralha da China e em estradas construídas pelos Incas, no Perú, em que se empregava a lã de lama como elementos de reforço (Palmeira, 1992).

Gray e Ohashi (1983) indicam que a técnica de reforço de solos com fibras tem sido alvo de pesquisa há pouco mais de três décadas. Existe no mercado uma grande variedade de fibras que podem ser utilizadas como reforço de solos, merecendo especial destaque neste trabalho as fibras de polipropileno, as quais são consideradas como dos elementos de reforço mais promissores, por oferecer condições satisfatórias de utilização em alguns sectores da construção civil. Sabe-se que a acção das fibras inibe e condiciona os processos de formação de fissuras, melhorando assim as propriedades mecânicas do material. Esta melhoria vai depender das características da interacção solo-fibras, envolvendo parâmetros relacionados tanto com o solo como com as fibras. Assim sendo, a sua empregabilidade é bastante vasta, podendo ser encontrada em diversas aplicações, tais como a estabilização de solos, estruturas de contenção, entre outros (Trindade et al, 2004).

Na bibliografia consultada, existem algumas referências a estudos realizados com vista a avaliar o comportamento de vários tipos de solos quimicamente estabilizados, reforçados ou não com fibras. Seguidamente apresentam-se alguns dos resultados obtidos por ordem cronológica.

Gray e Maher (1989) analisaram o comportamento de uma massa de solo estabilizado (com cimento e/ou cal) reforçada com fibras distribuídas aleatoriamente. Observaram que as principais vantagens desta distribuição aleatória das fibras são a manutenção da resistência

isotrópica e a ausência de planos de fraqueza que podem ser desenvolvidos em sistemas de reforço orientado.

Maher e Ho (1994) estudaram as propriedades mecânicas de uma amostra de caulinite reforçada com fibras de polipropileno, vidro e celulose. Executaram ensaios de compressão não confinada, de compressão diametral e de flexão. Analisaram que a inclusão aleatória das fibras aumentou a resistência e a ductilidade da amostra, sendo mais evidenciado este aumento para teores de humidade mais baixos. Outro aspecto abordado pelos autores é o tamanho das fibras. Fibras mais curtas contribuem mais para o aumento da resistência, já que se encontram em maior quantidade dentro da matriz, existindo uma maior probabilidade destas estarem presentes na superfície de rotura. No entanto, após a rotura, as fibras são arrancadas mais facilmente prevalecendo neste aspecto as fibras maiores.

Consoli et al (1998-a) avaliaram a influência de fibras relativamente rígidas (vidro) e de fibras mais flexíveis (polipropileno) num solo arenoso estabilizado ou não com cimento. Os autores observaram que as fibras relativamente rígidas contribuíram para uma mudança no comportamento em termos de resistência de pico, enquanto as mais flexíveis contribuíram para uma mudança no modo de rotura e na resistência residual.

Miller e Rafai (2000) utilizaram fibras de polipropileno de 12,5mm de comprimento misturadas num solo argiloso. Determinaram as curvas de compactação de amostras variando a dosagem de fibras. Depois de compactadas, avaliaram as características da fissuração após cada ciclo de molhagem e secagem. Concluíram que aumentando a dosagem de fibras de 0,2% para 0,8% ocorre um significativo aumento da redução da fissuração de 12,28% para 88,57%, respectivamente, devido ao aumento na resistência à tracção das amostras.

Feuerharmel (2000) comparou o comportamento de três solos, argila, areia e areia-siltosa, com e sem adição de cimento, reforçados com fibras de polipropileno. Nas misturas sem cimento (Figura 2.1), concluiu que a adição de fibras de polipropileno originou um acréscimo de resistência, mais evidente para os solos mais granulares. Em relação à resistência ao corte, estabeleceu três fases no comportamento nos solos reforçados sem cimento. Numa primeira fase, o comportamento é controlado pela matriz do solo, na segunda fase, é controlado pelo conjunto, matriz e reforço e, por fim, a última fase, onde o comportamento é comandado pelas fibras. Ainda para os solos sem cimento, concluiu que as fibras conferem uma resistência às deformações radiais na amostra, que depende da adesão solo-fibra, sendo que para a areia, esta adesão é inferior.

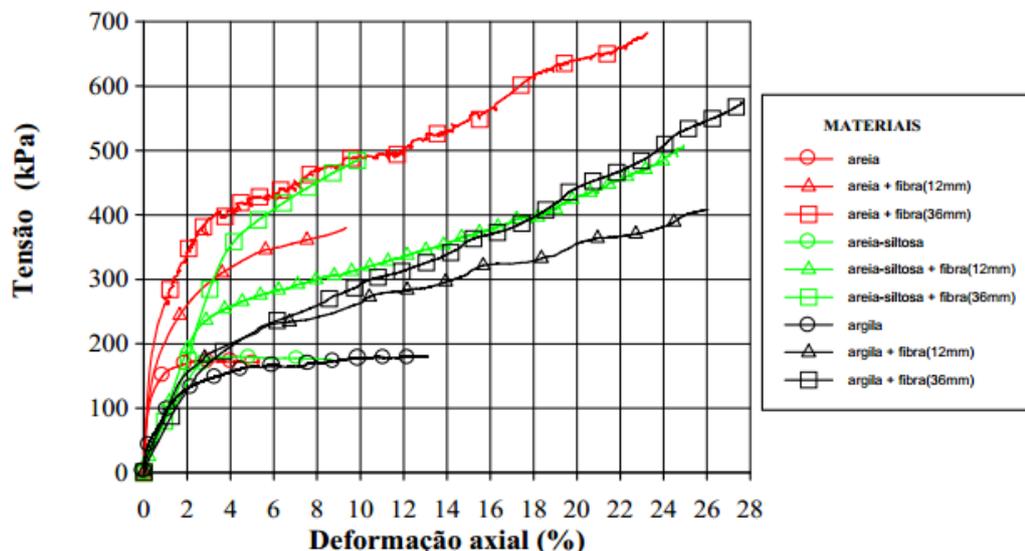


Figura 2.1 – Curvas tensão-deformação axial das misturas sem cimento (adaptado de Fuehermel, 2000).

Nas misturas com cimento, e para a mesma dosagem, o autor do estudo constatou diferentes valores de resistência para os três solos (Figura 2.2). Este facto, segundo o autor, deve-se à superfície de rotura de cada solo e à forma como o cimento e o solo entram em contacto. Constatou igualmente que a introdução de elementos de reforço (fibras de polipropileno) nas amostras de solo-cimento origina uma mudança no comportamento pós-pico, justificando tal mudança pela adesão da fibra à matriz (interacção fibra-matriz sólida).

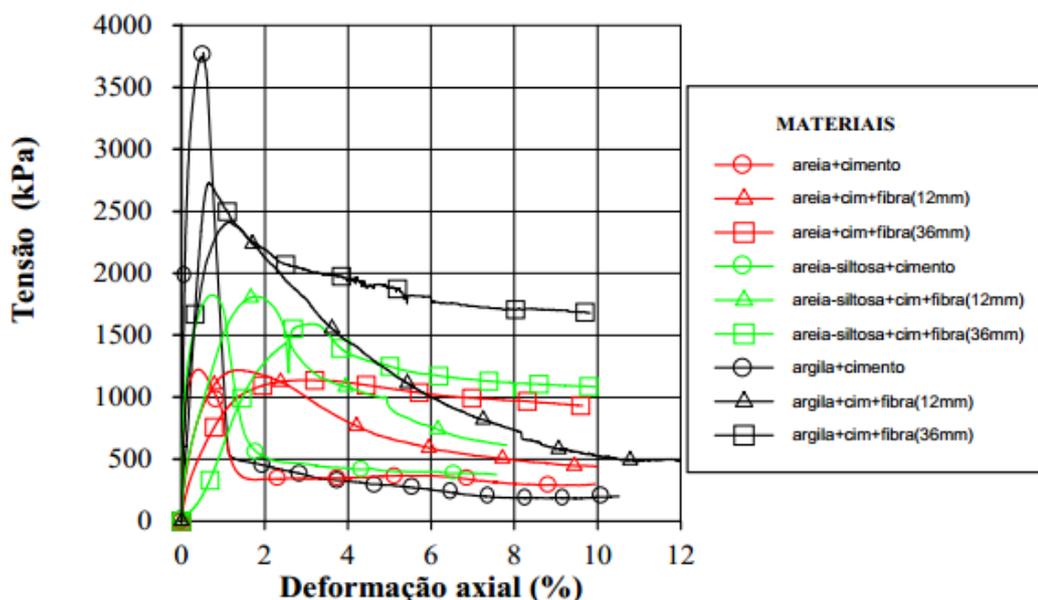


Figura 2.2 – Curvas tensão-deformação axial das misturas com cimento (adaptado de Fuehermel, 2000).

Tang et al (2007) analisaram o comportamento de um solo argiloso, cimentado e não cimentado, com inclusão de fibras de polipropileno de comprimento 12mm. Submeteram as amostras a ensaios de compressão não-confinada e de corte directo após 7, 14 e 28 dias de cura, variando a dosagem de fibras e de cimento. A Figura 2.3 mostra as curvas tensão-deformação obtidas.

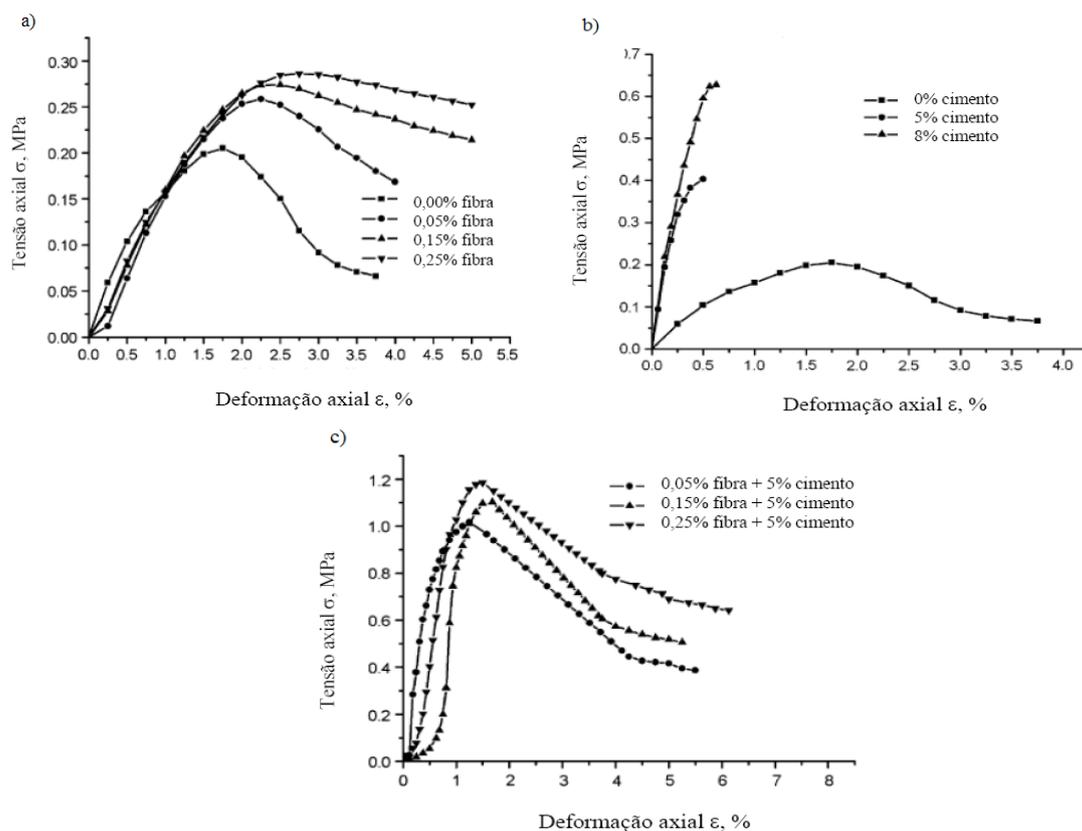


Figura 2.3 – Curvas tensão-deformação: a) amostras não-cimentadas reforçadas com fibras de diferentes dosagens após 28 dias de cura; b) amostras não reforçadas cimentadas com diferentes dosagens de cimento após 28 dias de cura; c) amostras cimentadas com 5% de cimento reforçadas com diferentes dosagens de fibras após 28 dias de cura (Tang et al, 2007).

Com este estudo verificaram um aumento da resistência à compressão não-confinada, da resistência ao corte e da deformação axial com a adição de fibras, quer para as amostras cimentadas quer para as não cimentadas. Verificaram ainda uma diminuição da rigidez e perda de resistência pós-pico não tão acentuada, tornando o material mais dúctil.

Consoli et al (2010) submeteram um solo arenoso quimicamente estabilizado, reforçado ou não com fibras de polipropileno, a ensaios de compressão simples a fim de estudarem a influência de diferentes dosagens de ligante. Registraram o crescimento da resistência à

compressão simples com o aumento da dosagem de ligante, seguindo este crescimento uma variação linear. Os autores verificaram ainda que, em relação ao solo quimicamente estabilizado não reforçado, para qualquer dosagem de ligante, as fibras contribuíram para incrementar a resistência.

2.3. Solo estabilizado com ligante e reforçado com fibras

2.3.1. Influência do tipo de solo, tipo de ligante e tempo de cura

Nesta secção apresenta-se os resultados de alguns estudos científicos sobre alguns aspectos que influenciam a estabilização do solo, relacionando a resistência da mistura com algumas variáveis, nomeadamente o tipo de solo e de ligante, a quantidade de ligante e o tempo de cura. Seguidamente abordar-se-á, de forma breve, algumas dessas variáveis.

Apesar de todos os tipos de solo poderem ser estabilizados com cimento, os solos arenosos são os que se mostram mais eficientes por exigirem reduzidas dosagens de cimento. Quanto maior a percentagem de silte e argila, maior será a dosagem de cimento exigido. Assim, a dosagem de cimento vai influenciar a resistência da mistura solo-cimento.

Também a presença de matéria orgânica no solo afecta as reacções de hidratação do cimento, contribuindo para uma diminuição da resistência (Miura et al, 1998).

A mistura solo-cimento ganha resistência por um processo de cimentação das partículas, processo este que se pode desenvolver por alguns meses ou anos, sendo o maior incremento até aos 28 dias iniciais, como acontece no betão (Almeida, 2009).

Nas misturas solo-cal, segundo Inglês e Metcalf (1972), a resistência aumenta linearmente até uma determinada dosagem de cal. Como mostra a Figura 2.4 a), esse aumento é visível para os solos argilosos (como acontece na maioria deles), até atingir uma dosagem de cal de cerca de 8%. Após essa dosagem, o acréscimo de resistência diminui com a quantidade de cal. Os autores atribuem esse comportamento ao facto de as misturas solo-cal apresentarem uma cimentação lenta (reacções pozolânicas), e ao tipo de solo. Relativamente ao tempo de cura, afirmam que com o aumento deste a resistência aumenta, independentemente do tipo de solo. Na Figura 2.4 b) pode-se observar os diferentes tipos de solos estabilizados com a mesma dosagem de cal, podendo constatar que apesar de se verificar o aumento de resistência para todos eles, o mais significativo foi para o pedregulho arenoso.

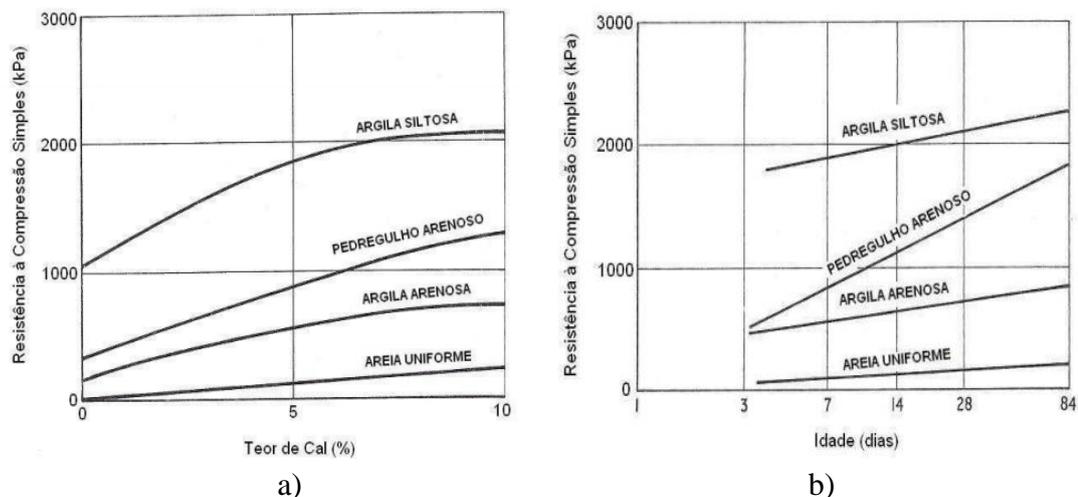


Figura 2.4 – Resistência à compressão simples para alguns solos tratados com cal em função: a) da quantidade de cal (curados em 7 dias); b) do tempo de cura (adaptado de Inglês e Metcalf, 1972).

De uma forma geral, há um aumento do valor da resistência com o aumento do período de cura e com a quantidade de cal adicionada ao solo, ou seja, enquanto se estiver na presença de cal ocorrem reacções pozolânicas responsáveis pelo aumento da resistência.

2.3.2. Influência da adição de fibras

Há factores muito complexos e variados que afectam o comportamento de solos estabilizados reforçados mediante a adição de fibras. As propriedades mecânicas dependem da interacção solo-fibras, envolvendo aspectos relacionados com o solo (por exemplo, composição granulométrica, grau de cimentação, etc.) e com as fibras (por exemplo, comprimento, espessura, rigidez, etc.). Em materiais sem adição de fibras, quando surge a primeira fissura, a sua abertura avança gradualmente até dar origem ao colapso da matriz; se, por outro lado, se verificar a adição de fibras, a rotura é retardada e acontece gradualmente, uma vez que as pontes de transferência formadas pelas fibras absorvem parte das solicitações e originam uma fissuração mais distribuída (Sales, 2011).

Conclui-se pois, que as fibras não impedem a formação de fissuras; no entanto, têm a capacidade de controlar a abertura e o espaçamento entre as fissuras de modo a aumentar a resistência à tracção (Taylor, 1994). Para Hannant (1994), o facto de as fibras terem essa capacidade favorece as propriedades mecânicas no estado pós-fissuração, nomeadamente a ductilidade e a tenacidade da matriz. Segundo Taylor (1994), o melhor desempenho da matriz cimentada e reforçada com fibras depende do teor e comprimento da fibra, e também da

aderência entre a matriz e o reforço. Johnston (1994) ainda acrescenta que a orientação e a distribuição das fibras na matriz rentabilizam esse desempenho.

Relativamente ao teor de fibras, Taylor (1994) mostra que quanto maior for, maior será a resistência pós-fissuração e menor será a dimensão das fissuras, desde que essas fibras tenham a capacidade de absorver as cargas adicionais provocadas pela fissura.

Uma maior aderência entre as fibras e a matriz sólida contribui igualmente para uma redução do tamanho das fissuras, sendo por isso, outra característica importante neste processo (Taylor, 1994).

No que diz respeito ao comprimento das fibras, este é também um factor a ter em atenção: quanto maior ele for, menor será a probabilidade delas serem arrancadas; significa que, aplicando uma tensão de corte superficial à fibra, o seu maior comprimento vai permitir que estas tensões de corte induzam uma tensão de tracção (tensão de confinamento) igual à sua resistência (Taylor, 1994).

3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1. Caracterização geotécnica do solo

3.1.1. Introdução

O depósito de solos moles do Baixo Mondego tem vindo a ser objecto de estudo, nos últimos anos, pelo Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da FCTUC. Destacam-se os trabalhos de Coelho (2000), que desenvolveu um completo estudo de caracterização do depósito, complementado posteriormente por Correia (2011). No Quadro 3.1 são apresentados alguns dos principais resultados obtidos desses estudos com particular relevância para o presente trabalho.

O solo do presente estudo foi recolhido no depósito de solos moles do Baixo Mondego, no local Quinta da Foja, a uma profundidade de 2,5m. Seguidamente, procede-se à caracterização geotécnica do solo mencionado.

Quadro 3.1 – Quadro resumo com as principais características do solo mole do Baixo Mondego, obtidas por Coelho (2000), Correia (2011), e no presente estudo, para uma profundidade de 2,5m.

Características do Solo		Coelho (2000)	Correia (2011)	Presente Estudo
Composição Granulométrica	Argila (%)	13 - 30	8 - 12	25
	Silte (%)	54 - 73	71	61
	Areia (%)	14 - 16	17 - 21	14
Peso Volúmico Saturado	γ_{sat} (kN/m ³)	14,80	14,56	-
Densidade das Partículas Sólidas	G	2,58	2,555	2,559
Teor em Água Natural	w (%)	81	80,87	80,87
Índice de Vazios	e	2,1	2,11	-
Grau de Saturação	S (%)	100	98,10	-
Teor em Matéria Orgânica	OM (%)	8,50	7,96	13,05
Limites de Consistência	w _p (%)	40	42,80	41,9
	w _L (%)	77	71,03	68
Grau de Sobreconsolidação	OCR	3,3	3,3	-
Índices de Compressibilidade e Recompressibilidade	C _c	0,08	0,065	-
	C _r	0,63	0,57	-
Coefficiente de Consolidação secundária	C _{α}	0,006	0,02	-

3.1.2.Resultados da caracterização geotécnica do solo

3.1.2.1.Teor em água

Correia (2011) avaliou o teor em água natural do solo em 80,87%, a partir de amostras recolhidas a uma profundidade de 2,5m. O teor em água (w) foi determinado segundo a norma NP 85 (1965). Cuidados foram tidos no armazenamento e acondicionamento das amostras de solo em laboratório, por forma a evitar alterações desta propriedade.

3.1.2.2.Densidade das partículas sólidas

De acordo com a norma NP 83 (1965), determinou-se a densidade das partículas sólidas (G). O valor obtido foi de 2,56, valor esse, semelhante ao referido por Correia (2011).

3.1.2.3.Limite de Plasticidade e Liquidez

Atterberg definiu limites que fixam o “intervalo de plasticidade” do solo, denominados de limites de liquidez (w_L) e de plasticidade (w_p).

O limite de liquidez corresponde ao teor em água acima do qual o solo adquire o comportamento de um líquido. O limite de plasticidade define o teor em água limite para o qual o solo passa de um comportamento friável para um comportamento moldável. Estas mudanças de estado ocorrem gradualmente no solo devido à variação do teor em água.

Utilizou-se a norma NP 143 (1969), para a determinação destes limites, tendo-se obtido para o limite de liquidez 68% e para o limite de plasticidade 41,9% (valores estes próximos aos obtidos por Correia (2011)). A diferença entre o w_L e w_p designa-se por índice de plasticidade (I_p), apresentando o solo um valor de 26,1%.

3.1.2.4.Teor em matéria orgânica

A matéria orgânica (OM) é composta por resíduos de origem animal e vegetal e, por diversos microorganismos que têm como função decompô-la. Esta exerce enorme influência sobre as características físicas e de plasticidade do depósito em estudo (Coelho, 2000), assim como no processo de estabilização química do solo (Correia, 2011).

Para a determinação do teor em matéria orgânica, o método aplicado foi o das perdas na ignição, adoptando-se como temperatura de referência 50°C e temperatura de ignição 400°C.

Não é aconselhável que esta temperatura seja superior a 400°C, pois acima deste valor verifica-se uma perda de água de hidratação dos minerais (Coelho, 2000).

O teor em matéria orgânica foi obtido de acordo com a norma BS 1377-3 (1990), cujo valor foi de 13,05%, diferente do valor obtido por Correia (2011) (OM=7,96%), mas enquadrado na variação obtida por Coelho (2000) para aquela profundidade.

3.1.2.5. Composição granulométrica

Todos os solos contêm partículas de diferentes tamanhos em variadas proporções. A determinação do tamanho das partículas é definida em percentagem do peso que cada fracção possui em relação à massa total da amostra em análise, denominando-se de composição granulométrica.

De acordo com a norma E 196 (1966), procedeu-se à análise da composição granulométrica, e respectiva curva granulométrica, do solo em estudo (Figura 3.1).

