



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

Estabilização química do solo mole do Baixo Mondego com incorporação de fibras metálicas

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

Autor

Vanessa Sofia Ferreira Antunes

Orientadores

Professor Doutor António Alberto Santos Correia

Professor Doutor Paulo José da Venda Oliveira

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

Coimbra, julho, 2014

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer, em primeiro lugar, aos meus pais, Sónia e Paulo, e irmã Rita, que me deram esta oportunidade de aprender e crescer ao longo dos últimos anos. Que me proporcionaram uma educação o mais completa possível em todos os campos, tornando a pessoa que sou hoje.

Agradeço também aos meus avós, Estrela, Alfredo e Fernanda, que às suas maneiras sempre me foram acompanhando.

Agradeço ao meu namorado, João, pela ajuda e companhia no laboratório, por me acompanhar e incentivar na elaboração deste documento.

Quero agradecer aos meus orientadores Professor António Alberto Correia e Professor Paulo da Venda Oliveira, pelas dúvidas esclarecidas, pelas dicas e pelo acompanhamento que me deram ao longo desta dissertação. E também ao senhor José António pela paciência e ajuda no laboratório.

Agradeço aos meus amigos e colegas, João Cid, Virgílio Ferreira e Emanuel Marques, que me foram ajudando e feito companhia no laboratório.

Agradeço à Cimpor, nas pessoas do Eng^o Paulo Rocha e da Eng^a Teresa Martins, pela cedência dos ligantes cimento Portland e escória granulada de alto-forno.

Agradeço à Biu International, na pessoa do Eng^o Erik Ulrix pela cedência das fibras metálicas.

RESUMO

A construção de aterros sobre solos moles está associada a problemas de estabilidade e elevados deslocamentos, tanto verticais como horizontais. A construção de obras nestas formações geotécnicas só é possível com a utilização de metodologias de melhoramento de solos. Uma das técnicas que tem sido aplicada com sucesso é a estabilização química de solos aplicada em profundidade, sendo as duas variantes mais conhecidas designadas por Deep Mixing (colunas) e Cutter Soil Mixing (barretas), as quais permitem reduzir a magnitude dos assentamentos e aumentar a estabilidade.

Nesta dissertação pretende-se analisar laboratorialmente a influência da adição das fibras metálicas *Dramix* RB305 no comportamento do solo mole do Baixo Mondego estabilizado quimicamente. Os parâmetros objeto de análise são a dosagem e o tipo de ligante, a dosagem de fibras e o tempo de mistura. A avaliação da resistência será efetuada por intermédio de ensaios de compressão não confinada (UCS) e de compressão diametral (CD, estes últimos para aferição indireta da resistência à tração), após um tempo de cura de 28 dias na câmara termohigrométrica.

Do presente trabalho, conclui-se que o comportamento mecânico do solo mole do Baixo Mondego é principalmente determinado pela dosagem de ligante. Os resultados também evidenciam que a incorporação de fibras origina uma mudança no comportamento pós-rotura do solo mole quimicamente estabilizado, principalmente quando sujeito a esforços de tração, passando de frágil a dúctil.

ABSTRACT

The construction of embankments over soft soils is associated with problems of stability and with the risk of soil displacement that can occur vertically or horizontally. Constructions in these specific geotechnical formations are only possible with the utilization of soil improvement methods. One of the most successful methods consists in the in-depth chemical stabilization of the soil foundation, as the two most famous variants are designated as Deep Mixing, and Cutter Soil Mixing, both allow reducing the magnitude of the settlements and increasing their stability.

In this dissertation it's intended to experimentally analyze the influence of adding metallic fibers *Dramix* RB305 in the behavior of the chemically stabilized of the soft soil Baixo Mondego. The parameters of the subject in analysis will be the dosage and the type of linking agent, the dosage of the fibers, and the mixture time. The evaluation of the resistance will be done by tests of unconfined compression strength (UCS) and of diametrical compression (CD, these for the indirect gauging/evaluation of traction resistance), after a curing period of 28 days in a thermal-hydrometric chamber.

From this essay we can conclude that the mechanical behavior of the soft soils of the Baixo Mondego is mostly determined by the dosage of the linking agent. The results also show a change in the post-rupture behavior of the chemically stabilized soft soil with the addition of fibers, mainly when put under traction strength, going from fragile to ductile.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE QUADROS	x
SIMBOLOGIA	xi
ABREVIATURAS	xiii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Contexto do trabalho.....	1
1.2 Estrutura da dissertação	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Solos estabilizados quimicamente	3
2.2 Solo reforçado com fibras.....	4
2.3 Solo estabilizado quimicamente e reforçado com fibras	6
2.4 Betão reforçado com fibras.....	11
3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	14
3.1 Solo mole do Baixo Mondego	14
3.1.1 Caracterização geotécnica	14
3.2 Ligantes.....	18
3.2.1 Cimento Portland CEM I 42,5 R	18
3.2.2 Escória Granulada de Alto-Forno.....	19
3.2.3 Cinzas volantes	20
3.2.4 Cal viva.....	20
3.3 Fibras	20
3.3.1 Fibras metálicas <i>Dramix RB305</i>	21
3.3.2 Fibras metálicas <i>Wiremix W30</i>	21
4 PROCEDIMENTO LABORATORIAL.....	23
4.1 Introdução	23
4.2 Procedimento experimental	23
4.2.1 Homogeneização do solo.....	23
4.2.2 Preparação dos provetes	23

4.3	Ensaio laboratoriais	25
4.3.1	Ensaio de Compressão Simples (UCS)	25
4.3.1.1	Procedimento do ensaio	25
4.3.1.2	Determinação de parâmetros.....	26
4.3.2	Ensaio de Compressão diametral (CD).....	27
4.3.2.1	Procedimento do ensaio	27
4.3.2.2	Determinação de parâmetros.....	27
4.4	Plano de ensaios	28
5	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	31
5.1	Introdução	31
5.2	Ensaio de compressão simples (UCS)	31
5.3	Ensaio de compressão diametral	34
5.4	Análise da influência do tempo de mistura.....	36
5.5	Análise da influência da dosagem de ligante	39
5.5.1	Sem fibras	39
5.5.2	Com fibras <i>Dramix</i>	41
5.6	Análise da influência da composição do ligante.....	45
5.7	Análise da influência da dosagem de fibras <i>Dramix</i>	48
5.8	Relação entre o teor em água e a resistência máxima.....	54
5.9	Relação entre a resistência à Tração e à Compressão.....	55
5.10	Comparação com o trabalho desenvolvido por Teles (2013).....	57
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	60
6.1	Conclusões	60
6.2	Trabalhos futuros	62
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Procedimento construtivo da técnica <i>deep mixing</i> (Correia, 2011).	4
Figura 2.2 – Influência da dosagem de fibras na: a) resistência máxima à compressão simples; b) extensão de rotura (adaptado de Al-azzo et al, 2006)	5
Figura 2.3 – Análise da influência do ângulo de dobragem para diferentes dosagens de fibras para o teor em água de 20% e o comprimento de: a) 1cm; b) 2cm; c) 3cm (Kalhor, 2008).	6
Figura 2.4 – Efeito do reforço com fibras na tensão de pico deviatória com a dosagem de fibras (adaptado de Consoli et al., 2009).	7
Figura 2.5 – Cuvas tensão- extensão sem fibras e com 0,5% de fibras: a) sem cimento; b) com 4% de cimento; c) com 10% cimento (adaptado de Consoli et al., 2009).	7
Figura 2.6 – Variação da resistência à compressão com