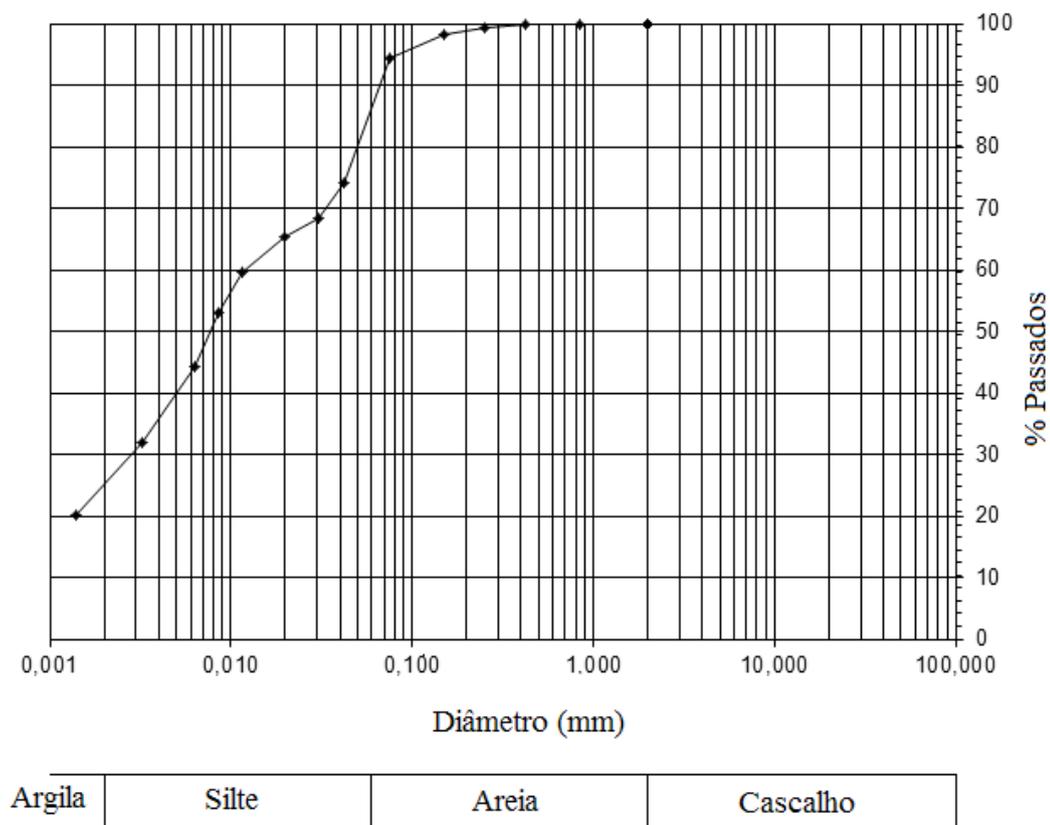


Figura 3.1 – Curva granulométrica do solo em estudo.

Fazendo a análise da curva granulométrica, observa-se que o solo possui cerca de 61% de silte, 25% de argila e 14% de areia, constatando-se que o solo é maioritariamente siltoso.

A partir da sua composição granulométrica e utilizando o triângulo de Feret (Figura 3.2), o solo pode ser classificado como um silte argiloso.

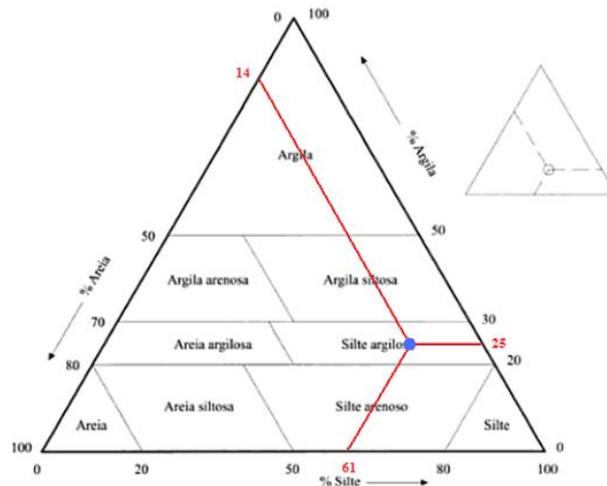


Figura 3.2 – Classificação granulométrica do solo segundo o triângulo de Feret.

3.2.Ligantes

3.2.1.Cimento Portland CEM I 42,5R

Cimento Portland é a denominação técnica do material usualmente conhecido na construção civil como cimento. Foi criado e evidenciado em 1824, por um construtor inglês, chamado Joseph Aspdin. Como em Inglaterra, nessa altura, as construções eram em pedra de cor acinzentada originária de Portland (situada no sul do país) e se assemelhava na cor à sua criação, Aspdin intitulou-a de cimento Portland.

O cimento Portland é um pó fino com propriedades aglomerantes que endurece sob acção da água. É composto essencialmente por óxido de cálcio (CaO), alumina (Al₂O₃), sílica (SiO₂) e por óxido de ferro (Fe₂O₃) O cimento Portland utilizado no trabalho encontra-se caracterizado no Quadro 3.2.

Qualquer solo, com excepção daqueles altamente orgânicos, pode ter as suas propriedades mecânicas melhoradas com a adição de cimento. Quando em contacto com a água produz reacções de hidratação, ganhando assim resistência mecânica. Depois de endurecido, mesmo que seja novamente submetido à acção da água, o cimento Portland não se decompõe mais. A

velocidade com que as reacções de hidratação se processam depende das características específicas dos materiais de base (solo no presente estudo), teor da adição, quantidade de água, temperatura, tempo de cura, condições de cura, entre outros.

Quadro 3.2 – Composição Química dos ligantes utilizados (dados do fabricante).

Ligante	Simbologia	CaO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Sup. esp. Blaine (m ² /kg)
Cimento Portland CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 R	62,84	19,24	4,93	3,17	2,50	3,35	349,0
Escória Granulada de Alto Forno	E	37,02	38,74	11,59	0,85	6,75	0,33	363,0

3.2.2. Escória granulada de alto-forno

Hoje em dia, misturam-se outros materiais ao cimento, chamados aditivos, para lhe conferir características especiais permitindo desta forma obter ganhos económicos, aos quais se adicionam por vezes ganhos ambientais (aquando da reutilização de sub-produtos industriais). Alguns dos aditivos mais comuns são a escória granulada de alto-forno, a cinza volante, a sílica de fumo e a pozolana natural.

O aditivo escolhido, no presente trabalho, para otimizar a mistura solo-cimento foi a escória granulada de alto-forno, cujas características se encontram descritas no Quadro 3.2.

A escória granulada de alto-forno é um subproduto do fabrico do ferro fundido em alto-forno e que, após o seu arrefecimento rápido, por meio de água ou vapor de água, produz um produto vítreo granulado. É constituída especialmente por óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO) e dióxido de silício (SiO₂).

A característica mais importante da escória granulada de alto-forno é a sua capacidade hidráulica, que permite que, quando moída e em contacto com a água, ela endureça, podendo substituir o cimento Portland.

3.3. Fibras de polipropileno: *DuomixM12* e *DuomixM20*

As características de comportamento de cada tipo de fibras estão intimamente relacionadas com a matéria-prima base e o seu processo de fabrico (Feurharmel, 2000). As características dos dois tipos de fibras de polipropileno utilizadas como reforço neste trabalho são seguidamente descritas.

Produzidas pela BEKAERT, tanto as fibras de Polipropileno *DuomixM12* e as *DuomixM20*, são bastante flexíveis e possuem uma superfície específica de $134\text{m}^2/\text{kg}$ e uma resistência à tracção de 250MPa . De acordo com o catálogo do produtor, estas fibras surgem como uma solução adequada para precaver fenómenos de fendilhação e exsudação em pavimentos de betão. Em paralelo, a sua presença no betão reduz a permeabilidade e aumenta a ductilidade do mesmo. Quando adicionadas a um solo quimicamente estabilizado espera-se que melhorem a sua resistência e lhe confirmam maior ductilidade.

As Figuras 3.3 e 3.4 dão conta das suas características geométricas. As *DuomixM12* possuem um comprimento de 12mm e um diâmetro de $32\mu\text{m}$, enquanto que as *DuomixM20*, diferem apenas no seu comprimento, sendo de 20mm .

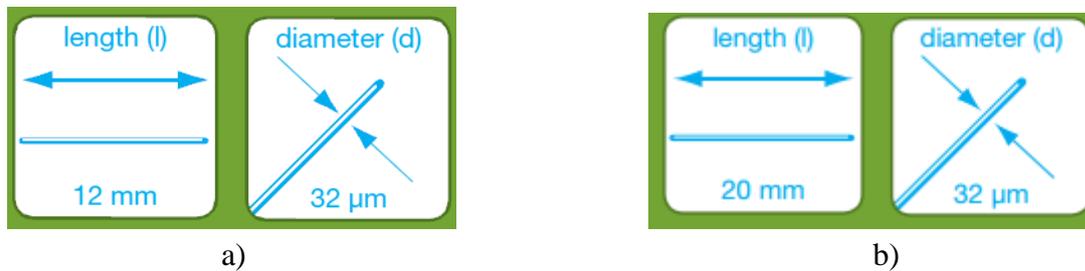


Figura 3.3 – Geometria das Fibras: a) *DuomixM12* e b) *DuomixM20*.



Figura 3.4 – Ilustração comparativa das dimensões das fibras *DuomixM12* e *DuomixM20*.

4. PROCEDIMENTO E PLANO DE ENSAIOS

4.1. Introdução

Neste capítulo será feita uma breve descrição sobre as etapas de preparação das amostras e os métodos utilizados na execução dos ensaios de compressão não confinada (UCS), tracção (T), compressão diametral (CD) e flexão (F).

4.2. Procedimento experimental

A preparação de amostras solo-ligante-fibras compreendeu as seguintes etapas: preparação do solo, mistura, moldagem, cura e desmoldagem, ensaio.

- **Preparação do solo**

Antes da utilização do solo, este era submetido a homogeneização manual, utilizando o teor em água como variável para aferir a qualidade da homogeneização. Tal como anteriormente referido no Capítulo 3, o teor em água objectivo era o correspondente ao teor em água natural do solo, 80,87%.

- **Mistura**

- i. Pesam-se todos os materiais constituintes da amostra: solo, ligantes (cimento e escória granulada de alto-forno na proporção de 75/25, respectivamente, referente à massa seca), fibras e água. A quantidade de cada material é calculada em função do volume da amostra e da dosagem pretendida, tendo sido preparados dois provetes em simultâneo.
- ii. Coloca-se o solo no balde da misturadora, de marca Sammic e modelo BM11 (Figura 4.1), e adiciona-se os ligantes previamente misturados. Seguidamente procedia-se à mistura manual com o objectivo de evitar perdas de ligante no arranque da mistura mecânica.



Figura 4.1 – Misturadora Samic *BM11*.

- iii. De seguida, num processo manual e alternado, vai-se adicionando a água e as fibras, de modo a obter-se uma massa relativamente homogénea, evitando a criação de “ninhos” de fibras.
- iv. Dá-se início à mistura mecânica, com duração de 4 minutos, fazendo-se um intervalo aos 2 minutos para retirar o solo-ligante-fibras que fica colado às paredes interiores do balde e à pá da misturadora.
- v. Por fim, controla-se o teor em água após a mistura e procede-se à introdução desta nos moldes (moldagem). A moldagem deve ser realizada nos 30 minutos seguintes, pois as reacções dos ligantes começam a processar-se no momento em que estes entram em contacto com a água.

o **Moldagem**

Para cada tipo de ensaio existe um molde específico, com material e dimensões diferentes (Figura 4.2). Os moldes utilizados nos ensaios de compressão simples (UCS), tracção (T) e compressão diametral (CD), são cilíndricos e constituídos por PVC. Nos ensaios de flexão (F), os moldes utilizados são metálicos de forma paralelepípedica. No que às dimensões diz respeito, os moldes apresentam-se iguais para os ensaios de UCS e T, com uma altura (h) de 140mm e diâmetro (\emptyset) de 70mm (adoptando-se uma razão de $h/\emptyset = 2$ de acordo com a norma NP EN 12390-1 (2010)). Para os ensaios de CD, o diâmetro (\emptyset) foi o mesmo, de 70mm, mas a altura (h) passou a metade, 70mm (adoptando-se uma razão $h/\emptyset = 1$ de acordo com a norma NP EN 12390-6 (2010)). Por último, o molde do ensaio de F, por ser paralelepípedico, possui uma secção transversal (hxb) de 70x70mm, e comprimento (l) de 140mm.

Seguidamente, é descrita a moldagem para os ensaios de UCS, T e CD, e posteriormente para os ensaios de F, nos quais se utiliza um molde específico.

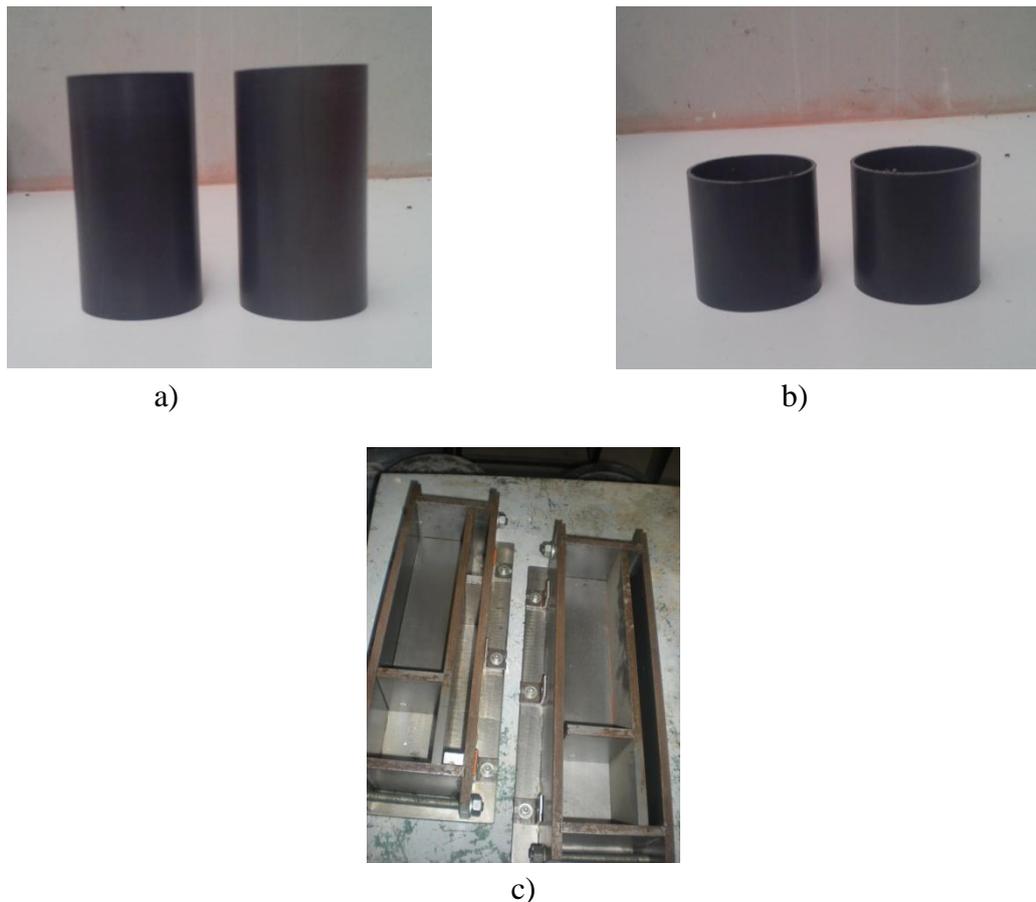


Figura 4.2 – a) Moldes em PVC para ensaios de UCS e T; b) Moldes em PVC para ensaios de CD; c) Moldes metálicos para ensaios de F.

- Ensaio UCS, T e CD:

- Unta-se o interior das paredes do molde com vaselina.
- Na base do molde é colocada película aderente à qual se sobrepõe papel de acetato com a forma e diâmetro do provete. Por fim, a base do molde é “reforçada” com fita-cola, aplicada pelo exterior do molde, garantindo-se desta forma um bom suporte para a amostra.

De referir que estes dois pontos eram feitos após a preparação do solo e antes da mistura, pelas razões indicadas no ponto v da etapa mistura.

- Imediatamente após a mistura, a amostra é compactada no interior do molde em 3 camadas de espessuras mais ou menos idênticas, excepto para as amostras dos ensaios de CD, as quais eram compactadas em apenas 2 camadas, uma vez que o molde exibe menor altura. Cada camada é apiloada com o auxílio de uma vara, por forma a eliminar-se a possível existência de vazios e, de seguida, é aplicada uma pequena pressão estática com uma peça compactadora.

-
- iv. Utiliza-se uma alonga, na última camada, por forma a garantir que o molde fique totalmente preenchido.
 - v. Retira-se a alonga e rasa-se cuidadosamente o molde com a ajuda de espátulas e colher de pedreiro, preenchendo qualquer vazio eventualmente formado.
 - vi. Concluídos os 2 moldes, estes são colocados no interior de um saco de plástico, o qual é selado para evitar mudanças no seu teor de humidade.
 - vii. As amostras são levadas para a câmara termohigrométrica, a qual se encontra à temperatura de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e humidade relativa de $95\pm 5\%$, onde se conservam pelo tempo de cura requerido até serem desmoldadas.
- Ensaio de F:
 - i. Pincela-se as paredes interiores do molde com óleo de descofragem e unta-se com vaselina as suas arestas de forma a garantir a estanqueidade do molde.
 - ii. Preenche-se o molde em 2 camadas, cada uma das quais é apiloada e compactada.
 - iii. Coloca-se cada um dos moldes dentro de uma caixa de plástico, tapando-se em toda a volta com película aderente e fita-cola. Cada caixa é devidamente identificada.
 - iv. No final, depositam-se as caixas, com o respectivo molde, na câmara termohigrométrica (temperatura= $20\pm 2^{\circ}\text{C}$; humidade relativa= $95\pm 5\%$), até serem desmoldadas.
 - **Cura e Desmoldagem**
 - Ensaio UCS, T e CD:

Após 7 dias, extraem-se os provetes dos moldes com o auxílio de um extractor hidráulico e voltam-se a colocar nos sacos e na câmara termohigrométrica.
 - Ensaio de F:

Os provetes são retirados dos moldes manualmente ao fim de 3 dias de cura. A redução do tempo de cura de 7 para 3 dias, deve-se a motivos logísticos, pois apenas se tinham disponíveis dois moldes paralelepípedicos.
 - **Ensaio**

Ao perfazerem o tempo de cura de 28 dias, os provetes são retirados da câmara termohigrométrica, sendo ensaiados de imediato. Após o ensaio, é realizado novo controlo do teor em água das amostras.
-

4.3. Descrição dos ensaios

Neste ponto, será descrito o plano de ensaios para aferir o comportamento do solo mole do Baixo Mondego estabilizado quimicamente com ligantes e fibras. No Quadro 4.1. são apresentados os 4 tipos de ensaios realizados (compressão uniaxial (UCS), tracção (T), compressão diametral (CD) e flexão (F)); e as variáveis objecto de estudo: dosagem de ligante (125, 250, 375 e 500 Kg/m³); dosagem de fibra (25, 50, 75 e 100 Kg/m³); tipo de fibras de polipropileno (*DuomixM12* e *DuomixM20*); e ainda a conjugação entre as referidas dosagens (quer de ligantes quer de fibras). Para os ensaios de T e F usaram-se apenas as dosagens de 375 e 500 kg/m³. De notar que se teve como referência a dosagem de ligante correspondente a 375 kg/m³ e dosagem de fibras de 50 kg/m³. De referir que apenas para o tipo de fibra *DuomixM20* se usaram as dosagens adoptadas como referência, tanto de ligante como de fibras, para a realização dos ensaios.

Ainda no mesmo quadro, especifica-se a nomenclatura usada para caracterizar cada tipo de ensaio. As letras iniciais são as referentes ao tipo de ensaio (UCS, T, CD e F), seguindo-se o valor da dosagem de ligante em kg/m³, o tipo de fibra diferenciado em M12 ou M20 (*DuomixM12* ou *DuomixM20*, respectivamente), a indicação de que as fibras são de polipropileno (P) e, finalmente, a dosagem de fibra expressa em kg/m³.

Quadro 4.1 – Esquema de ensaios.

Fibras	Dosagem de Ligante (kg/m ³)	Dosagem de Fibras (kg/m ³)	Tipo de Ensaio			
			UCS	T	CD	F
Sem fibras	125	-	UCS125	-	CD125	-
	250	-	UCS250	-	CD250	-
	375	-	UCS375	T375	CD375	F375
	500	-	UCS500	T500	CD500	F500
<i>Duomix M12</i>	375	25	UCS375_M12P25	T375_M12P25	CD375_M12P25	F375_M12P25
	375	50	UCS375_M12P50	T375_M12P50	CD375_M12P50	F375_M12P50
	375	75	UCS375_M12P75	T375_M12P75	CD375_M12P75	F375_M12P75
	375	100	UCS375_M12P100	T375_M12P100	CD375_M12P100	F375_M12P100
	125	50	UCS125_M12P50	-	CD125_M12P50	-
	250	50	UCS250_M12P50	-	CD250_M12P50	-
	500	50	UCS500_M12P50	T500_M12P50	CD500_M12P50	F500_M12P50
<i>Duomix M20</i>	375	50	UCS375_M20P50	T375_M20P50	CD375_M20P50	F375_M20P50

4.3.1. Ensaio de compressão simples não confinada (UCS)

4.3.1.1. Procedimento do ensaio

O ensaio de UCS foi realizado de acordo com a norma NP EN 12390-3 (2011). Os provetes foram testados na prensa universal do Laboratório de Geotecnia (Figura 4.3), onde, por meio de uma célula de carga e de um transdutor de deslocamento é registado automaticamente a força vertical e a deformação axial. Em todos os ensaios foi aplicada uma velocidade constante de 0,35mm/min (correspondente a 0,25%/min referida à altura do provete).

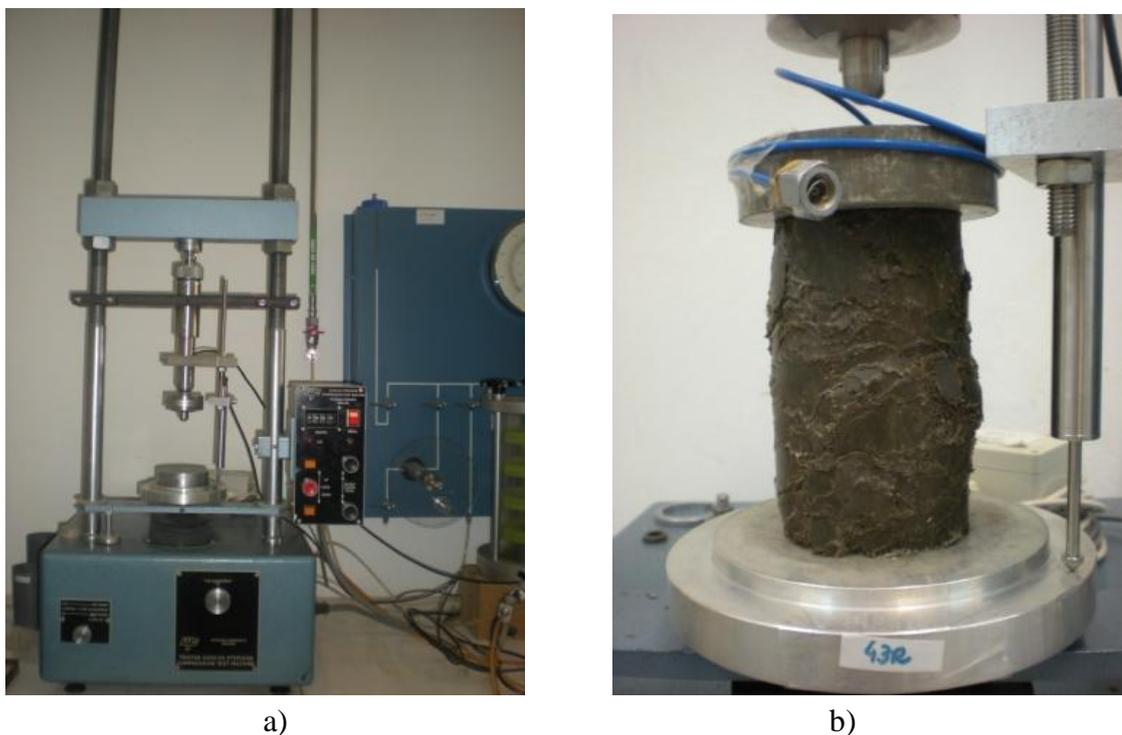


Figura 4.3 – a) Prensa universal WYKEHAM FARRANCE LTD *Tristar 5000kg*; b) Aspecto final de uma amostra após ensaio de UCS.

4.3.1.2. Determinação de parâmetros

A resistência à compressão simples (q_u) é calculada pela relação entre a força vertical aplicada (F) e a área do provete (A) (Equação 4.1). Para este cálculo, a área não vai ser a correspondente à área inicial, mas sim a uma área corrigida (A_{corr}), ou seja, a amostra ao ser carregada axialmente sem qualquer confinamento lateral vai sofrer deformações radiais, às quais corresponderá uma nova área transversal (Equação 4.2).

$$q_u = \frac{F}{A} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

$$A_{corr} = \frac{\pi \times D^2}{4 \times \left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right)} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

A extensão axial (ε) é determinada pela relação entre a variação do deslocamento ($\Delta\delta$) e a altura (h) da amostra, tomando-se por válida a hipótese simplificativa de distribuição uniforme da deformação na amostra (Equação 4.3).

$$\varepsilon = \frac{\Delta\delta}{h} \times 100 \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Os parâmetros obtidos, tensão e extensão, podem ser representados num gráfico, no qual é comum observar um *bedding-error*, que não é mais do que um erro induzido por um ajuste inicial entre o equipamento e a amostra. Gráficamente, o *bedding-error* é bem perceptível no início do traçado da curva tensão-deformação em que se verifica a não linearidade dos pontos (Figura 4.4 a)). Refira-se que desta correcção não resulta qualquer alteração na tensão máxima de rotura ($q_u^{\text{máx}}$) nem no módulo de deformabilidade (E_u).

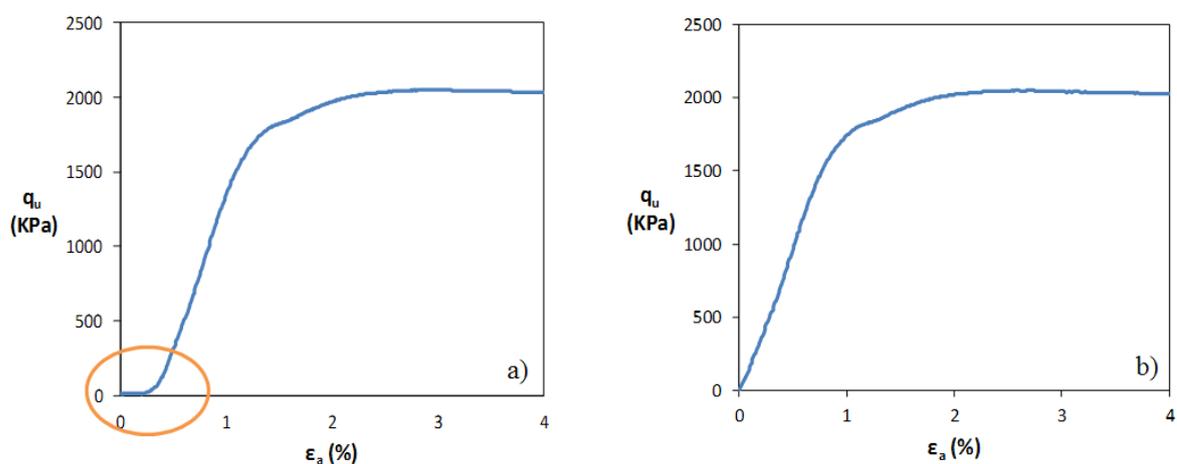


Figura 4.4 – Gráfico do ensaio UCS375_M12P50_1: a) curva original com o efeito do *bedding-error* (representado dentro da elipse); b) após correcção do *bedding-error*.

4.3.2. Ensaios de tração simples (T)

4.3.2.1. Procedimento do ensaio

Sabe-se que o solo tem uma baixa, ou nula, resistência à tracção em relação à resistência à compressão. A determinação directa da resistência à tracção é dificultada pela forma como se fixa as extremidades do provete para que este possa ser traccionado. No presente trabalho, para resolver este aspecto, o método utilizado foi a colagem (através de resinas) de topos

circulares em aço (com um diâmetro igual ao da amostra e com 2cm de espessura) nas suas extremidades. Este processo era elaborado 24h antes da realização do ensaio propriamente dito para que a resina tivesse tempo de secar. Terminadas as 24h, a amostra estava pronta a ser ensaiada (Figura 4.5), conforme a norma ASTM CRD-C 164-92. Também aqui, eram registadas automaticamente por meio de computador a força axial aplicada e a respectiva deformação. A velocidade de deformação aplicada foi de 0,042mm/min (correspondente a 0,06%/min referida à altura da amostra), valor correspondente à mínima velocidade admitida pela prensa.



a)



b)



c)

Figura 4.5 – a) Prensa de ensaios SERVOSIS MUF 404/100; b) Aspecto da amostra durante o ensaio de T; c) Aspecto final da amostra após ensaio de T.

4.3.2.2. Determinação de parâmetros

A resistência à tracção (q_t) é determinada pela Equação 4.1, onde F representa a força vertical aplicada e A a área transversal da amostra. Da mesma forma que para os ensaios UCS, a área transversal é determinada pela Equação 4.2 assim como a extensão axial pela Equação 4.3. Os parâmetros assim avaliados (q_t e ε) são usualmente representados em gráficos tensão-deformação.

4.3.3. Ensaios de compressão diametral (CD)

4.3.3.1. Procedimento do ensaio

Dada a dificuldade em se avaliar a resistência à tracção por ensaios de tracção directa, pode-se obter a resistência à tracção através de métodos indirectos em que outros esforços, que não os de tracção, são aplicados (Lobo Carneiro, 1943; Schubert, 1945; Heibrock et al, 2003).

Assim, o ensaio que se usou neste trabalho para esse fim foi o de compressão diametral. Este ensaio foi realizado na mesma prensa do ensaio à compressão simples, respeitando as normas NP EN 12390-6 (2011) e NP EN 13286-42 (2011). Desta vez, a amostra é colocada longitudinalmente, apoiada em dois frisos metálicos diametralmente opostos (Figura 4.6). Nestes são aplicadas forças de compressão até se atingir a rotura por tracção da amostra. No decorrer do ensaio registam-se automaticamente a força vertical aplicada e o deslocamento medido segundo a direcção da força. A velocidade de deformação imposta foi de 0,175mm/min (correspondente a 0,25% referida ao diâmetro da amostra), Figuras 4.7.

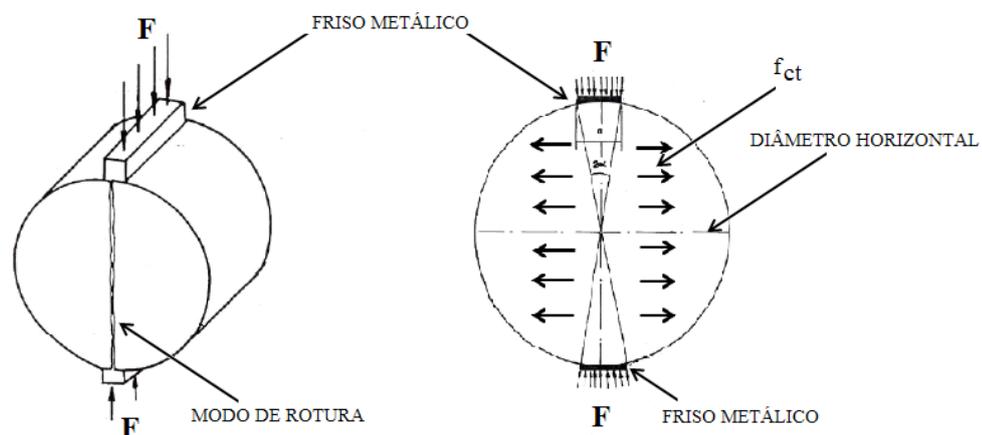


Figura 4.6 – Esquema de funcionamento do ensaio (adaptado de Conterato, 2011).



Figura 4.7 – Aspecto da amostra durante o ensaio de CD.

4.3.3.2. Determinação de parâmetros

A compressão diametral dos provetes origina uma tensão transversal de tracção (f_{ct}), tomada por uniforme ao longo do diâmetro vertical (Figura 4.5), sendo calculada pela Equação 4.5 (Frocht, 1948):

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

onde F é a força vertical máxima, L é o comprimento longitudinal da amostra e, d é o diâmetro da amostra.

4.3.4. Ensaio de flexão (F)

4.3.4.1. Procedimento do ensaio

Os ensaios de flexão foram realizados de acordo com o estabelecido na norma NP EN 12390-5 (2009). Para a sua execução, dois apoios (roletes) são colocados na parte inferior da amostra e posicionados junto às extremidades, centrados em relação ao rolete superior (ponto de aplicação da carga) (Figura 4.8). A amostra de superfícies planares é então posicionada sobre os dois apoios inferiores, procedendo-se ao ajuste do rolete superior na prensa de ensaios universais SERVOSIS MUF 404/100. Posto isto, inicia-se o ensaio impondo uma velocidade de deformação de 0,042mm/min (correspondente a 0,06% referida à dimensão lateral do provete). Durante o ensaio registam-se os valores da força (F) e da flecha a meio vão, Figura 4.9.

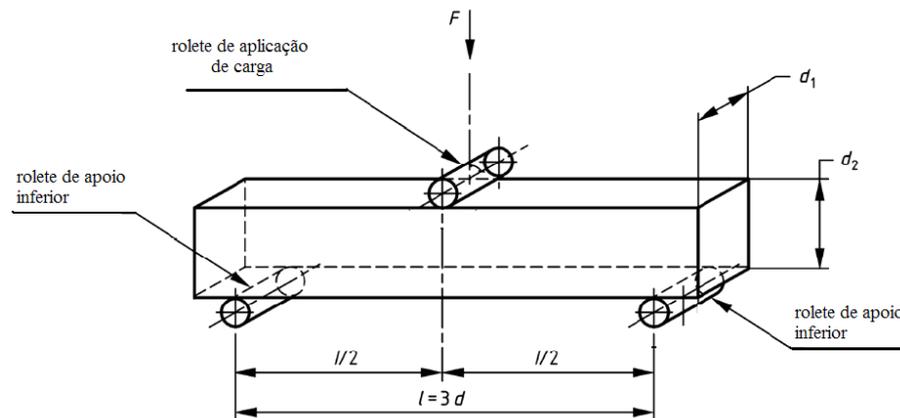


Figura 4.8 – Esquema de ensaio F, adaptado da norma EN 12390-5 (2009).

4.3.4.2. Determinação de parâmetros

A resistência à flexão (f_{cf}) pode ser facilmente determinada a partir dos princípios da resistência dos materiais, sendo dada pela Equação 4.6:

$$f_{cf} = \frac{3 \times F \times L}{2 \times d_1 \times d_2^2} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

onde F representa a força máxima medida, L a distância entre os apoios inferiores ($3 \times d = 240\text{mm}$, sendo $d = 70\text{mm}$), e d_1 e d_2 as dimensões laterais da amostra ($d_1 = d_2 = 70\text{mm}$).

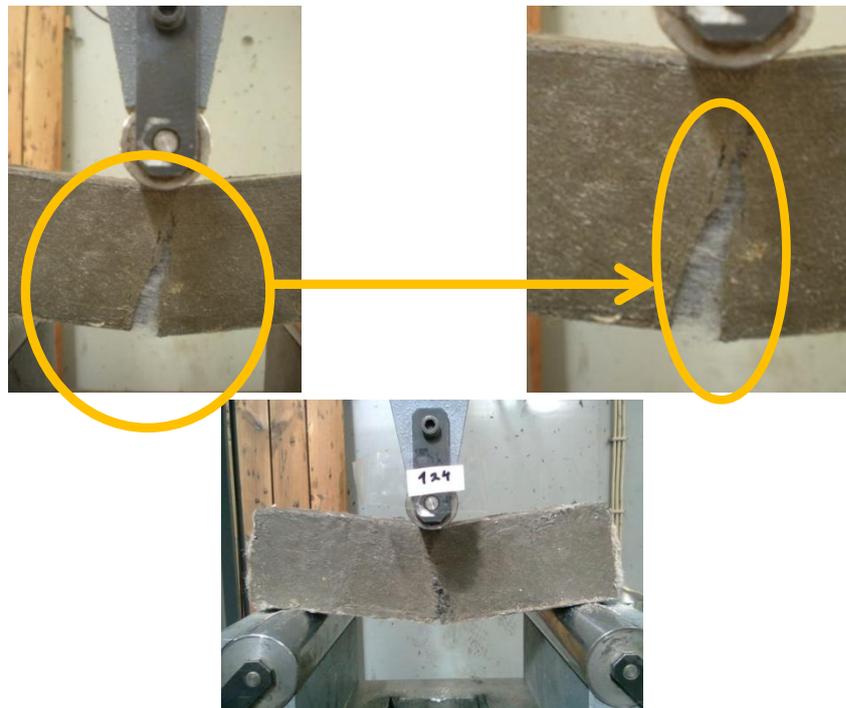


Figura 4.9 – Aspecto da amostra durante o ensaio de F.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1. Introdução

Ao longo deste capítulo pretende-se analisar a influência da dosagem de fibras, da dosagem de ligante e do tipo de fibras (*DuomixM12* e *DuomixM20*), no comportamento do solo mole do Baixo Mondego quimicamente estabilizado. Para este estudo foram realizados quatro tipos de ensaios laboratoriais: compressão simples (UCS), tracção simples (T), compressão diametral (CD) e flexão simples (F). Os resultados obtidos serão apresentados e analisados nas secções seguintes.

5.2. Ensaio de Compressão Simples (UCS)

O Quadro 5.1 expõe um resumo dos resultados obtidos sobre provetes de solo quimicamente estabilizado sujeitos a ensaios UCS, com e sem adição de fibras de polipropileno. O quadro contempla os valores obtidos para a resistência à compressão simples ($q_u^{máx}$), extensão axial de rotura (ϵ_a), módulo de deformabilidade secante definido para um nível de tensão de 50% da tensão máxima (E_{u50}) e, o teor em água final (w_f) medido após a realização dos ensaios UCS. Acrescentam-se ainda os valores médios dos parâmetros mencionados uma vez que foram realizados dois provetes para cada mistura. Dentro de parênteses é indicado o desvio percentual dos resultados face ao valor médio.

Quadro 5.1 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de compressão simples (UCS).

Fibras	Ensaio	$q_u^{máx}$ (kPa)	$q_u^{méd}$ (kPa)	ϵ_a (%)	$\epsilon_a^{méd}$ (%)	E_{u50} (MPa)	$E_{u50}^{méd}$ (MPa)	w_f (%)	$w_f^{méd}$ (%)
Sem	UCS125_1	196,1	209,2	1,524	1,991	25,99	31,29	93,98	94,13
	UCS125_2	222,2	(6,2%)	2,457	(23,4%)	36,58	(16,9%)	94,28	(0,2%)
	UCS250_1	1531	1566,1	1,303	1,185	154,42	163,75	79,97	79,98
	UCS250_2	1601,1	(2,2%)	1,066	(10%)	173,07	(5,7%)	79,98	(≈0%)
	UCS375_1	2756,4	2623,5	1,449	1,432	201,79	193,12	68,65	68,68
	UCS375_2	2490,6	(5,1%)	1,414	(1,2%)	184,44	(4,5%)	68,70	(≈0%)
	UCS500_1	3348,7	3226,6	0,764	0,833	522,73	517,76	58,85	59,38
	UCS500_2	3104,5	(3,8%)	0,901	(8,2%)	512,78	(1,0%)	59,90	(0,9%)
Duomix M12	UCS375_M12P25_1	2115,5	2105,4	2,465	2,364	155,6	152,9	75,15	75,15
	UCS375_M12P25_2	2095,4	(0,4%)	2,264	(4,2%)	150,1	(1,7%)	75,15	(0%)
	UCS375_M12P50_1	2173,0	2111,0	2,850	2,719	162,9	160,8	75,65	75,65
	UCS375_M12P50_2	2049,0	(2,9%)	2,588	(4,8%)	158,8	(1,3%)	75,65	(0%)
	UCS375_M12P75_1	2481,9	2416,2	14,848	15,747	173,7	174,2	75,68	75,68
	UCS375_M12P75_2	2350,5	(4,2%)	16,646	(5,7%)	174,6	(0,2%)	75,68	(0%)
	UCS375_M12P100_1	3167,1	2939,2	17,511	17,896	192,9	184,3	75,01	75,01
	UCS375_M12P100_2	2711,2	(7,7%)	18,281	(2,1%)	175,7	(4,6%)	75,01	(0%)
	UCS125_M12P50_1	487,3	449,7	19,628	12,604	31,4	27,4	89,76	89,76
	UCS125_M12P50_2	412,1	(8,3%)	5,581	(55,7%)	23,5	(14,5%)	89,76	(0%)
	UCS250_M12P50_1	1628,3	1589,8	10,969	7,294	87,3	85,8	79,64	79,64
	UCS250_M12P50_2	1551,4	(2,4%)	3,620	(50,3%)	84,3	(1,7%)	79,64	(0%)
UCS500_M12P50_1	2929,5	3033,2	3,761	2,940	247,0	243,8	67,22	67,22	
UCS500_M12P50_2	3137,0	(3,4%)	2,120	(27,9%)	240,5	(1,3%)	67,22	(0%)	
Duomix M20	UCS375_M20P50_1	1798,3	1777,5	29,752	19,445	54,3	56,8	74,84	74,84
	UCS375_M20P50_2	1756,8	(1,1%)	9,138	(53,0%)	59,3	(4,4%)	74,84	(0%)

NOTA: Dentro de parênteses aparece o desvio percentual dos resultados em relação ao valor médio de ambos.

5.2.1. Ensaio de UCS - provetes sem fibras

Nas Figuras 5.1 e 5.2 apresenta-se a influência da variação da dosagem de ligante (125 a 500Kg/m³) na resistência à compressão simples de provetes estabilizados quimicamente sem adição de fibras.

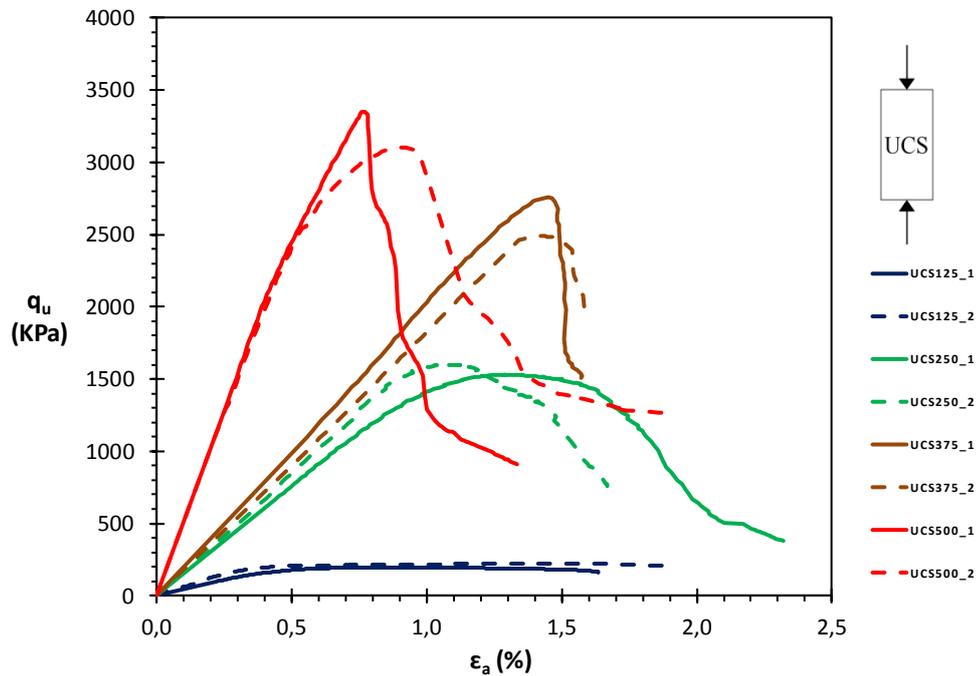


Figura 5.1 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados em provetes sem fibras: variação da dosagem de ligante.

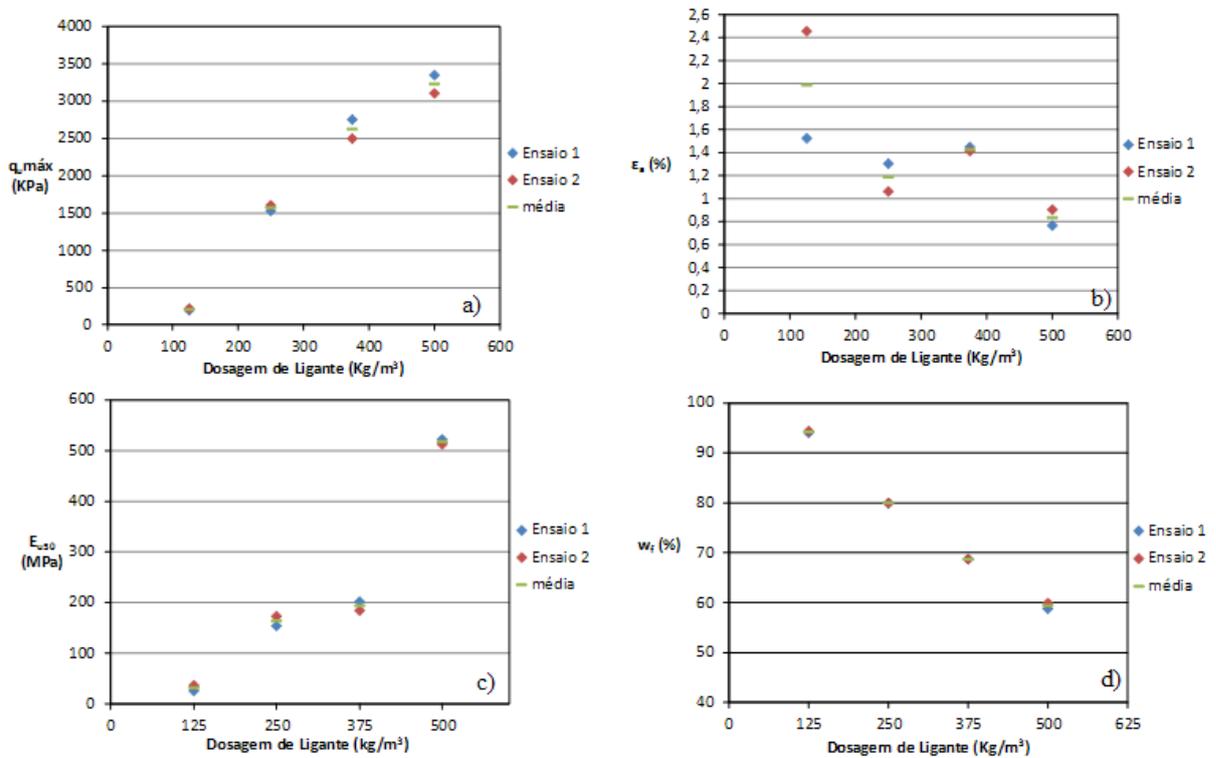


Figura 5.2 – Ensaios UCS realizados em provetes sem fibras – análise da evolução de: a) $q_u^{máx}$; b) ϵ_a ; c) E_{cu50} e d) w_f com a variação da dosagem de ligante.

De acordo com o expectável, observa-se um aumento da resistência à compressão simples com o aumento da dosagem de ligante, sendo esta variação aproximadamente linear, como se pode observar na Figuras 5.2a). O aumento da dosagem de ligante origina também o aumento de E_{u50} (Figura 5.2c)), com a conseqüente diminuição de ϵ_a (Figura 5.2b)). Este comportamento está associado ao incremento das ligações cimentícias estabelecidas entre as partículas de solo, devido ao aumento da quantidade de ligante adicionado à mistura, tornando a matriz do solo mais rígida, o que se traduz no aumento da resistência e na redução da deformabilidade.

De um modo geral, verifica-se que os resultados obtidos para os pares de provetes (ensaiados em condições idênticas) são semelhantes, tanto em termos da evolução da curva $q_u-\epsilon_a$ (Figura 5.1) como da resistência máxima (Quadro 5.1), o que evidencia a qualidade dos ensaios (garantia de reprodutibilidade). A variação dos resultados face ao valor médio enquadra-se no intervalo de variação preconizado na norma NP EN 206-1, que estabelece como critério de conformidade uma variação máxima de 15% em relação à média do par de ensaios.

De notar, que para o par UCS125 registaram-se valores de extensão muito distintos não respeitando o critério de conformidade adoptado. No entanto, da observação das curvas tensão-extensão do referido par (Figura 5.1), observa-se um considerável patamar com grande variação da deformação, mas sem variação significativa da resistência, levando a que o valor da extensão correspondente à rotura (definido como o ponto de resistência máxima) apresente elevada variabilidade.

Os valores encontrados para o teor em água final apresentam uma variação lógica, dado tenderem a decrescer com o aumento da dosagem de ligante, reflectindo um maior “consumo” de água nas reacções cimentícias.

5.2.2. Ensaio de UCS - provetes com fibras *DuomixM12*

5.2.2.1. Influência da dosagem de fibras

As Figuras 5.3 e 5.4 ilustram a influência da variação da dosagem de fibras *DuomixM12* de 25 a 100Kg/m³, na resistência à compressão simples de provetes preparados com uma dosagem de ligante de 375Kg/m³ (valor tomado como referência).

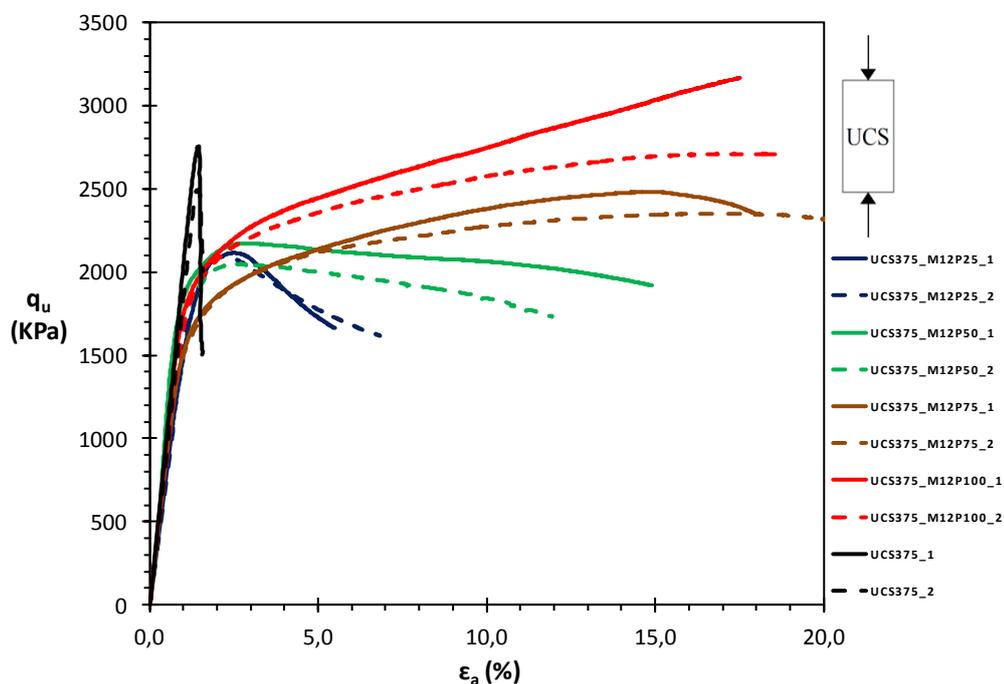


Figura 5.3 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados em provetes com fibras *DuomixM12* por variação da dosagem de fibras (dosagem de ligante = 375 kg/m^3).

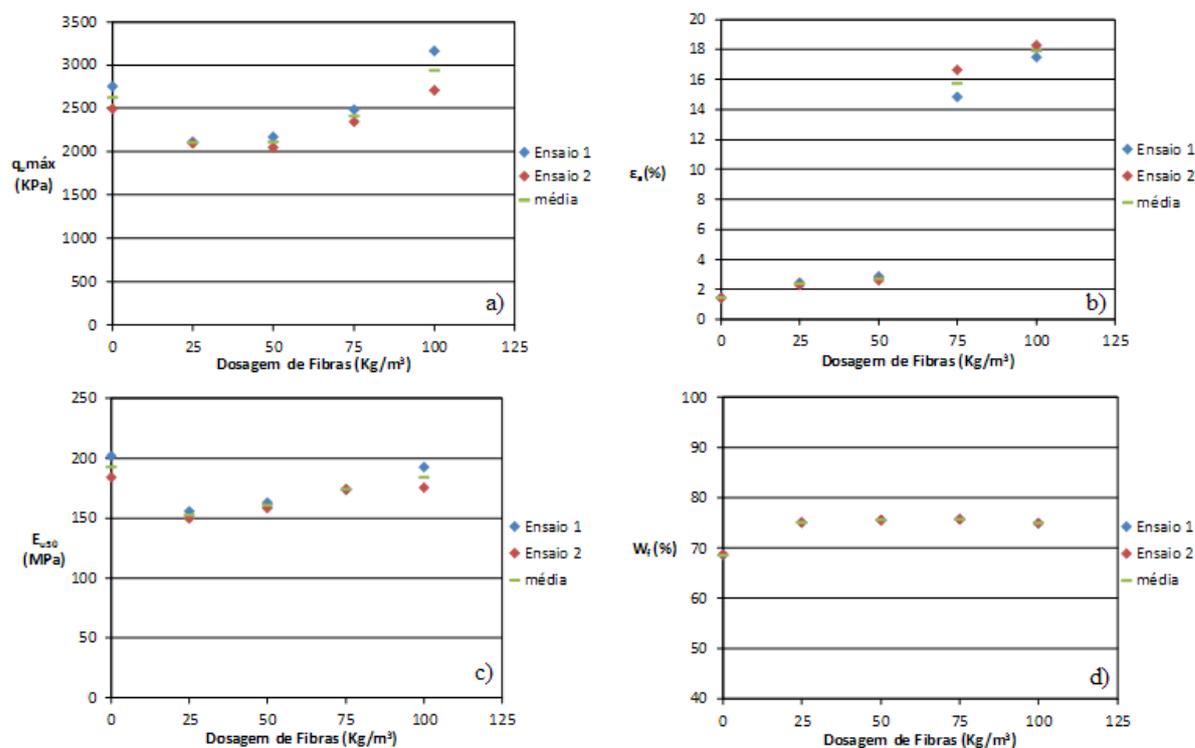


Figura 5.4 – Ensaios UCS realizados em provetes com fibras *DuomixM12* e igual dosagem de ligante (375 kg/m^3) – análise da evolução de: a) $q_{u\text{máx}}$; b) ϵ_a ; c) E_{u50} e d) w_f com a variação da dosagem de fibras.

Numa primeira observação das curvas tensão-extensão (Figura 5.3), é claramente visível uma mudança de comportamento do solo estabilizado devido à adição de fibras. Enquanto que no solo estabilizado sem fibras se constata a existência de um comportamento frágil, caracterizado por um pico de resistência seguido de uma queda brusca, já no solo reforçado com fibras verifica-se o aumento da ductilidade do comportamento com o aumento da dosagem de fibras.

Comparando os ensaios com adição de fibras (Quadro 5.1 e Figuras 5.3 e 5.4) com os resultados do par UCS375 (sem fibras), é perceptível que existe uma perda parcial da resistência fruto da adição de fibras ao solo. Assim, para dosagens de fibras de 25 Kg/m^3 , 50 Kg/m^3 e 75 Kg/m^3 verifica-se uma perda de resistência na ordem dos 24,6%, 24,3% e 8,6%, respectivamente, enquanto que para a dosagem de 100 Kg/m^3 se regista um ligeiro ganho de resistência de 12% (registre-se que este ganho ocorre ao nível das grandes deformações). O facto de a resistência não aumentar com a adição de fibras ao solo estabilizado parece estar relacionado com o facto de, para os níveis de deformação em que se dá a rotura das ligações cimentícias no solo estabilizado, não se ter mobilizado a resistência à tracção das fibras (o que só acontece para elevados níveis de deformação).

A Figura 5.4c) revela, em relação ao par UCS375, uma ligeira diminuição da rigidez quando se adicionam as fibras, nomeadamente para pequenas dosagens. Estas diferenças estão eventualmente associadas à redução do número e da densidade das ligações cimentícias devido à presença das fibras na mistura. Por outro lado, observa-se que com o aumento da dosagem de fibras, há um ligeiro aumento do módulo de deformabilidade, o que aparentemente é incoerente com a explicação acima adiantada. No entanto se atendermos à magnitude dos valores, constata-se que a variação observada no E_{u50} para as quatro dosagens de fibras, se enquadra dentro do critério de conformidade adoptado.

No que diz respeito às extensões de rotura, verifica-se um valor elevado para os ensaios UCS375_M12P75 e UCS375_M12P100 (Figura 5.4b), o que está directamente relacionado com o critério de rotura, explicado na secção anterior. Em relação ao teor em água final (Figura 5.4d)) não há variação significativa com a inclusão de fibras já que estas são inertes à água e a dosagem de ligante se mantém inalterada.

5.2.2.2. Influência da dosagem de ligante

As Figuras 5.5 e 5.6 mostram os resultados obtidos em ensaios UCS realizados em provetes com igual dosagem de fibras *DuomixM12* (50 Kg/m^3 , valor tomado como referência), e diferentes dosagens de ligante.

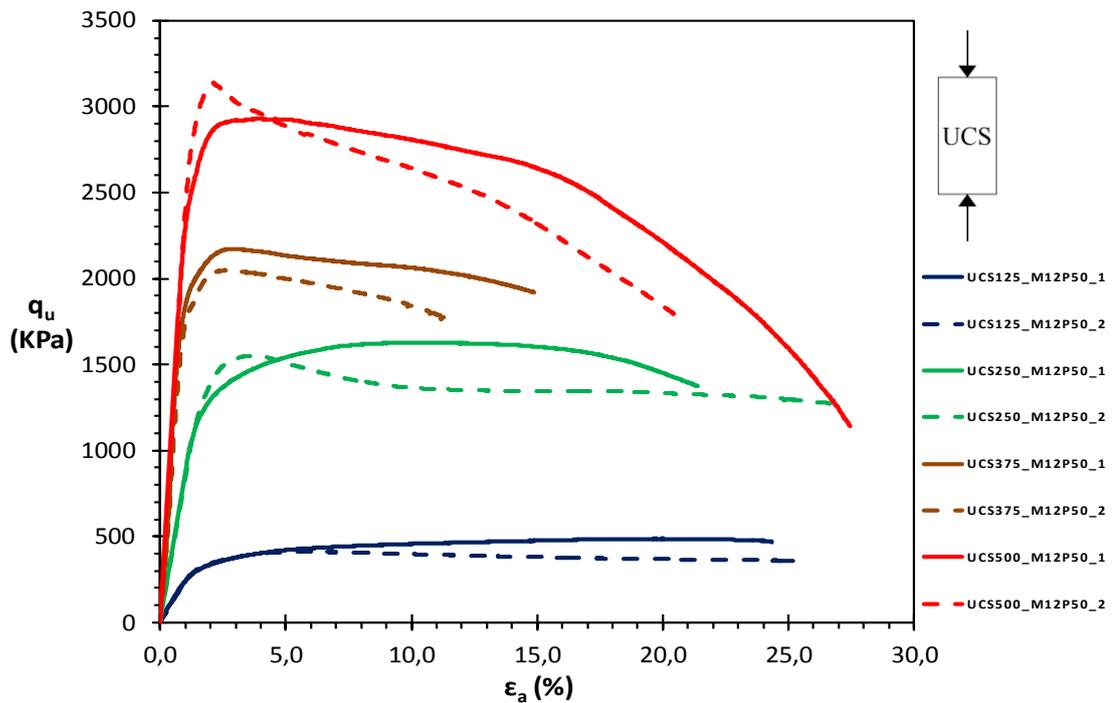


Figura 5.5 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados em provetes com fibras *DuomixM12* por variação da dosagem de ligante (dosagem de fibras = 50 kg/m^3).

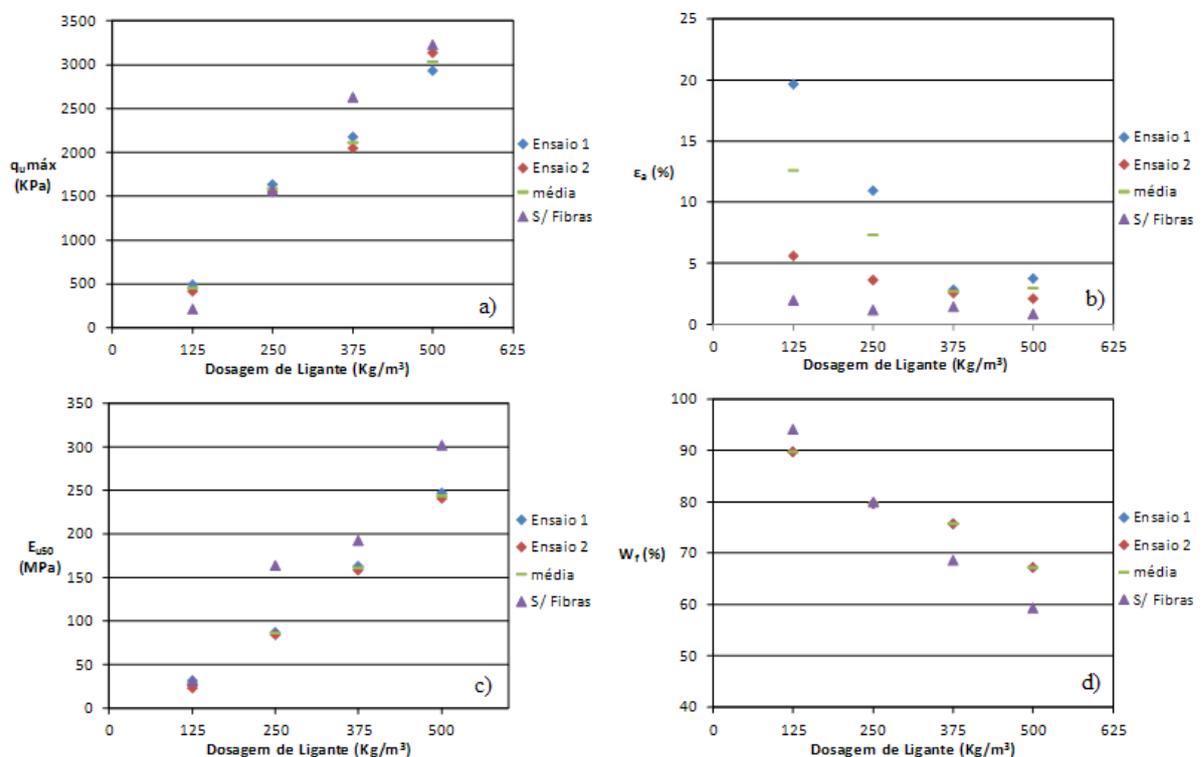


Figura 5.6 – Ensaios UCS realizados em provetes com fibras *DuomixM12* (na dosagem de 50 kg/m^3): análise da evolução de: a) $q_u^{\text{máx}}$, b) ϵ_a ; c) E_{u50} e d) w_f com a variação da dosagem de ligante.

De um modo geral, é notório o aumento da resistência à compressão simples e do módulo de deformabilidade à medida que se aumenta a dosagem de ligante, comprovando uma vez mais que o comportamento até à rotura é essencialmente controlado pela dosagem de ligante. Confrontando-se estes resultados com os obtidos nos provetes sem fibras, constata-se de novo que a inclusão de fibras não é benéfica, em termos gerais, para o comportamento mecânico (registe-se que o ligeiro aumento observado para a dosagem de 125Kg/m^3 se deve ao critério de rotura adoptado, conforme anteriormente explicado).

No que toca aos valores obtidos pelas extensões de rotura, verificou-se uma não conformidade para os ensaios UCS125_M12P50 e UCS250_M12P50, explicado mais uma vez pelo critério de rotura adoptado.

Como seria expectável, e em consonância com o observado na Figura 5.6d), regista-se uma diminuição do teor em água com o aumento da dosagem de ligante, facto explicado pelo aumento das reacções cimentícias as quais induzem um maior “consumo” de água.

5.2.3. Influência do tipo de fibra *DuomixM20* (comprimento da fibra)

Na Figura 5.7 comparam-se as curvas tensão-deformação obtidas em ensaios UCS com adição de fibras *DuomixM12* ($l=12\text{mm}$) e *DuomixM20* ($l=20\text{mm}$), com comprimento distinto. Ambos os ensaios se reportam à mesma dosagem de ligante e de fibras, 375 e 50Kg/m^3 , respectivamente, valores adoptados como referência.

Comprova-se pela Figura 5.7, que o aumento do comprimento da fibra (*DuomixM20*) origina a redução da resistência e rigidez do material. Estes resultados parecem evidenciar que o aumento da amarração das fibras à matriz cimentícia, induzido pelo incremento do comprimento, não é relevante, sendo as fibras *DuomixM12* mais eficazes, para a mesma dosagem de ligante, já que ocorrem em maior número no interior do provete, aumentando o número potencial de fibras a intersectar possíveis planos de rotura. Por outro lado, observa-se que o aumento do comprimento das fibras induz o aumento da ductilidade do material, fruto da melhoria de amarração das fibras.

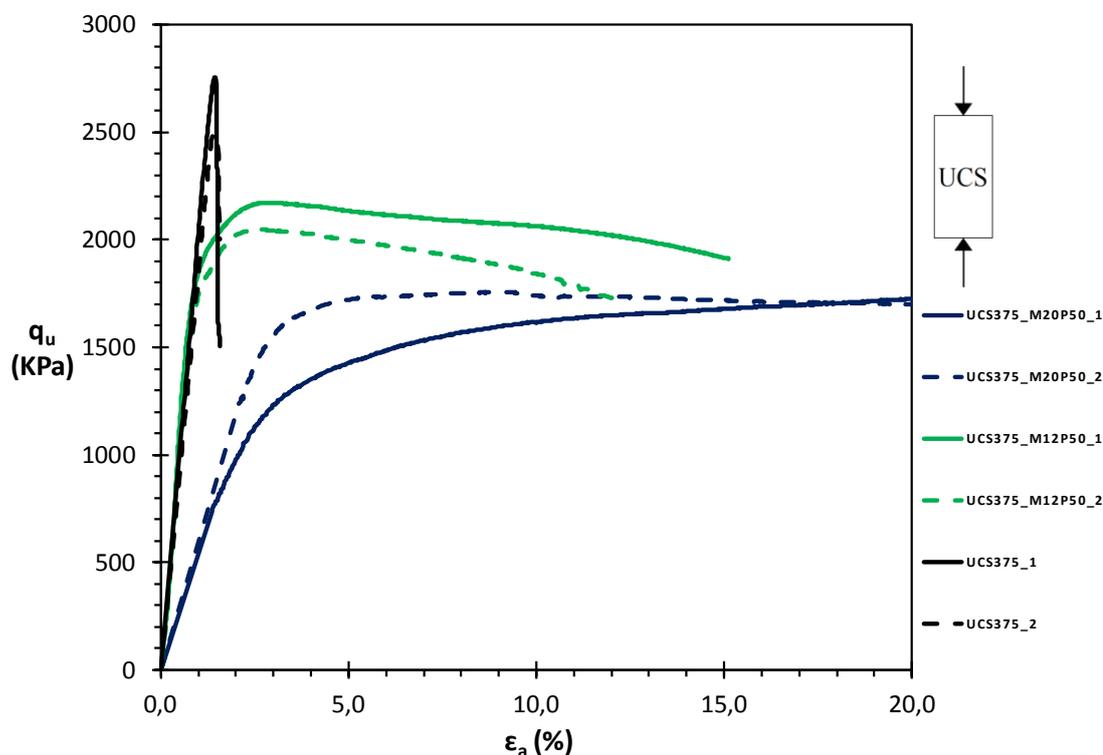


Figura 5.7 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados em provetes com e sem incorporação de fibras de dois tipos: *DuomixM12* e *DuomixM20* (dosagem de fibras = 50kg/m^3 ; dosagem de ligante = 375 kg/m^3).

5.3. Ensaio de Tracção Simples (T)

O Quadro 5.2 resume os resultados dos ensaios de tracção realizados sobre provetes de solo quimicamente estabilizado, com e sem adição de fibras de polipropileno. O quadro apresenta os valores da resistência à tracção simples ($q_t^{\text{máx}}$), da extensão axial de ruptura (ϵ_a), do módulo de deformabilidade secante definido para um nível de tensão de 50% (E_{u50}) e, do teor em água final (w_f). Acrescentam-se ainda os valores médios dos parâmetros mencionados uma vez que foram realizados dois provetes para cada mistura. Dentro de parênteses é indicado o desvio percentual dos resultados face ao valor médio.

Quadro 5.2 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de tracção simples (T).

Fibras	Ensaio	$q_t^{máx}$ (kPa)	$q_t^{méd}$ (kPa)	ε_a (%)	$\varepsilon_a^{méd}$ (%)	E_{u50} (MPa)	$E_{u50}^{méd}$ (MPa)	w_f (%)	$w_f^{méd}$ (%)
Sem	T375_1	411,2	378,6	0,031	0,028	1316,7	1379,7	70,69	70,35
	T375_2	345,9	(8,6%)	0,024	(12,7%)	1442,7	(4,6%)	70,01	(0,5%)
	T500_1	539,3	527,8	0,030	0,030	1797,6	1786,5	59,92	60,21
	T500_2	516,2	(2,2%)	0,029	(1,7%)	1775,4	(0,6%)	60,50	(0,5%)
Duomix M12	T375_M12P25_1	171,7	195,2	0,032	0,043	437,2	464,5	74,07	74,07
	T375_M12P25_2	218,6	(12,0%)	0,054	(25,5%)	491,7	(5,8%)	74,07	(0,0%)
	T375_M12P50_1	257,2	245,6	0,025	0,022	802,6	795,8	70,35	70,35
	T375_M12P50_2	234,1	(4,7%)	0,020	(13,6%)	789,1	(0,8%)	70,35	(0,0%)
	T375_M12P75_1	218,8	152,6	0,058	0,404	273,5	191,3	70,35	70,35
	T375_M12P75_2	86,4	(43,3%)	0,750	(85,6%)	109,2	(42,9%)	70,35	(0,0%)
	T375_M12P100_1	163,8	167,7	0,120	0,108	148,6	160,8	74,07	74,07
	T375_M12P100_2	171,7	(2,3%)	0,096	(11,1%)	173,0	(7,5%)	74,07	(0,0%)
	T500_M12P50_1	130,1	270,7	0,122	0,072	267,0	497,8	60,91	60,91
	T500_M12P50_2	411,2	(51,9%)	0,022	(69,4%)	728,6	(46,4%)	60,91	(0,0%)
Duomix M20	T375_M20P50_1	265,2	207,1	0,090	0,334	229,2	169,3	74,21	74,21
	T375_M20P50_2	149,1	(28,0%)	0,578	(73,0%)	109,4	(35,3%)	74,21	(0,0%)

NOTA: Dentro de parênteses aparece o desvio percentual dos resultados em relação ao valor médio de ambos.

5.3.1. Ensaios de Tracção - provetes sem fibras

As Figuras 5.8 e 5.9 são representativas da influência da variação da dosagem de ligante (375 a 500Kg/m³) em ensaios de tracção realizados sobre provetes sem inclusão de fibras.

A partir dos resultados obtidos é visível o aumento da resistência à tracção simples e da rigidez do solo estabilizado com o aumento da dosagem de ligante (Figuras 5.8 5.9a) e 5.9c)). Mais uma vez, a justificação está relacionada com o número de ligações cimentícias que cresce com o aumento da dosagem de ligante, o que conduz à formação de uma matriz sólida mais resistente e rígida.

Em termos de extensão na rotura verifica-se a existência de grande variabilidade dos resultados para o par T375, ainda que respeite o critério de conformidade adoptado (variação de $\pm 15\%$ em relação à média). Não obstante esta variabilidade, ambas as curvas q_t - ε_a deste par de ensaios seguem a mesma tendência (Figura 5.8), traduzida em módulos de deformabilidade muito próximos (Quadro 5.2), o que evidencia a qualidade dos resultados.

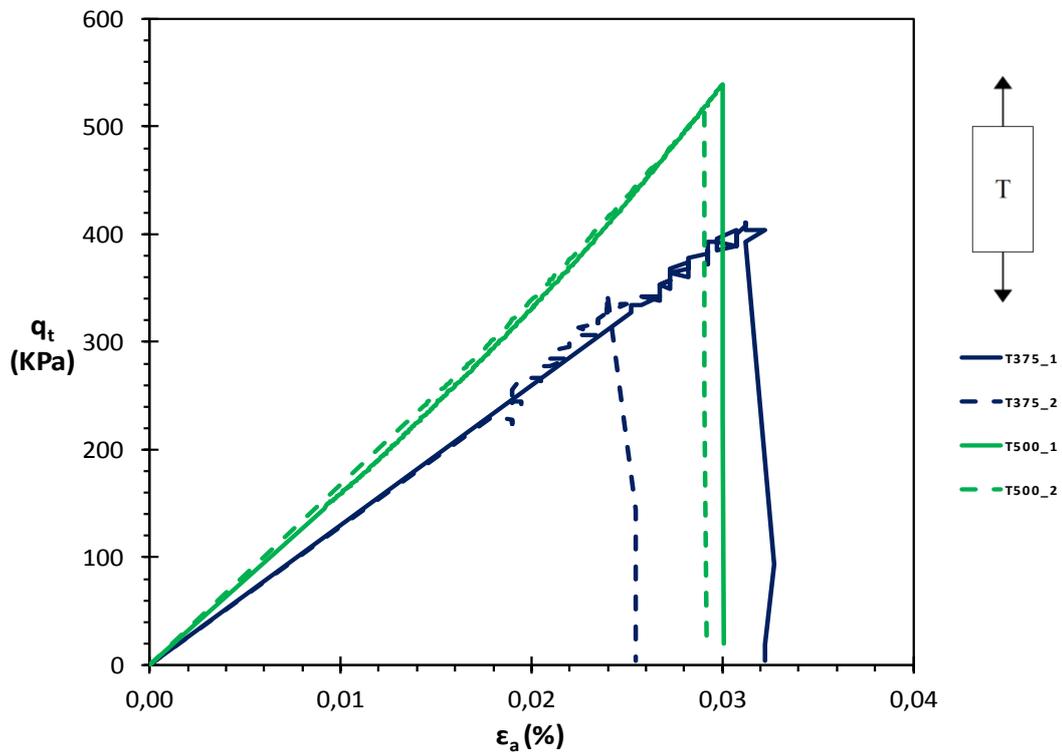


Figura 5.8 – Curvas tensão-extensão de ensaios T realizados em provetes sem fibras por variação da dosagem de ligante.

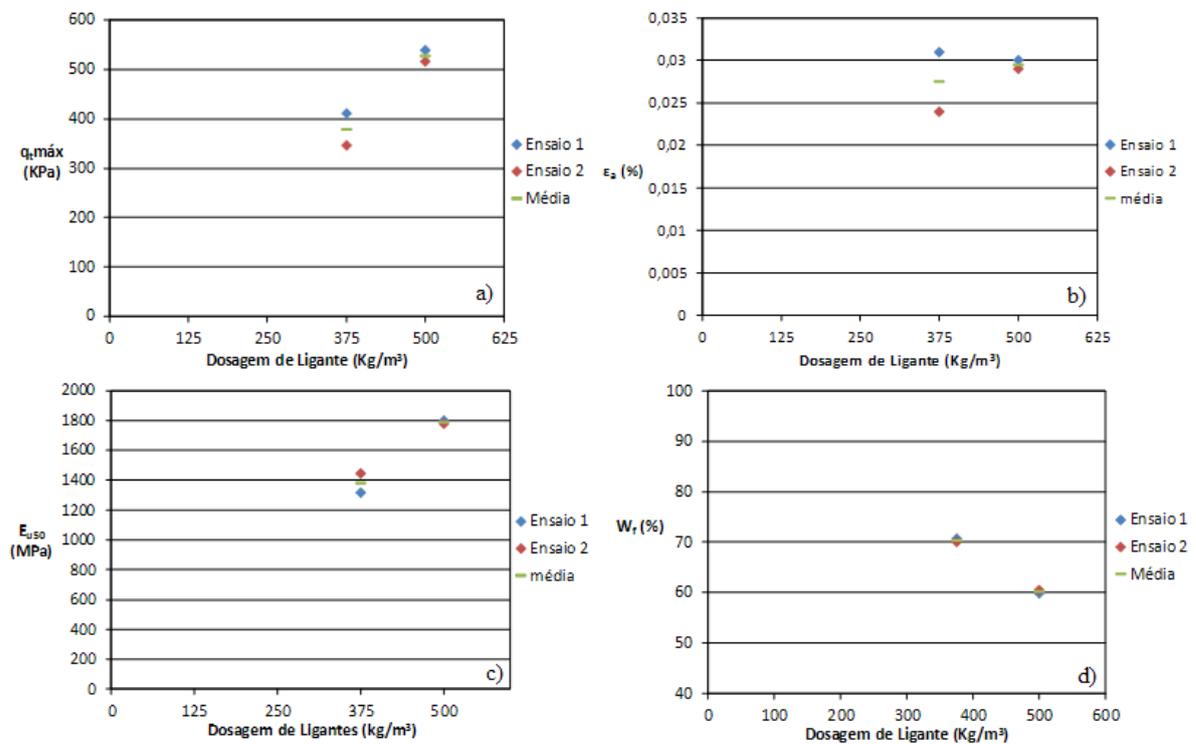


Figura 5.9 – Ensaios T realizados em provetes sem fibras – análise da evolução de: a) $q_t^{máx}$; b) ϵ_a ; c) E_{u50} e d) w_f com a variação da dosagem de ligante.

Como previsível e explicado anteriormente, o teor em água decresce com o aumento da dosagem de ligante (Figura 5.9d), reflexo do maior “consumo” de água de um maior número de reacções cimentícias.

5.3.2. Ensaio de Tracção - provetes com fibras *DuomixM12*

5.3.2.1. Influência da dosagem de fibras

As Figuras 5.10 e 5.11 reflectem o estudo da influência da dosagem de fibras (25 a 100Kg/m³) em ensaios de tracção, realizados em provetes com adição de fibras *DuomixM12*, e preparados com uma dosagem de ligante de 375Kg/m³ (valor tomado como referência).

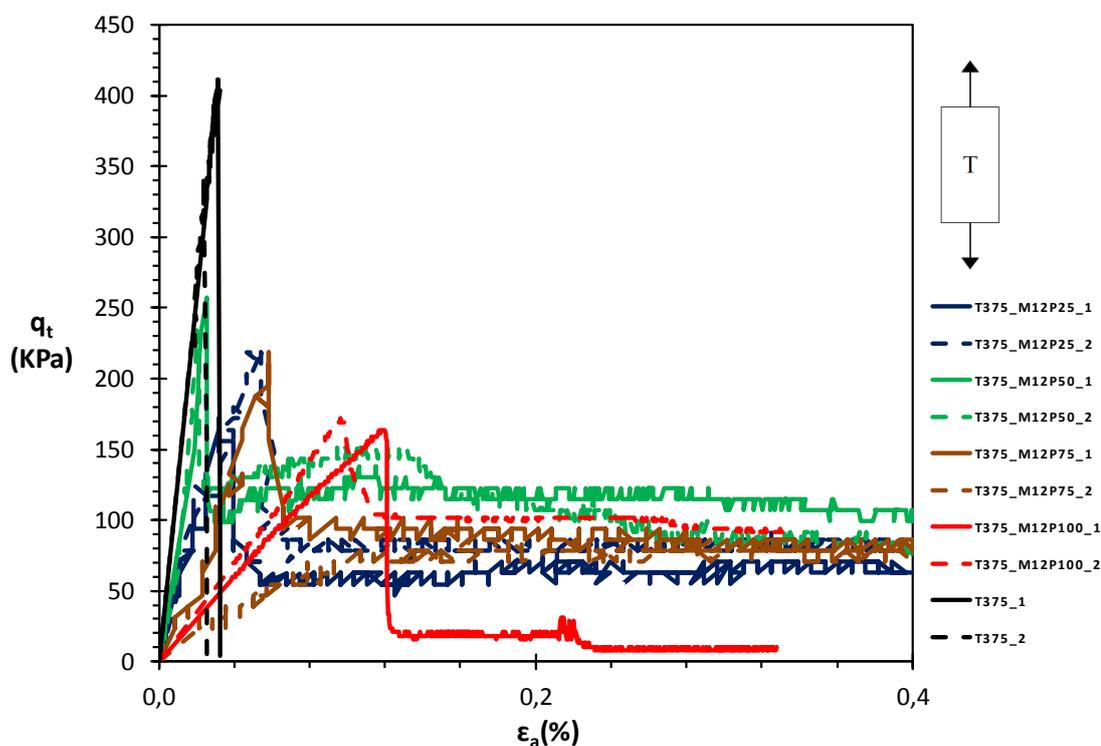


Figura 5.10 – Curvas tensão-extensão de ensaios T realizados em provetes com fibras *DuomixM12* por variação da dosagem de fibras (dosagem de ligante = 375 kg/m³).

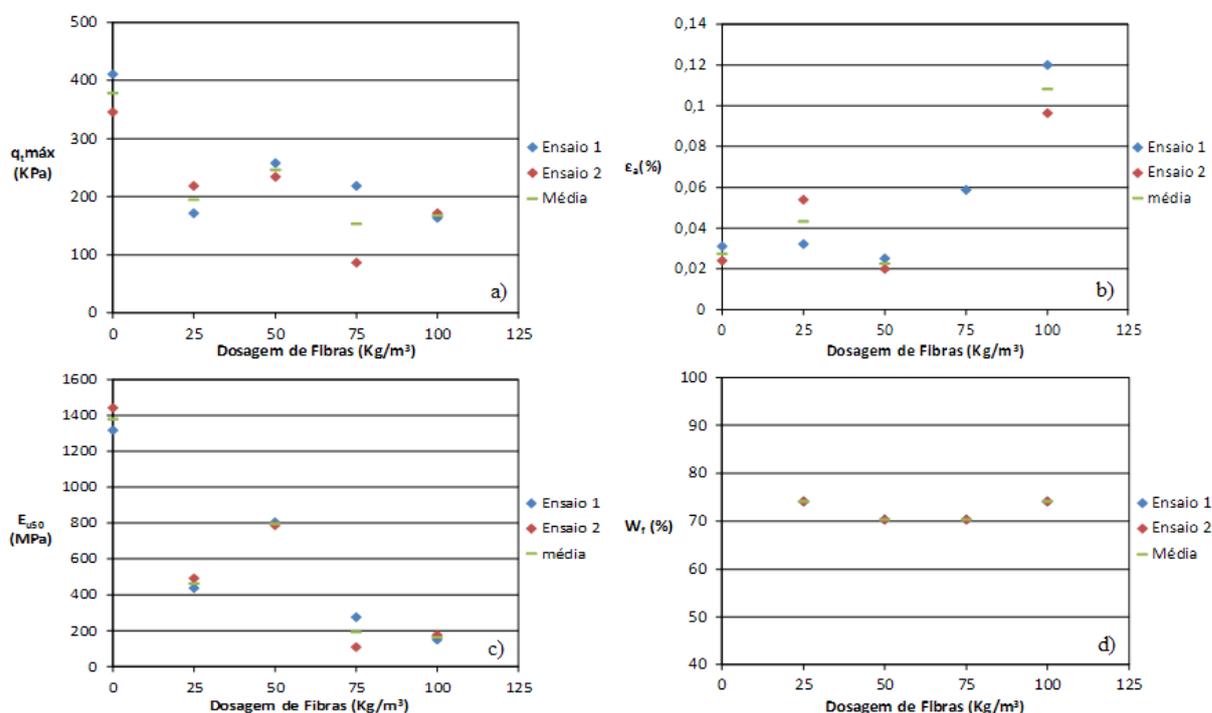


Figura 5.11 – Ensaios T realizados em provetes com fibras *DuomixM12* e igual dosagem de ligante (375 kg/m^3) – análise da evolução de: a) $q_t^{m\acute{a}x}$; b) ϵ_a ; c) E_{u50} e d) w_f com a variação da dosagem de fibras.

A análise dos resultados permite constatar que, para as dosagens de fibras analisadas, a inclusão de fibras *DuomixM12* não melhora a resistência à tracção simples quando comparadas com o par T375 sem fibras (Figuras 5.10 e 5.11a)). Ainda na Figura 5.11a) é possível verificar a não existência de qualquer tendência na relação de $q_t^{m\acute{a}x}$ e a dosagem de fibras. Da análise do Quadro 5.2 constata-se que o par T375_M12P75 não cumpre o critério de conformidade adoptado, ultrapassando os 15% permitidos pela norma NP EN 206-1. Uma análise mais detalhada das curvas q_t - ϵ_a referentes ao par mencionado, permite concluir que estas não têm idêntico desenvolvimento (Figura 5.10). De facto, a curva T375_M12P75_1 atinge um pico de resistência, associado ao valor $q_t^{m\acute{a}x}$ de 218,8KPa, enquanto que a curva do ensaio T375_M12P75_2, não exhibe pico, revelando um valor de $q_t^{m\acute{a}x}$ de 86,4KPa (Quadro 5.2). A justificação encontrada para esta diferença de comportamento, pode estar relacionada com o facto de a distribuição aleatória de fibras ter impedido o estabelecimento de tantas ligações cimentícias numa determinada zona do provete quanto as do par T375_M12P75_1, o que terá prejudicado a resistência conferida pelas ligações cimentícias, originando uma zona de fraqueza, que conduziu a que a respectiva curva não registasse o pico observado no ensaio homólogo. Outra explicação poderá estar relacionada com algum erro cometido durante a preparação do provete.

As extensões de rotura (Figura 5.11b)) mostram-se tanto maiores quanto maior a dosagem de fibras reflexo directo do carácter dúctil associado à presença das fibras. Refira-se que a não inclusão do valor ϵ_a do par T375_M12P75_2 na Figura 5.11b), se deve ao facto de a curva q_t - ϵ_a ser diferente dos demais ensaios, verificando-se o crescimento continuado da tensão de tracção com a deformação, o que levou a que se definisse a resistência à tracção como o ponto associado ao fim do ensaio, logo, a muito grandes deformações.

Atendendo ao módulo de deformabilidade (Figura 5.11c)) conclui-se haver uma diminuição, em relação ao solo estabilizado sem fibras, consequência do facto de a introdução de fibras impedir o estabelecimento de parte das ligações cimentícias, resultando daí um comportamento menos rígido. Este efeito é tanto mais notório quanto mais elevada é a dosagem de fibras. Apesar da tendência observada, o par T375_M12P50 regista um comportamento aparentemente diferente, parecendo indicar que a dosagem de fibras de 50Kg/m^3 atenua em parte os efeitos acima descritos, muito provavelmente devido ao facto de esta dosagem permitir melhor trabalhabilidade do material durante o processo de preparação dos provetes.

O teor em água não apresenta alterações significativas com o aumento da dosagem de fibras (Figura 5.11d)), uma vez que estas são inertes à água e a dosagem de ligante se mantém constante.

5.3.2.2. Influência da dosagem de ligante

As Figuras 5.12 e 5.13 apresentam os resultados obtidos em ensaios T realizados em provetes com a variação da dosagem de ligante (375 a 500Kg/m^3), mantendo inalterada a dosagem de fibras (50Kg/m^3 , valor tomado como referência).

Atendendo às Figuras 5.13a) e c), não se verifica existir melhoria da resistência à tracção simples ou da rigidez fruto da introdução de fibras, obtendo-se valores inferiores tanto para a dosagem de ligante de 375Kg/m^3 como de 500Kg/m^3 . Tal como acontece nos ensaios UCS, a inclusão de fibras é contraproducente em termos de comportamento mecânico à tracção, notando-se uma vez mais que o melhoramento do comportamento mecânico é sobretudo dependente da dosagem de ligante.

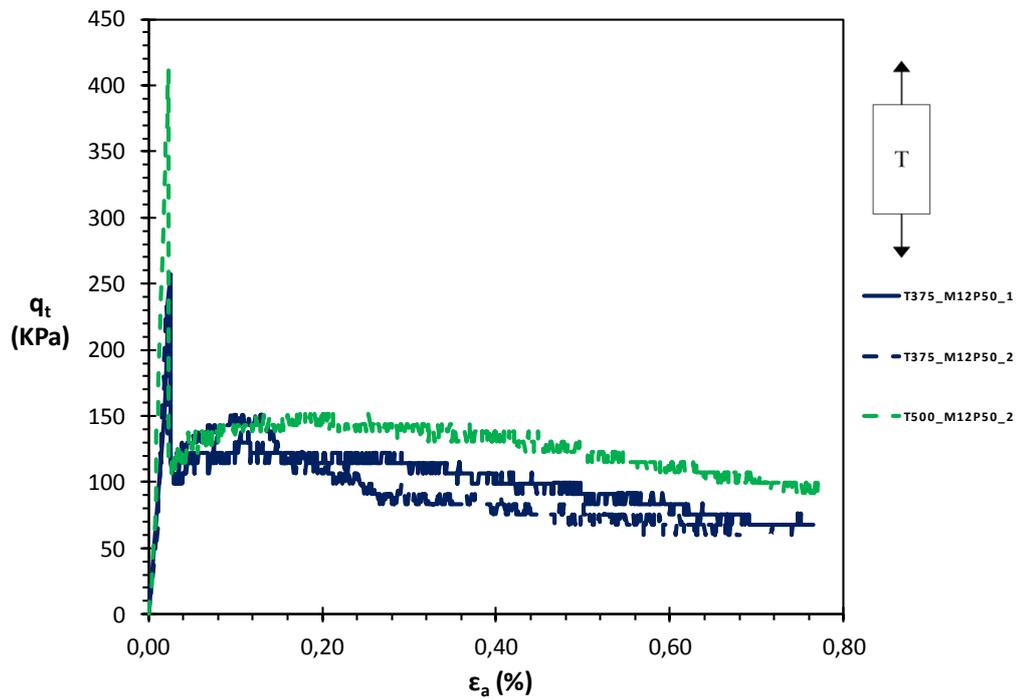


Figura 5.12 – Curvas tensão-extensão de ensaios T realizados em provetes com fibras *DuomixM12* por variação da dosagem de ligante (dosagem de fibras = 50kg/m^3).

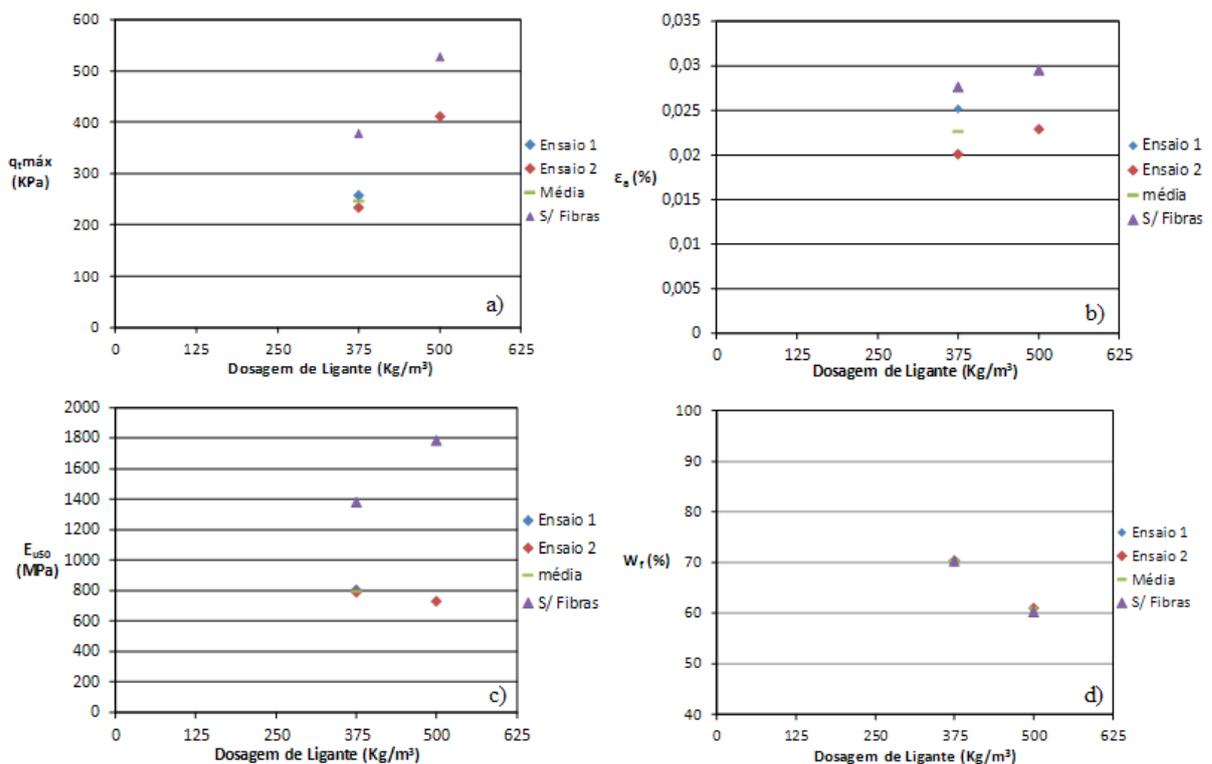


Figura 5.13 – Ensaios T realizados em provetes com fibras *DuomixM12* (50kg/m^3) – análise da evolução de: a) $q_t^{\text{máx}}$, b) ϵ_a ; c) E_{u50} e d) w_f com a variação da dosagem de ligante.

A evolução das extensões de rotura (Figura 5.13b)) é condicionada pelo critério adoptado para definir a rotura, $q_t^{máx}$. A resistência máxima em ensaios de tracção é fortemente dependente da disposição/orientação das fibras no interior do provete. Se as fibras estiverem orientadas no sentido da aplicação de carga, irá se maximizar o atrito entre as fibras e a matriz cimentícia, conduzindo a maiores resistências.

O teor em água final decresce com o aumento da dosagem de ligante, como era esperado, dado que o aumento das reacções cimentícias induz um maior “consumo” de água (Figura 5.13d)).

5.3.3. Influência do tipo de fibra *DuomixM20* (comprimento da fibra)

A fim de se analisar a influência que o comprimento das fibras exerce sobre o comportamento em tracção de um solo quimicamente estabilizado, foram realizados ensaios de T sobre provetes preparados com fibras de dois comprimentos, *DuomixM12* (l=12mm) e *DuomixM20* (l=20mm). Os ensaios foram realizados para igual dosagem de ligante e de fibras, 375 e 50Kg/m³, respectivamente, valores adoptados como referência. A Figura 5.14 e o Quadro 5.2 resumem os resultados obtidos.

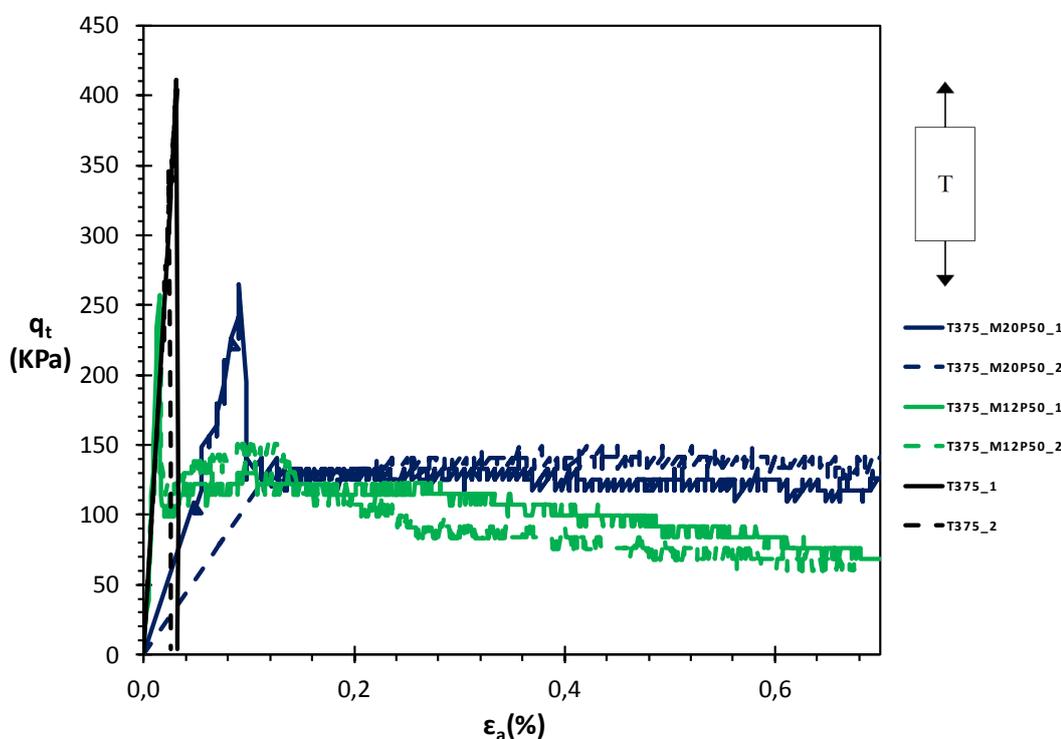


Figura 5.14 – Curvas tensão-extensão de ensaios T realizados em provetes com e sem incorporação de fibras de dois tipos: *DuomixM12* e *DuomixM20* (dosagem de fibras = 50 kg/m³; dosagem de ligante = 375 kg/m³).

Da análise da Figura 5.14 e comparando os valores médios da resistência à tracção simples ($q_t^{\text{méd}}$) para os dois tipos de fibras (Quadro 5.2), conclui-se que o aumento do comprimento das fibras contribui para a diminuição da resistência à tracção. Este comportamento está em concordância com o observado nos ensaios UCS (secção 5.2.3), sendo justificado pelas razões aí apontadas. Convém no entanto referir que para o par de fibras *DuomixM20*, as curvas tensão-extensão não se corroboram até que o par T375_M20P50_1 atinja a rotura de pico (facto explicado anteriormente), momento a partir do qual as curvas passam a exibir um comportamento semelhante, evidenciado pelo longo patamar de resistência pós-rotura que se estabelece, onde o comportamento é comandado essencialmente pelas fibras. Realce-se o facto de esse patamar, para as fibras mais compridas (*DuomixM20*), ser superior ao das fibras mais curtas (*DuomixM12*), o que se deve muito provavelmente ao facto de as primeiras terem menor probabilidade de serem arrancadas, ou seja, ao serem traccionadas têm maior superfície de contacto com o solo envolvente, maximizando o atrito e a resistência mobilizada.

5.4. Ensaios de Compressão Diametral (CD)

O Quadro 5.3 expõe um resumo dos resultados obtidos sobre provetes de solo quimicamente estabilizado sujeitos a ensaios de CD, com e sem adição de fibras de polipropileno. O quadro apresenta os valores da resistência máxima à tracção por compressão diametral (f_{ct}), do deslocamento vertical na rotura (δ_v) e do teor em água final (w_f). Acrescentam-se ainda os valores médios dos parâmetros mencionados uma vez que foram realizados dois provetes para cada mistura realizada. Dentro de parênteses é indicado o desvio percentual dos resultados face ao valor médio.

Quadro 5.3 – Resumo dos resultados obtidos para os ensaios de CD.

Fibras	Ensaio	f_{ct} (kPa)	$f_{ct}^{méd}$ (kPa)	δ_v (mm)	$\delta_v^{méd}$ (mm)	w_f (%)	$w_f^{méd}$ (%)
Sem	CD125_1	96,3	96,3	2,287	2,286	90,64	90,72
	CD125_2	96,3	(0,0%)	2,284	(≈0%)	90,80	(≈0%)
	CD250_1	516,9	541,2	1,298	1,364	77,94	78,16
	CD250_2	565,4	(4,4%)	1,430	(4,6%)	78,38	(0,3%)
	CD375_1	709,6	705,7	1,128	1,137	67,23	67,14
	CD375_2	701,8	(0,5%)	1,146	(0,8%)	67,04	(≈0%)
	CD500_1	1207,4	1168,8	1,049	0,992	58,76	58,75
	CD500_2	1130,2	(3,3%)	0,935	(5,7%)	58,73	(≈0%)
Duomix M12	CD375_M12P25_1	408,8	423,9	3,787	4,038	72,35	72,35
	CD375_M12P25_2	439,0	(3,5%)	4,290	(6,2%)	72,35	(0%)
	CD375_M12P50_1	353,3	404,0	3,742	4,845	69,31	69,31
	CD375_M12P50_2	454,8	(12,6%)	5,947	(22,7%)	69,31	(0%)
	CD375_M12P75_1	623,9	592,5	12,753	7,826	71,40	71,40
	CD375_M12P75_2	561,0	(5,2%)	2,899	(62,9%)	71,40	(0%)
	CD375_M12P100_1	629,1	594,7	14,936	14,470	70,18	70,18
	CD375_M12P100_2	560,3	(5,7%)	14,005	(3,2%)	70,18	(0%)
	CD125_M12P50_1	120,2	111,4	13,758	13,665	88,96	88,96
	CD125_M12P50_2	102,5	(7,8%)	13,572	(0,6%)	88,96	(0%)
	CD250_M12P50_1	448,5	447,4	4,941	9,453	67,12	67,12
	CD250_M12P50_2	446,3	(0,2%)	13,964	(47,7%)	67,12	(0%)
CD500_M12P50_1	676,8	637,1	3,418	3,948	60,79	60,79	
CD500_M12P50_2	597,4	(6,2%)	4,479	(13,4%)	60,79	(0%)	
Duomix M20	CD375_M20P50_1	489,7	501,8	7,623	6,828	72,90	72,90
	CD375_M20P50_2	514,0	(2,4%)	6,034	(11,6%)	72,90	(0%)

NOTA: Dentro de parênteses aparece o desvio percentual dos resultados em relação ao valor médio de ambos.

5.4.1. Ensaios de CD - provetes sem fibras

As Figuras 5.15 e 5.16 descrevem a influência da dosagem de ligante (125Kg/m³ a 500Kg/m³) sobre provetes sem fibras, sujeitos a ensaios de CD.

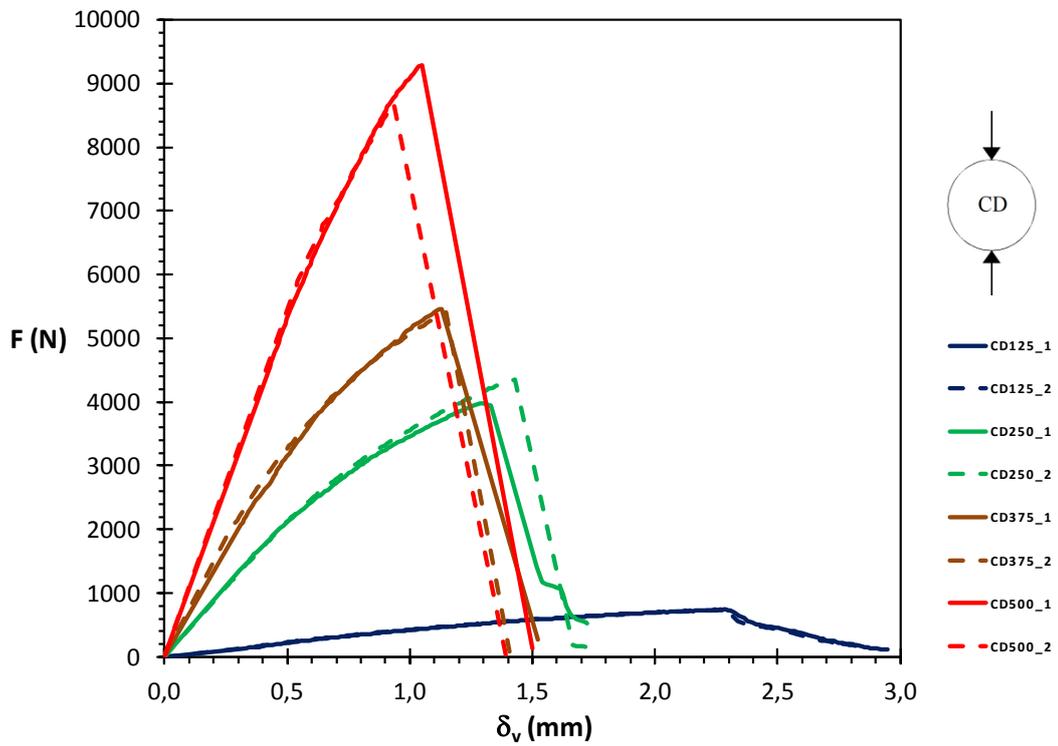


Figura 5.15 – Curvas força-deslocamento vertical de ensaios CD realizados em provetes sem fibras por variação da dosagem de ligante.

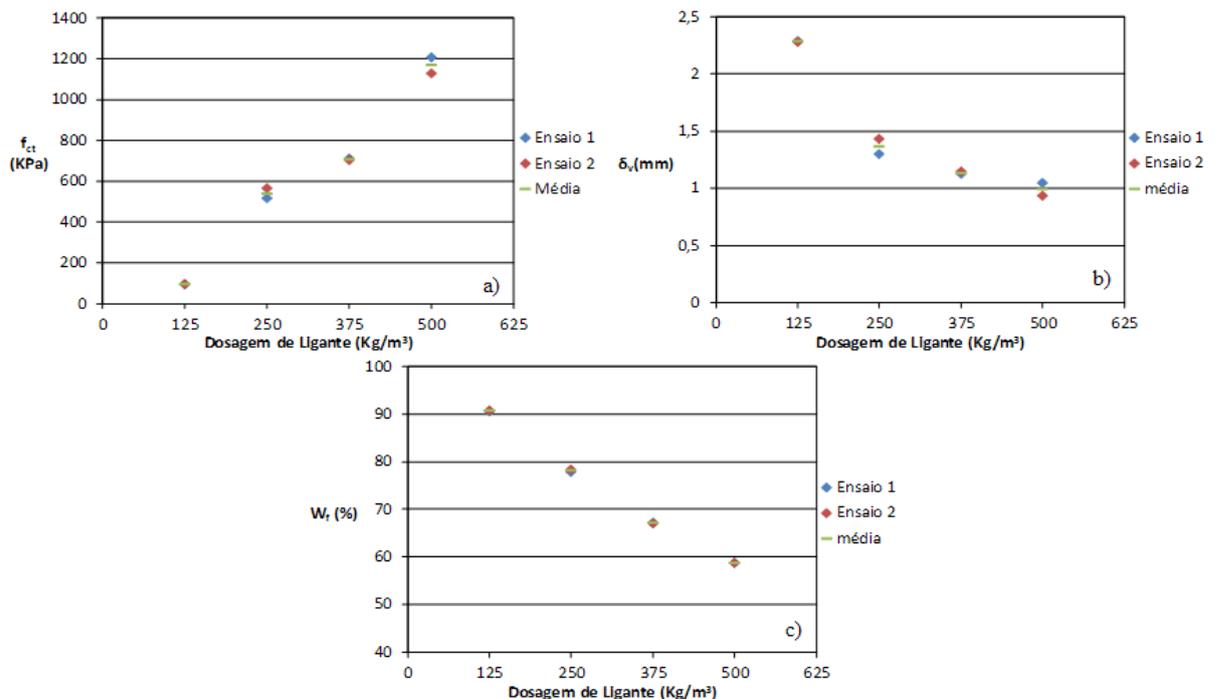


Figura 5.16 – Ensaios CD realizados em provetes sem fibras – análise da evolução de: a) f_{ct} ; b) δ_v e c) w_f com a variação da dosagem de ligante.

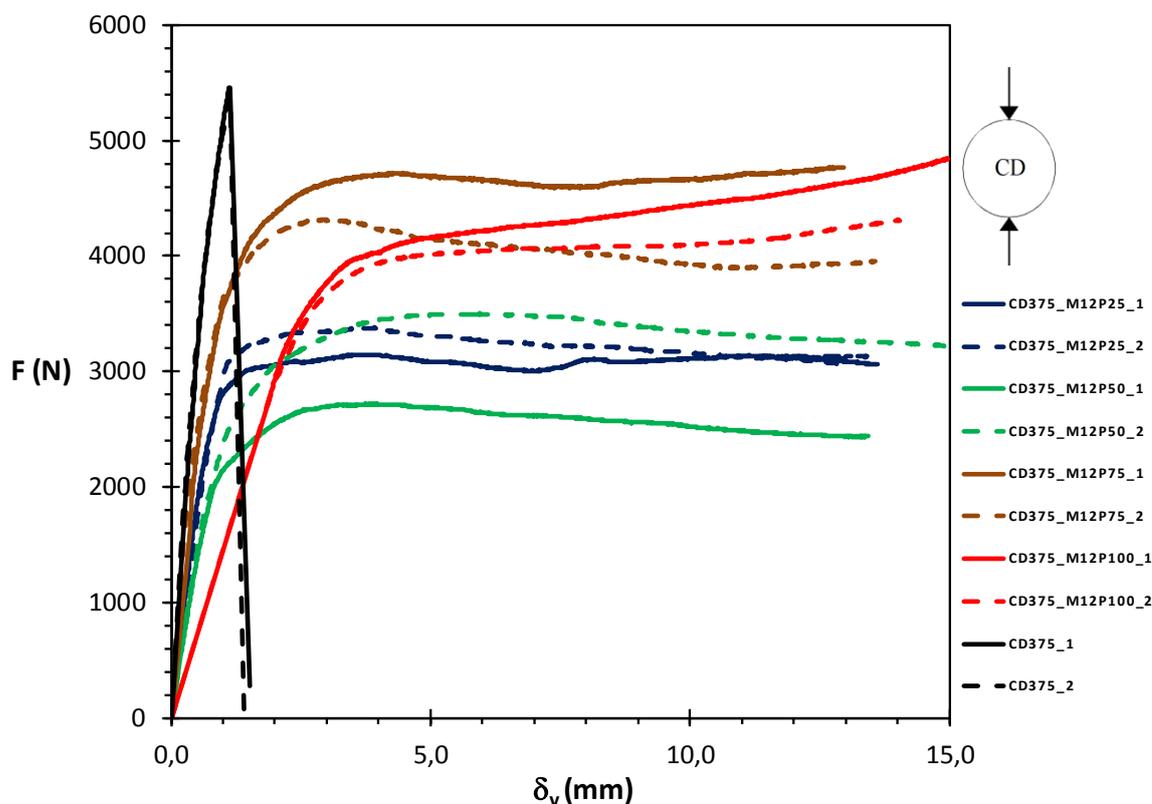
De acordo com as Figuras 5.15 e 5.16, pode-se afirmar que com o aumento da dosagem de ligante há um crescimento da resistência à tracção por compressão diametral e um decréscimo do deslocamento vertical até à rotura, facilmente explicado pelo aumento das ligações cimentícias que tornam o provete mais rígido.

Relativamente ao teor em água final (Figura 5.16c)), constata-se que este diminui com o aumento da dosagem de ligante, à semelhança do reportado nos ensaios anteriores.

5.4.2. Ensaio de CD - provetes com fibras *DuomixM12*

5.4.2.1. Influência da dosagem de fibras

As Figuras 5.17 e 5.18 apresentam os resultados obtidos em ensaios de compressão diametral realizados sobre provetes por variação da dosagem de fibras *DuomixM12* (de 25 a 100Kg/m³), mantendo constante a dosagem de ligante (375kg/m³, valor tomado como referência).



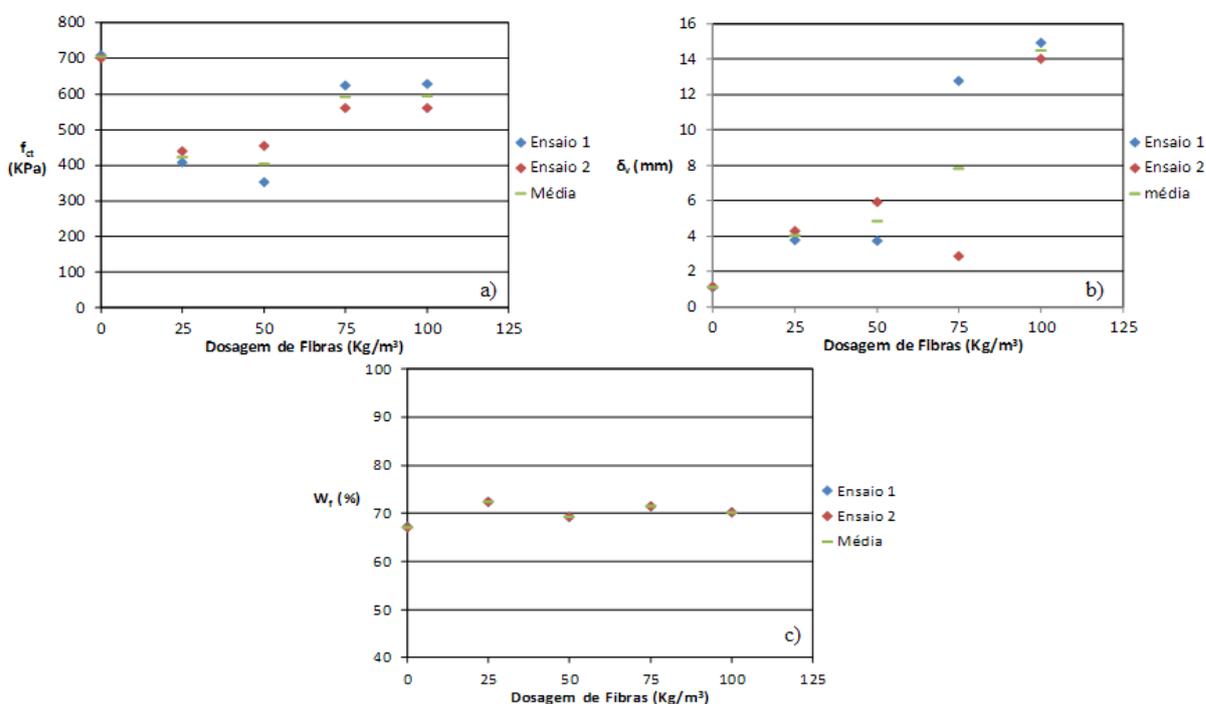


Figura 5.18 – Ensaios CD realizados em provetes com fibras *DuomixM12* para igual dosagem de ligante (375 kg/m³) – análise da evolução de: a) f_{ct} ; b) δ_v e c) w_f com a variação da dosagem de fibras.

À semelhança do que acontece nos ensaios anteriormente abordados, também aqui a introdução de fibras é contraproducente em termos de resistência à tracção por compressão diametral (Figuras 5.17 e 5.18a)). Analisando apenas os provetes que têm fibras, verifica-se de uma maneira geral, que a introdução das fibras é benéfica em termos de resistência, aumentando esse efeito com o aumento da dosagem de fibras. Realce-se no entanto que, este efeito se processa com o aumento gradual das deformações, o que de novo atesta o carácter dúctil induzido pela presença das fibras. Comparando estes resultados com os dos ensaios de tracção (secção 5.3.2.1), verifica-se a não concordância dos mesmos em termos de variação da resistência à tracção com a dosagem de fibras, facto que parece estar relacionado com a diferente tipologia dos ensaios.

Analisando os dados relativos ao teor em água final (Figura 5.18 c)), verifica-se que este não tem variação com o aumento da dosagem de fibras, devido ao facto de, as fibras serem inertes à água, como já foi referido.

5.4.2.2. Influência da dosagem de ligante

As Figuras 5.19 e 5.20 traduzem os resultados obtidos em ensaios CD realizados em provetes com igual dosagem de fibras *DuomixM12* (50Kg/m^3 , valor tomado como referência), mas variando a dosagem de ligante (125 a 500Kg/m^3).

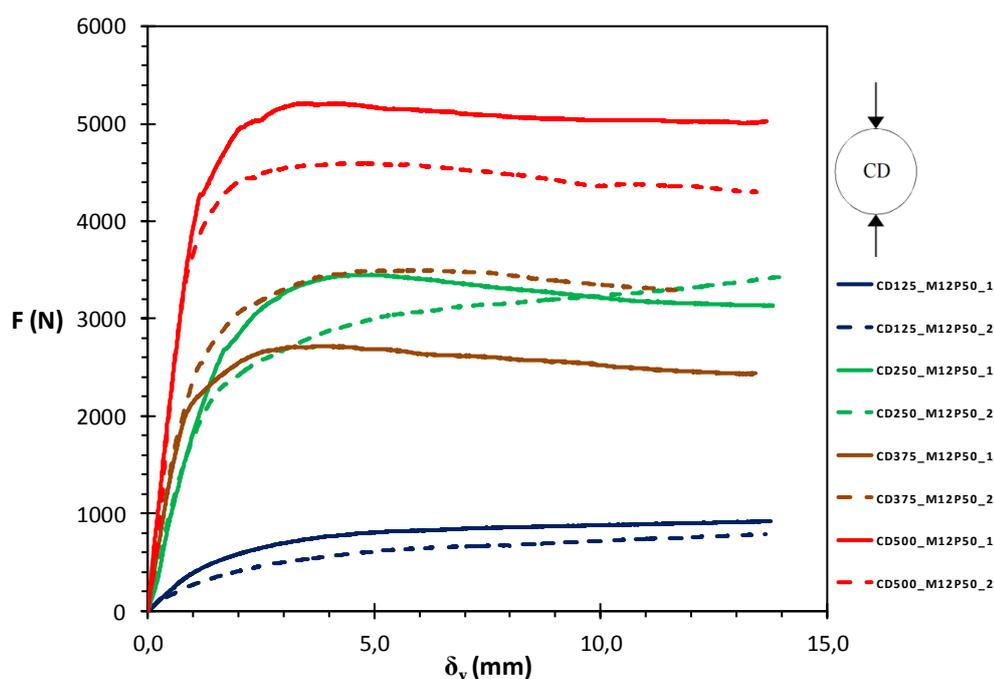


Figura 5.19 – Curvas força-deslocamento vertical de ensaios CD realizados em provetes com fibras *DuomixM12* por variação da dosagem de ligante (dosagem de fibras = 50 kg/m^3).

Da análise dos resultados, verifica-se que, em termos gerais, a introdução de fibras origina um decréscimo da resistência à tracção por compressão diametral, excepto para a dosagem de 125Kg/m^3 onde se observa um ganho de 15,7%. Tal facto, poderá dever-se ao facto de que para a dosagem de ligante de 125Kg/m^3 o material ser mais deformável, permitindo a mobilização da resistência à tracção das fibras ou seja, fazendo com que estas contribuam para o ganho da resistência. Observando somente os provetes com fibras, constata-se que a resistência tende a aumentar com a dosagem de ligante, exceptuando o par CD250_M12P50 o qual não segue essa tendência (Quadro 5.3 e Figura 5.20a)), atingindo um valor superior ao do par CD375_M12P50. A justificação poderá estar relacionada com o “consumo” de água nas reacções de hidratação dos ligantes durante a cura, medido indirectamente pelo teor em água final (Figura 5.20c)). De facto o valor medido para o par CD250_M12P50, regista um valor mais baixo que o do par CD375_M12P50, indiciando que poderá ter sido cometido algum erro na preparação destes provetes.

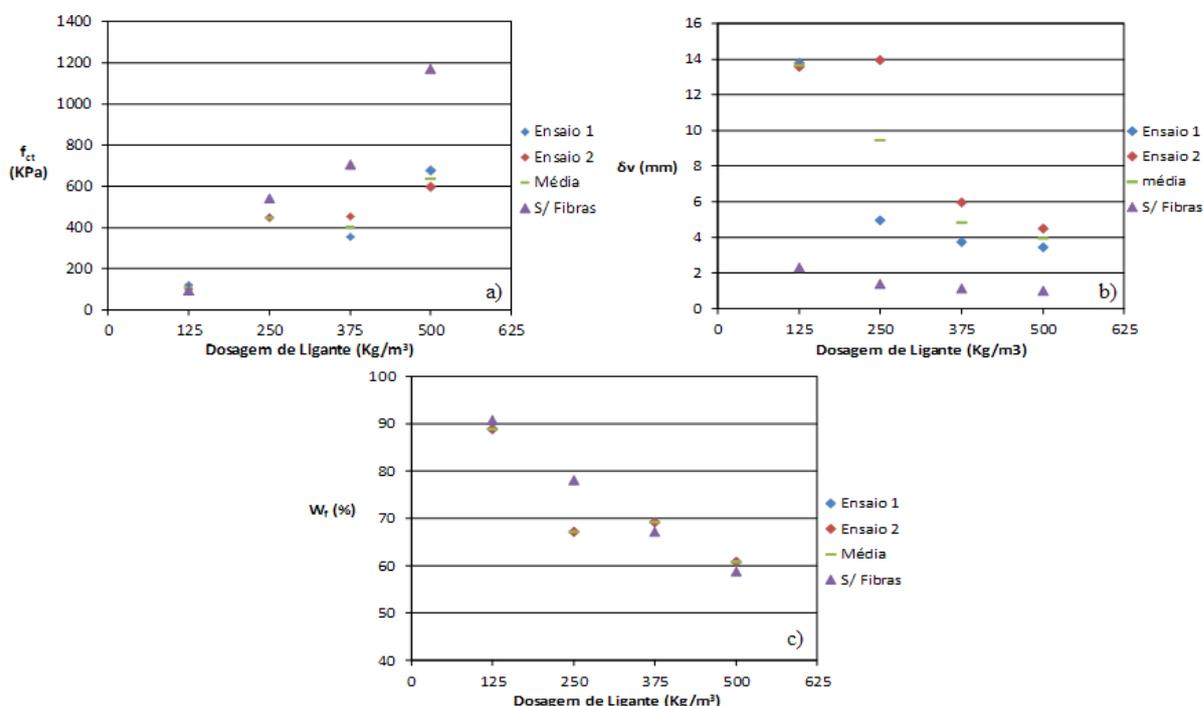


Figura 5.20 – Ensaio CD realizados em provetes com fibras *DuomixM12* (na dosagem de 50kg/m³): análise da evolução de: a) f_{ct} ; b) δ_v e c) w_f com a variação da dosagem de ligante.

Quanto ao teor em água final, e à excepção do par de ensaios acima mencionado, verifica-se a sua diminuição com o aumento da dosagem de ligante, já que para dosagens mais elevadas de ligante há um aumento das reacções cimentícias induzindo assim um maior “consumo” de água.

5.4.3. Influência do tipo de fibra *DuomixM20* (comprimento da fibra)

Com o objectivo de avaliar a influência que o comprimento das fibras exerce sobre a resistência à tracção por compressão diametral de provetes de solo quimicamente estabilizados foram elaborados ensaios de CD. Os provetes foram preparados com igual dosagem de ligante e de fibras, 375 e 50Kg/m³, respectivamente, valores adoptados como referência. A Figura 5.21 e o Quadro 5.3 resumem os resultados obtidos.

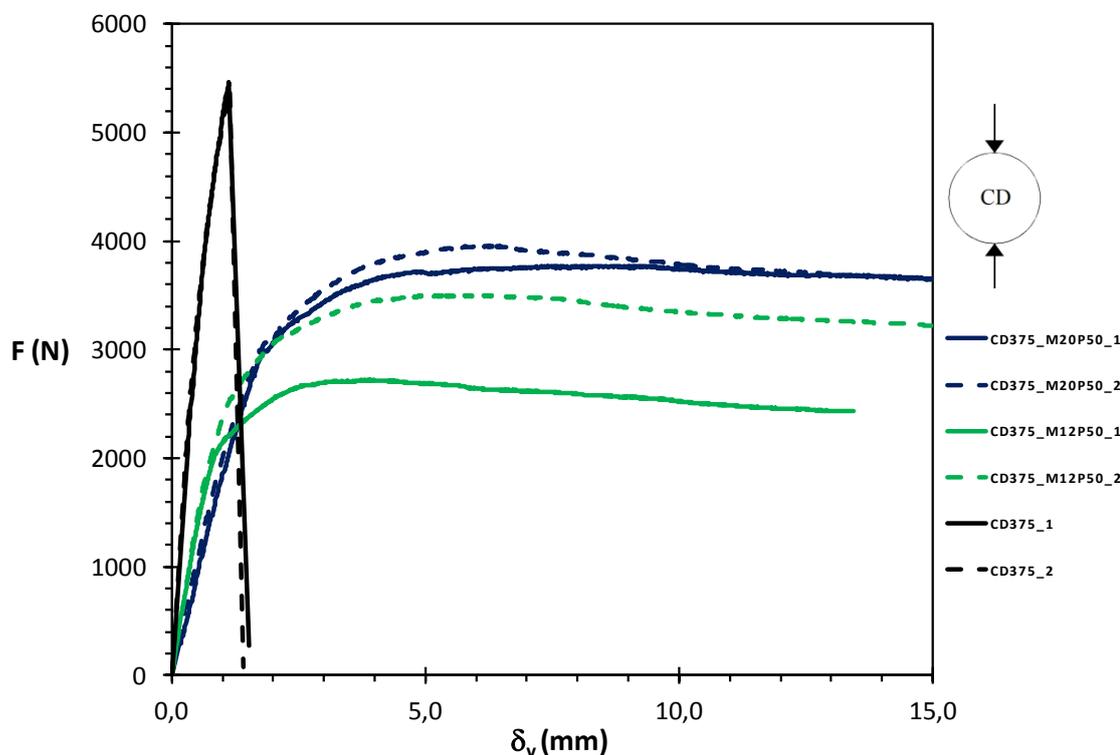


Figura 5.21 – Curvas tensão-extensão de ensaios CD realizados em provetes com e sem incorporação de fibras de dois tipos: *DuomixM12* e *DuomixM20* (dosagem de fibras = 50kg/m^3 ; dosagem de ligante = 375 kg/m^3).

Os resultados indiciam que, ao contrário do observado nos ensaios de UCS e T, a inclusão de fibras de maior comprimento (*DuomixM20*) origina uma melhoria da resistência à tracção por compressão diametral. Este facto pode estar relacionado com a tipologia e modo de sollicitação/deformação do ensaio em estudo. Em qualquer dos casos, fibras *DuomixM12* ou *DuomixM20*, a adição de fibras ao solo estabilizado é contraproducente em relação ao solo estabilizado sem fibras. No entanto, em termos de comportamento mecânico pós-rotura, as fibras originam um aumento da ductilidade do material, o que vem de encontro à tendência já assinalada de estas modificarem o comportamento pós-rotura do solo melhorado.

5.5. Ensaio de Flexão Simples (F)

O Quadro 5.4 resume os resultados dos ensaios de flexão realizados sobre provetes de solo quimicamente estabilizado, com ou sem adição de fibras de polipropileno. O quadro apresenta os valores obtidos para a resistência máxima à flexão (f_{cf}), da flecha na rotura e do teor em água final (w_f). Acrescentam-se ainda os valores médios dos parâmetros mencionados, já que

foram realizados dois provetes para cada mistura. Dentro de parênteses é indicado o desvio percentual dos resultados face ao valor médio.

Quadro 5.4 – Resumo dos resultados obtidos para os ensaios de F.

Fibras	Ensaio	f_{cf} (KPa)	$f_{cf}^{méd}$ (KPa)	flecha (mm)	flecha ^{méd} (mm)	w_f (%)	$w_f^{méd}$ (%)
Sem	F375_1	1552,0	1579,5	0,091	0,095	66,20	66,09
	F375_2	1607,1	(1,7%)	0,099	(4,2%)	65,98	(≈0%)
	F500_1	2387,7	2576,0	0,089	0,101	60,44	59,94
	F500_2	2764,2	(7,3%)	0,114	(12,3%)	59,43	(0,8%)
Duomix M12	F375_M12P25_1	1515,3	1432,6	1,050	1,075	73,08	73,08
	F375_M12P25_2	1350,0	(5,7%)	1,100	(2,3%)	73,08	(0%)
	F375_M12P50_1	1983,6	1914,7	0,459	0,458	74,45	74,45
	F375_M12P50_2	1845,9	(3,5%)	0,458	(0,2%)	74,45	(0%)
	F375_M12P75_1	1735,7	1923,9	1,083	1,586	74,69	74,69
	F375_M12P75_2	2112,2	(9,7%)	2,090	(31,7%)	74,69	(0%)
	F375_M12P100_1	2084,6	1855,1	1,980	1,451	73,14	73,14
	F375_M12P100_2	1625,5	(12,3%)	0,923	(36,4%)	73,14	(0%)
	F500_M12P50_1	2277,5	2194,8	1,596	1,628	65,07	65,07
	F500_M12P50_2	2112,2	(3,7%)	1,660	(1,9%)	65,07	(0%)
Duomix M20	F375_M20P50_1	1322,4	1391,3	1,176	1,119	74,74	74,74
	F375_M20P50_2	1460,2	(4,9%)	1,063	(5,1%)	74,74	(0%)

NOTA: Dentro de parênteses aparece o desvio percentual dos resultados em relação ao valor médio de ambos.

5.5.1. Ensaios de F - provetes sem fibras

As Figuras 5.22 e 5.23 são representativas da influência da variação da dosagem de ligante (375 a 500Kg/m³) em ensaios de flexão realizados sobre provetes sem adição de fibras.

Tal como observado nos ensaios anteriores, também para os ensaios F é evidente um crescimento da resistência máxima à flexão com o aumento da dosagem de ligante, verificando-se um crescimento de 63% em termos de valores médios para as duas dosagens estudadas (Quadro 5.4). Quanto à flecha, não se constata nenhuma variação significativa, resultado este pouco esperado, uma vez que o par F500, por ter maior dosagem, terá em princípio uma matriz sólida mais resistente e mais rígida, logo a rotura dar-se-ia para flechas menores.

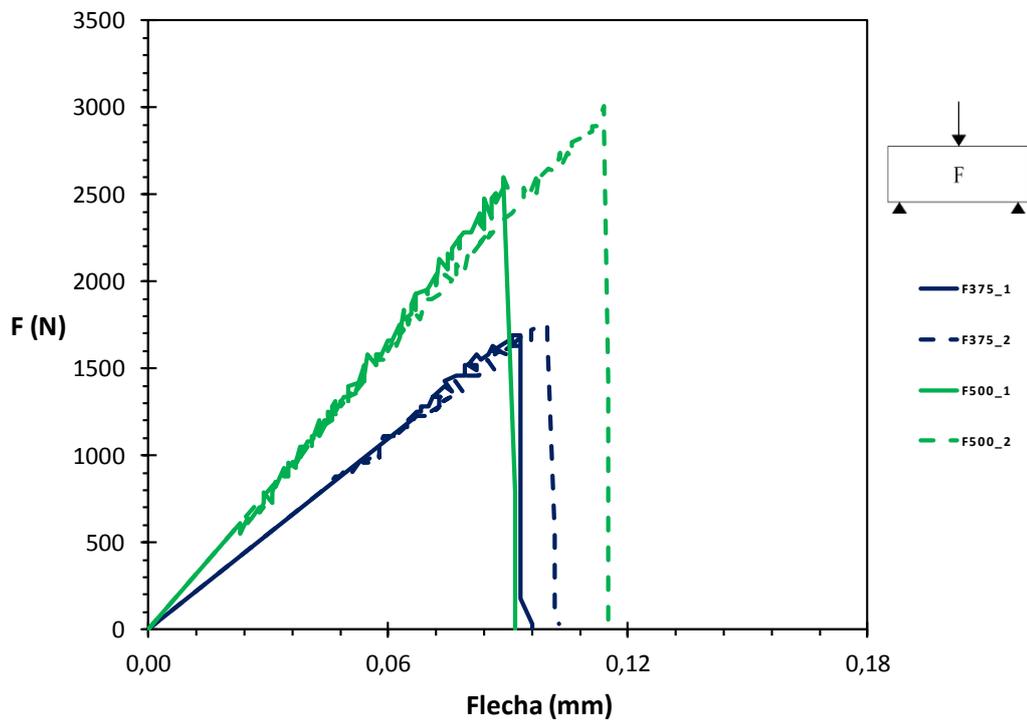


Figura 5.22 – Curvas força-flecha de ensaios F realizados em provetes sem fibras por variação da dosagem de ligante.

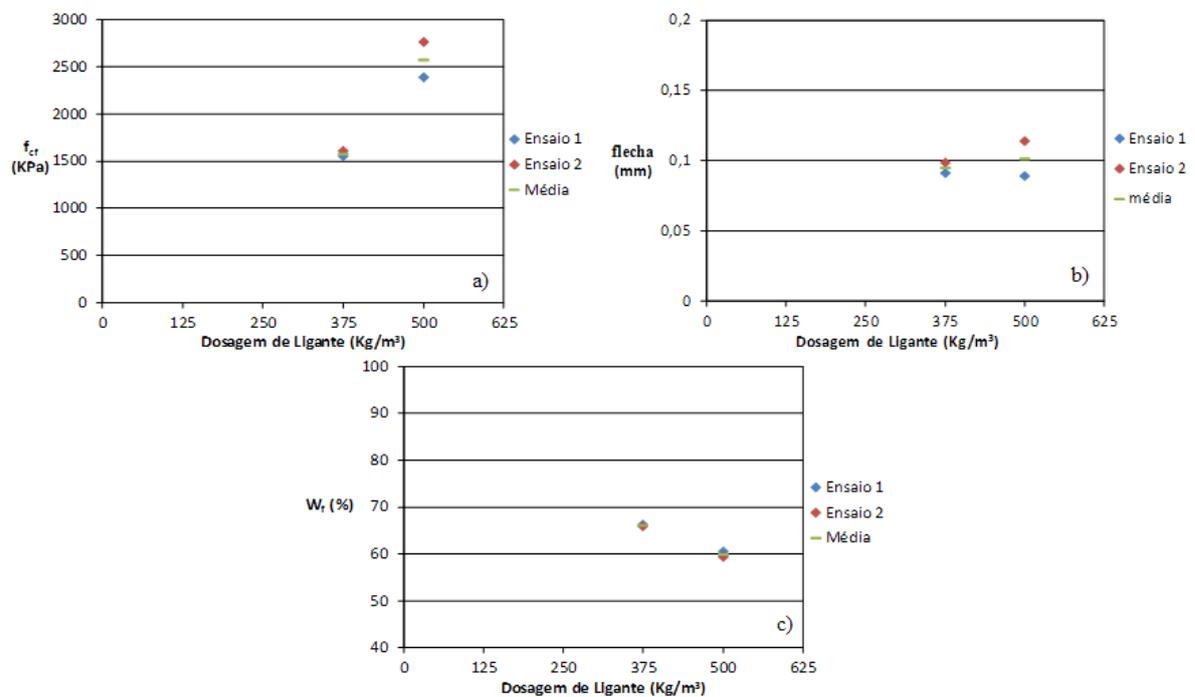


Figura 5.23 – Ensaio F realizados em provetes sem fibras – análise da evolução de: a) f_{cr} ; b) flecha e c) w_f com a variação da dosagem de ligante.

Relativamente ao teor em água final, observa-se que este diminui com o aumento da dosagem de ligante, aspecto justificado anteriormente.

5.5.2. Ensaios de F - provetes com fibras *DuomixM12*

5.5.2.1. Influência da dosagem de fibras

As Figuras 5.24 e 5.25 reflectem o estudo da influência da dosagem de fibras (25 a 100Kg/m³) em ensaios de flexão, realizados em provetes com adição de fibras *DuomixM12*, e preparados com uma dosagem de ligante de 375Kg/m³ (valor tomado como referência).

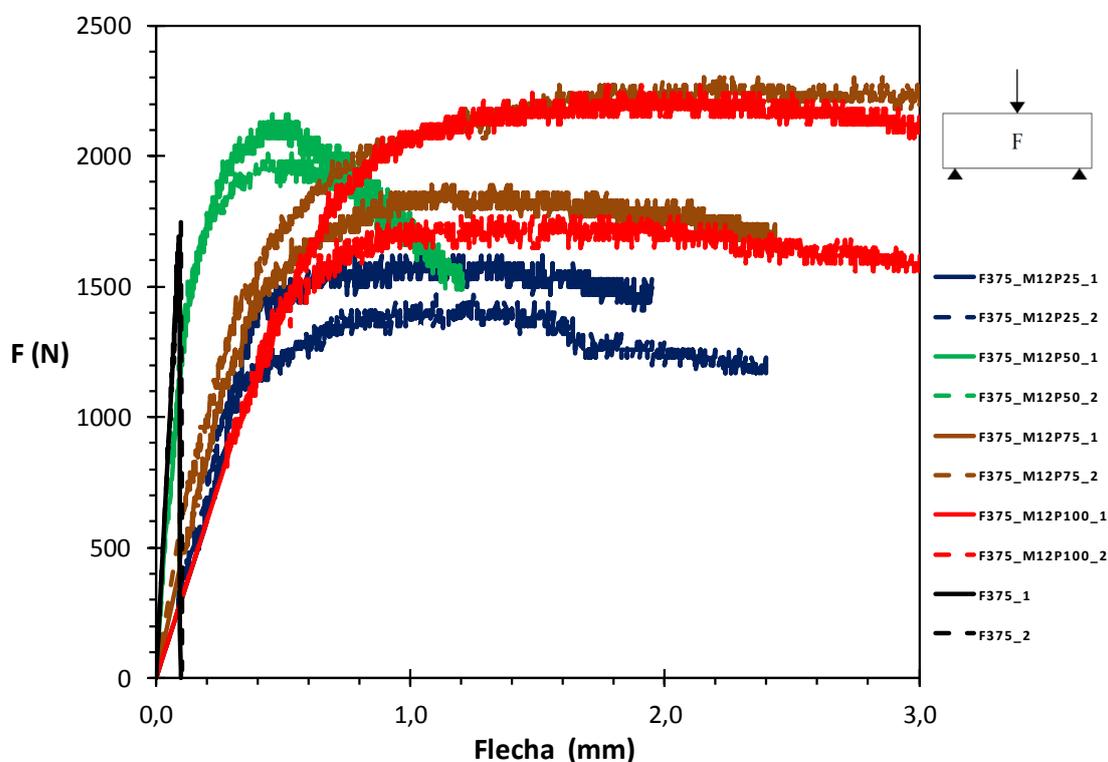


Figura 5.24 – Curvas força-flecha de ensaios F realizados em provetes com fibras *DuomixM12* por variação da dosagem de fibras (dosagem de ligante = 375 kg/m³).

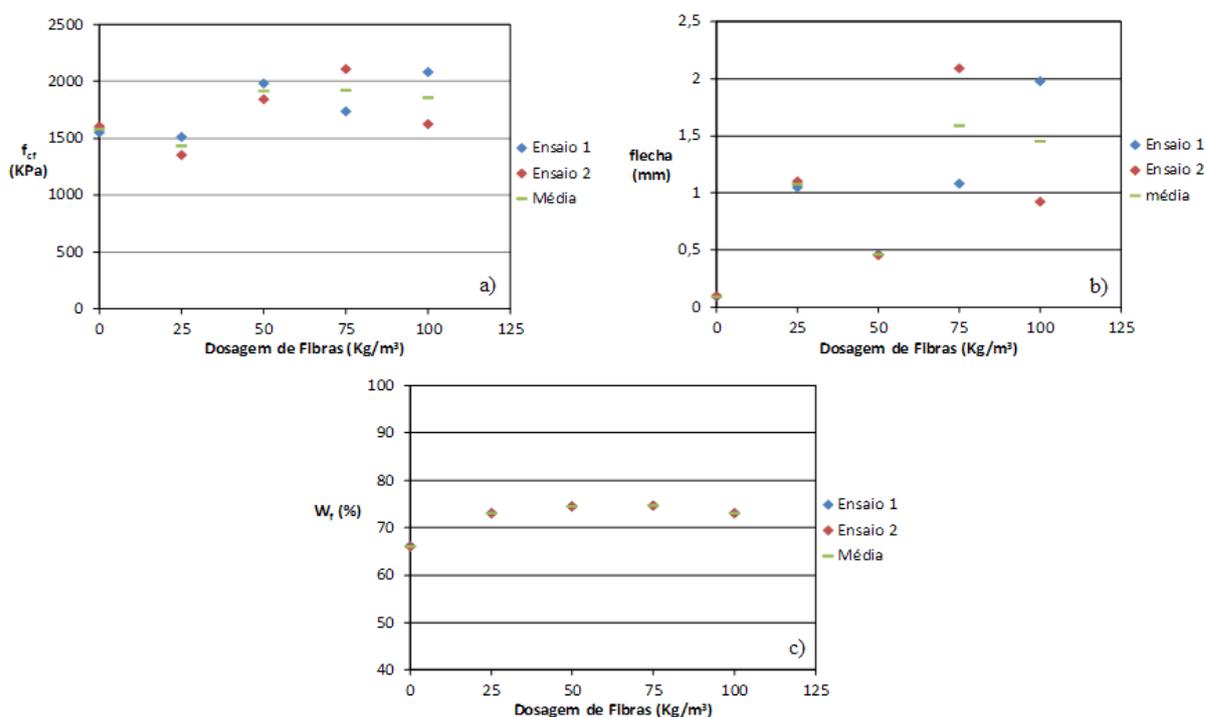


Figura 5.25 – Ensaio F realizados em provetes com fibras *DuomixM12* e igual dosagem de ligante (375 kg/m^3) – análise da evolução de: a) f_{cr} ; b) flecha e c) w_f , com a variação da dosagem de fibras.

Da análise das Figuras 5.24 e 5.25a) e do Quadro 5.4 é possível constatar que há um aumento da resistência à flexão face aos provetes sem fibras (F375), ainda que para a dosagem de fibras mais baixa este comportamento não seja verificado. Este decréscimo de resistência, ocorrido para o F375_M12P25, parece ser devido à reduzida quantidade de fibras aliada a uma provável disposição/orientação deficiente das mesmas. O aumento de resistência observado para as demais dosagens de fibras pode ser explicado pela tipologia do ensaio em estudo. Refira-se que neste tipo de ensaios, tal como nos ensaios de CD, a disposição/orientação das fibras segundo a direcção perpendicular ao plano de aplicação de cargas, maximiza a resistência mobilizada.

Quanto à flecha medida (Figura 5.25b)), observa-se que a sua evolução não tem uma tendência definida, impossibilitando a interpretação dos mesmos.

Os teores em água finais (Figura 5.25c)) não mostram variação já que a dosagem de ligante se mantém constante em todos os provetes (em concordância com os resultados dos anteriores ensaios).

5.5.2.2. Influência da dosagem de ligante

As Figuras 5.26 e 5.27 apresentam os resultados obtidos em ensaios de F realizados em provetes com a variação da dosagem de ligante (375 a 500Kg/m³), mantendo inalterada a dosagem de fibras (50Kg/m³, valor tomado como referência).

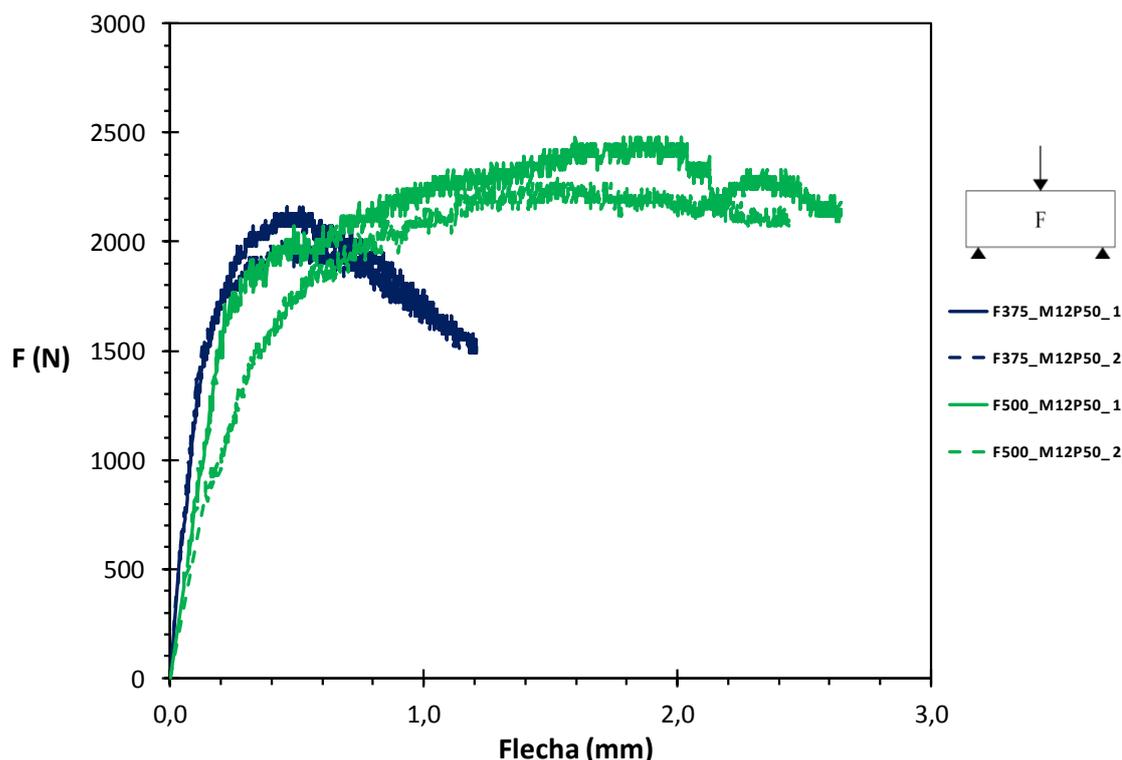


Figura 5.26 – Curvas força-flecha de ensaios F realizados em provetes com fibras *DuomixM12* por variação da dosagem de ligante (dosagem de fibras = 50 kg/m³).

A análise das Figuras 5.26 e 5.27 e do Quadro 5.4 permite concluir que com o aumento da dosagem de ligante há uma melhora da resistência à flexão, existam ou não fibras no solo estabilizado. Este comportamento está em consonância com o observado nos outros tipos de ensaios (UCS, T e CD).

No que diz respeito à evolução da flecha, denota-se que ela cresce com a dosagem de ligante (Figura 5.27b)), ao contrário do que seria expectável, uma vez que a resistência e a rigidez tendem a aumentar com a dosagem de ligante, como anteriormente referido.

A evolução do teor em água final está de acordo com o esperado, decrescendo com o aumento da dosagem de ligante (Figura 5.27c)), facto explicado pelas razões atrás referidas.

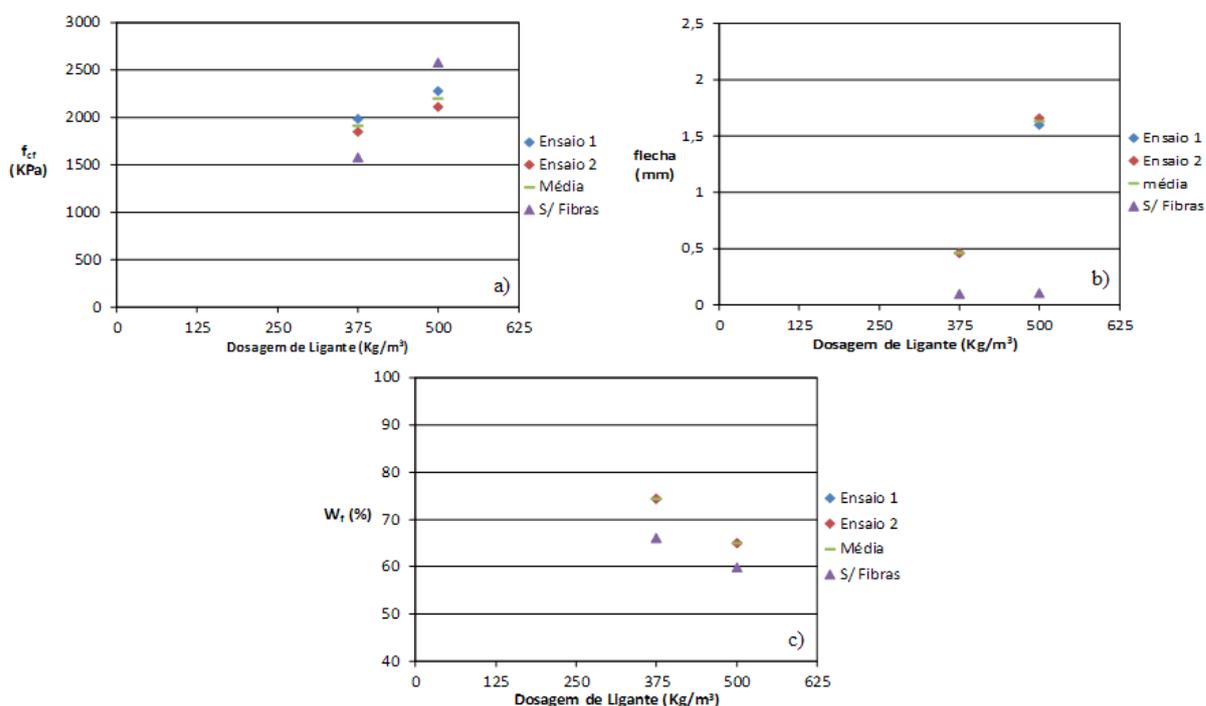


Figura 5.27 – Ensaio F realizados em provetes com fibras *DuomixM12* (na dosagem de 50kg/m³): análise da evolução de: a) f_{cf} ; b) flecha e c) w_f com a variação da dosagem de ligante.

5.5.3. Influência do tipo de fibra *DuomixM20* (comprimento da fibra)

A fim de se analisar a influência que o comprimento das fibras exerce sobre a resistência à flexão de provetes de solo quimicamente estabilizados foram elaborados ensaios de F. Os provetes foram preparados com igual dosagem de ligante e de fibras, 375 e 50Kg/m³, respectivamente, valores esses tomados como referência.

A análise da Figura 5.28 e do Quadro 5.4 revela a existência de um comportamento semelhante ao verificado nos ensaios UCS e T, verificando-se que as fibras de menor comprimento (*DuomixM12*) induzem valores de resistência superiores. Os resultados obtidos sugerem ser mais benéfico o aumento da dosagem fibras em detrimento da alteração do comprimento destas. Por outro lado, observando o comportamento pós-rotura, verifica-se que o aumento do comprimento concede ao material um comportamento mais dúctil.

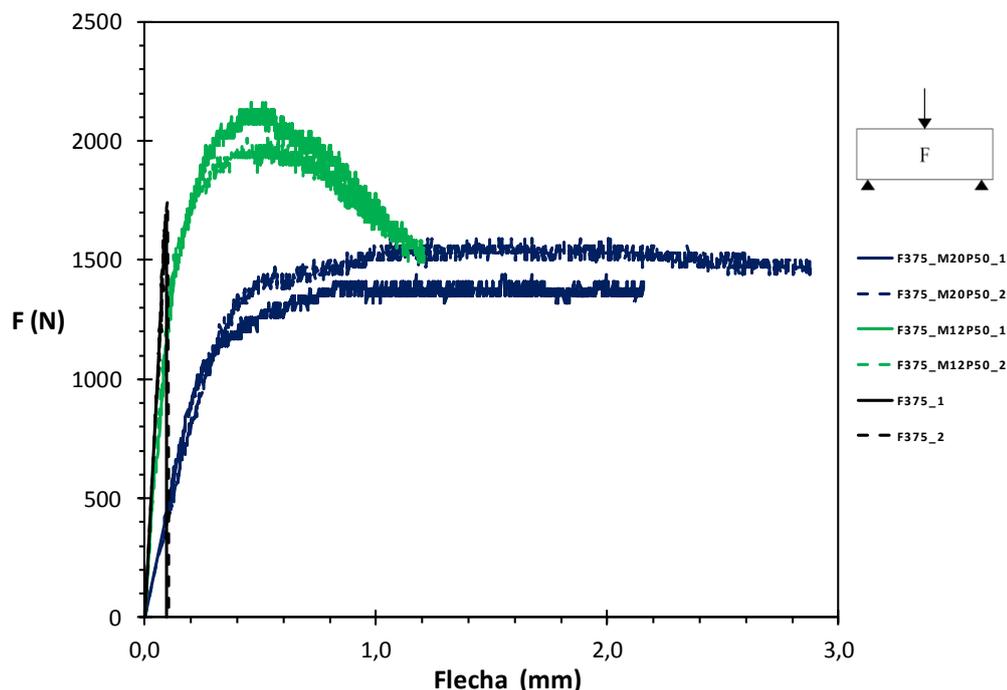


Figura 5.28 – Curvas força-flecha de ensaios F realizados em provetes com e sem incorporação de fibras de dois tipos: *DuomixM12* e *DuomixM20* (dosagem de fibras = 50kg/m^3 ; dosagem de ligante = 375 kg/m^3).

5.6.Comparação de Resultados

Nesta secção, procede-se à análise comparativa dos resultados obtidos nos diversos ensaios realizados. No Quadro 5.5 e Figura 5.29 apresentam-se as relações estabelecidas entre a resistência obtida nos ensaios (UCS, T, CD, F): $q_{iméd}^{(T)} / q_{uméd}^{(UCS)}$, $f_{cméd}^{(CD)} / q_{iméd}^{(T)}$, $f_{cfméd}^{(F)} / q_{iméd}^{(T)}$.

Quadro 5.5 – Comparação entre resistências obtidas para ensaios UCS, T, CD e F, para diferentes dosagens de ligante e diferentes tipos e dosagens de fibras de polipropileno.

Tipo de Fibra	Dosagem de Fibras (kg/m^3)	Dosagem de Ligante (kg/m^3)	$\frac{q_{iméd}^{(T)}}{q_{uméd}^{(UCS)}}$	$\frac{E_{u50méd}^{(T)}}{E_{u50méd}^{(UCS)}}$	$\frac{E_{u0,02méd}^{(T)}}{E_{u0,02méd}^{(UCS)}}$	$\frac{f_{cméd}^{(CD)}}{q_{iméd}^{(T)}}$	$\frac{f_{cfméd}^{(F)}}{q_{iméd}^{(T)}}$
Sem	-	375	0,144	7,144	6,810	1,864	4,172
		500	0,164	3,450	3,185	2,214	4,881
<i>DuomixM12</i>	50	375	0,089	2,015	2,071	2,354	8,108
	25		0,093	3,038	3,028	2,172	7,339
	50	500	0,116	4,949	4,917	1,645	7,796
	75		0,063	1,098	1,096	3,883	12,607
	100		0,057	0,872	0,886	3,546	11,062
<i>DuomixM20</i>	50	375	0,116	2,981	2,978	2,423	6,718

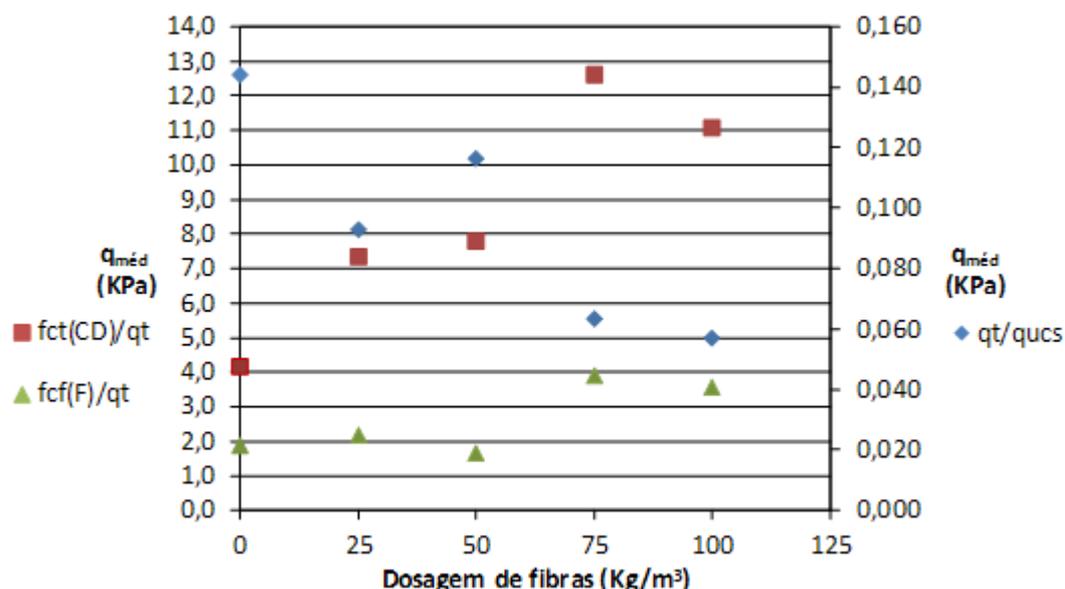


Figura 5.29 – Comparação entre resistências obtidas para ensaios UCS, T, CD e F: análise da evolução de: a) $f_{cfméd}^{(F)} / q_{méd}^{(T)}$, $f_{ctméd}^{(CD)} / q_{méd}^{(T)}$ e $q_{méd}^{(T)} / q_{méd}^{(UCS)}$ com a variação da dosagem de fibras *DuomixM12*.

Pela análise dos valores apresentados, constata-se que há uma diminuição da relação $q_{méd}^{(T)} / q_{méd}^{(UCS)}$ de 0,14-0,16 para 0,06-0,12 aquando da adição de fibras. No que diz respeito à relação entre a resistência obtida nos ensaios de compressão diametral (CD) e de flexão (F) com os ensaios de tracção, registam-se variações entre 1,6-3,9 e 7,3-12,6, respectivamente para $f_{ctméd}^{(CD)} / q_{méd}^{(T)}$ e $f_{cfméd}^{(F)} / q_{méd}^{(T)}$, concluindo-se que a introdução de fibras origina o aumento dessa relação, fundamentalmente motivado por uma expressiva diminuição da resistência obtida em ensaios de tracção simples, tal como constatado no Quadro 5.5. A Figura 5.29a) dá uma visão geral das relações entre as resistências obtidas para cada tipo de ensaio realizado. Estes resultados parecem indicar que há uma maior mobilização das fibras nos ensaios de CD e F do que nos ensaios de tracção directa, sendo o seu papel neste ensaio pouco relevante.

Em relação à comparação dos módulos de deformabilidade (Quadro 5.5), para níveis de deformação de 50% da carga de rotura ($E_{u50méd}^{(T)} / E_{u50méd}^{(UCS)}$) e para um nível de deformação de 0,02% ($E_{u0,02méd}^{(T)} / E_{u0,02méd}^{(UCS)}$), é possível constatar a existência de valores semelhantes independentemente do critério adoptado. Por outro lado, também se regista o decréscimo destas relações com o aumento da dosagem de fibras, sendo estes resultados coerentes com a inclusão na mistura de um material deformável (fibras) em relação a um tradicional solo estabilizado com ligante.

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1. Conclusões

Os objectivos iniciais do presente trabalho consistiam na avaliação da influência da dosagem de ligante e de fibras de polipropileno no comportamento do solo mole do Baixo Mondego quimicamente estabilizado, através de ensaios de compressão simples (UCS), tracção simples (T), compressão diametral (CD) e flexão (F), bem como compreender a melhor combinação entre a dosagem de ligante e de fibras a utilizar na prática. Concluído o trabalho experimental, apresentam-se em seguida as principais conclusões obtidas em cada tipo de ensaio.

- Ensaio UCS

Dos ensaios UCS, concluiu-se que a dosagem de ligante tem influência no comportamento do solo quimicamente estabilizado até à rotura, com ou sem incorporação de fibras, verificando-se que, com o aumento da dosagem de ligante aumenta a resistência à compressão simples e o módulo de deformabilidade, diminuindo a extensão de rotura. A incorporação de fibras no solo estabilizado é, em termos genéricos, contraproducente em termos mecânicos ($q_{umáx}$ e E_{u50}), facto que é atenuado à medida que se aumenta a dosagem de fibras, ou seja, a maior das dosagens de fibras analisadas (100Kg/m^3) parece se constituir como limite inferior na estabilização do solo com incorporação de fibras. Os resultados permitem igualmente concluir que da adição de fibras ao solo estabilizado, resulta uma alteração significativa do comportamento mecânico do material, sendo este caracterizado por pronunciado carácter dúctil (a resistência máxima é atingida para elevados níveis de deformação). Em relação ao tipo de fibras, *DuomixM12* e *DuomixM20*, os resultados sugerem que o aumento do comprimento destas não influencia de forma significativa a resistência, não obstante o facto de exibirem melhor comportamento pós-rotura. Para a mesma dosagem de ligante, é mais eficaz aumentar a dosagem do que o seu comprimento.

- Ensaio T

A partir dos ensaios T concluiu-se que, independentemente da presença/incorporação de fibras, as características mecânicas ($q_{umáx}$ e E_{u50}) melhoram com o aumento da dosagem de ligante, à semelhança do comportamento observado em compressão. A introdução de fibras no solo estabilizado mostrou ser contraproducente uma vez mais, não se tendo observado a

existência de qualquer relação entre a dosagem de fibras e as características mecânicas do material. Tal como o registado nos ensaios UCS, também aqui se concluiu que o aumento do comprimento das fibras (de 12mm para 20mm) não é benéfico em termos mecânicos. Comparando os resultados dos ensaios de T e UCS em termos de rigidez, definido para igual nível de deformação, é possível concluir que a rigidez em tracção é superior à de compressão, diminuindo essa relação com o aumento da dosagem de fibras, fruto da inclusão no solo estabilizado de um material mais deformável (fibras de polipropileno).

- Ensaio CD

Dos resultados obtidos nos ensaios CD concluiu-se, novamente, que a dosagem de ligante desempenha um papel determinante no comportamento mecânico do solo, contribuindo para o aumento da resistência e da rigidez. Com a inclusão de fibras no solo, não se observam melhorias em termos mecânicos comparativamente com o solo sem fibras. Considerando somente os provetes com fibras, parece existir um aumento da resistência com o aumento da dosagem de fibras. Em contraponto com os ensaios UCS e T, a mudança de comprimento das fibras, de 12 para 20mm, mostrou um melhor comportamento na resistência à tracção por compressão diametral, facto possivelmente relacionado com o modo de rotura (neste caso, parece ser maior a aderência solo-fibras).

- Ensaio F

A partir dos ensaios de flexão, concluiu-se que o comportamento mecânico do solo é fortemente influenciado pela dosagem de ligante. Os resultados da incorporação de fibras no solo estabilizado parecem sugerir a existência de um impacto positivo em termos mecânicos, para dosagens de fibras a partir de 50Kg/m³. À semelhança do ocorrido nos ensaios UCS e T, o aumento de comprimento das fibras não beneficiou a resistência à flexão, no entanto conferiu ao material um carácter mais dúctil.

Conclusões gerais:

O comportamento do solo quimicamente estabilizado, com ou sem incorporação de fibras, tem dois comportamentos distintos: o primeiro corresponde à fase pré-rotura, sendo essencialmente comandado pela resistência das ligações cimentícias, que estão intimamente ligadas à dosagem de ligante; o segundo referente à fase pós-rotura onde a presença de fibras, confere ao material um carácter mais dúctil, sendo este comportamento tanto mais evidente quando maior a dosagem de fibras.

As fibras podem ser consideradas mais eficazes quando orientadas/dispostas correctamente face à superfície de rotura. Quando distribuídas aleatoriamente, podem assumir posições não adequadas no interior do provete, podendo originar planos de fraqueza e, conseqüentemente, planos de rotura preferenciais.

A partir da análise do tipo de fibras *DuomixM12* (l=12mm) e *DuomixM20* (l=20mm), verificou-se que o aumento do seu comprimento não tem influência significativa no comportamento mecânico, sendo mais eficaz para a mesma dosagem de ligante, aumentar a dosagem de fibras do que o seu comprimento. Todavia, o aumento do comprimento das fibras induz um melhor comportamento pós-rotura, fruto da maior aderência entre a fibra e o solo.

6.2. Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão de trabalhos futuros, por forma a dar continuidade e ampliar o conhecimento sobre o estudo de solos reforçados com fibras, apresentam-se as seguintes propostas:

- Estudar o comportamento do solo mole do Baixo Mondego quimicamente estabilizado reforçado simultaneamente com fibras de polipropileno e metálicas, variando a dosagem de ambas as fibras de modo a otimizar essa quantidade;
- Fazer o mesmo estudo para outros tipos de ligante (variando as suas dosagens);
- Complementar o estudo do solo reforçado com fibras, fazendo para além dos ensaios realizados neste trabalho, outros tipos de ensaio;
- Analisar a influência do comprimento das fibras *DuomixM20*, concretizando o mesmo plano de estudo feito para as fibras *DuomixM12* e, assim, confrontar os resultados;
- Analisar o comportamento de outros tipos de solos melhorados e reforçados com fibras (por exemplo, areias);
- Estudar a viabilidade prática em campo da técnica de estabilização química aplicada a solos reforçados com fibras e, confrontar os resultados com os obtidos em laboratório;
- Estudar a estabilização química do solo mole do Baixo Mondego utilizando nanomateriais cimentícios com a adição de fibras polipropileno.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM CRD-C 164-92 (1992). “Standard test method for direct tensile strength of cylindrical concrete or mortar specimens”. American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 2166 (2000). “Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil”. American Society for Testing and Materials.
- BS 1377-3 (1990). “Methods of test for soils for civil engineering purposes – part 3: chemical and electro-chemical tests”. British Standards Institution, London.
- BS 1377-7 (1990). “Methods of test for soils for civil engineering purposes – part 7: Shear strength tests (total stress)”. British Standards Institution, London.
- Carneiro, F. L. (1943). “Um Novo Método para Determinação da Resistência à Tração dos Concretos”. Comunicação, 5. Reunião Associação Brasileira de Normas Técnicas, Publ. Instituto Nacional Tecnológico, Rio De Janeiro.
- Casagrande, M.D.T. (2001). “Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais”. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Coelho, P. (2000). “Caracterização Geotécnica de Solos Moles: Estudo do Local Experimental da Quinta da Foja (Baixo Mondego)”. Dissertação de Mestrado, Dep. de Eng^a Civil da FCTUC, Coimbra.
- Conterato, L. (2011). “Rochas Basálticas: Obtenção de parâmetros elásticos pelo ensaio de tração indireta”. Dissertação apresentada para a obtenção do Título de Engenheiro Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Consoli, N. C., Bassani, M. A. A., Festugato, L. (2010). “Effect of fiber-reinforcement on the strength of cemented soils”. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 28, pp.344-351.
- Consoli, N. C., Vendruscolo, M. A., Fonini, A. (2009). “Fiber reinforcement effects on sand considering a widecementation range”. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 27, pp.196-203.
- Consoli, N. C., Morais, R. R., Festugato, L. (2013). “Parameters Controlling Tensile and Compressive Strength of Fiber-Reinforced Cemented Soil”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 25.
- Consoli, N. C., Morais, R. R., Festugato, L. (2013). “Parameters Controlling Tensile and Compressive Strength of Fiber-Reinforced Cemented Soil”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 25.
- Consoli, N. C., Montardo, J. P., Prietto, P. D. M., Pasa, G. S. (2002). “Engineering behavior of sand reinforced with plastic waste”. *Journal of Geotechnical Environment Engineering*, Vol.128, pp. 462-472.

- Correia, A. A. S. (2011). “Aplicabilidade da Técnica de Deep Mixing aos Solos Moles do Baixo Mondego”. Dissertação de Doutoramento, Dep. de Eng^a Civil da FCTUC, Coimbra.
- Costa, J. N. P. (2012) “Estabilização de solos por via química e biológica”. Dissertação de Mestrado, Dep. de Eng^a Civil da FCTUC, Coimbra.
- Divya, P.V., Viswanadham, B. V., Gourc, J.P. (2013). “Evaluation of tensile strength-strain characteristics of fiber reinforced soil through laboratory tests”. *Journal of Materials in Civil Engineering*.
- Duomix (2010). BEKAERT Duomix M12. *Product Data Sheet*.
- Duomix (2010). BEKAERT Duomix M20. *Product Data Sheet*.
- E196 (1966). “Solos – Análise granulométrica”. Especificação do LNEC, Lisboa, Portugal.
- Fang, H.S. (1991). “Foundation engineering handbook”. Van Nostrand Reinhold, New York, p.923.
- Feuerharmel, M.R. (2000). “Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno”. Dissertação apresentada para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Freire, W.J. (1976). “Tratamento prévio do solo com aditivos químicos e seu efeito sobre a qualidade do solo-cimento”. Dissertação de Doutoramento, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- Frocht, M. M., (1948). “Photoelasticity – Vol. II”. John Wiley, New York, pp. 32-39.
- Hannant, L. (1994). “Fibre-reinforced Cements and Concrets”. 2nd edition, London .
- Illston, J.M. (1994). “Construction Materials: their Nature and behavior”. 2nd edition, London.
- Inglês, O., Metcalf, J. (1972). “Soil Stabilization: Principles and Practice”. Butterworths, Melbourne.
- Jiang, H., Cai, Y., Liu, J. (2010). “Engineering properties of soils reinforced by short discrete polypropylene fiber”. *Journal of Material in Civil Engineering*, ASCE, Vol.22, No. 12, pp. 1315-1322.
- Matos Fernandes, M. (2010). “Mecânica dos Solos: Conceitos e Princípios Fundamentais”. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Vol. I.
- Maher, M.H., HO, Y.C. (1994). “Mechanical properties of fiber soil composite”. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.120, No.8, pp. 1381-1393.
- NP EN 12390-3 (2011). “Ensaio do betão endurecido – Parte 3: Resistência à compressão de provetes”. Norma Portuguesa.
- NP EN 12390-6 (2011). “Ensaio do betão endurecido – Parte 6: Resistência à tracção por compressão de provetes”. Norma Portuguesa.
- NP EN 13286-42 (2011). “Misturas não ligadas e misturas tratadas com ligantes hidráulicos – Parte 42: Método de ensaio para a determinação da resistência à tracção indirecta para misturas tratadas com ligantes hidráulicos”. Norma Portuguesa.

-
- NP 83 (1965). “Solos – Determinação da Densidade das Partículas Sólidas”. Norma Portuguesa Definitiva.
- NP 84 (1965). “Solos – Determinação do Teor em Água”. Norma Portuguesa Definitiva.
- NP 143 (1969). “Solos – Determinação dos Limites de Consistência”. Norma Portuguesa Definitiva.
- NP EN 206-1 (2007). “Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade”. IPQ, edição de Junho de 2007.
- 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.
- NP EN 12390-3 (2011). “Ensaio do betão endurecido – Parte 3: Resistência à compressão de provetes”. Norma Portuguesa.
- NP EN 12390-5 (2009). “Ensaio do betão endurecido – Parte 5: Resistência à flexão de provetes”. Norma Portuguesa.
- Pinto, A. (2010). “Evolução e potencialidades das soluções de tratamento de terrenos recorrendo a tecnologias de solo-ligante em obras de fundações e de contenções”. 12º Congresso Nacional de Geotecnia.
- Silva, V.D. (2004). “Mecânica e Resistência dos Materiais”. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, edição de Setembro de 2004.
- Tang, C. S., Shi, B., Gao, W., Chen, F. J., Cai, Y. (2006). “Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil”. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 25, pp. 194-202.
- Taylor, G.D. (1994). “Materials in Construction”. Longman Scientific and Technical, 2nd edition, London.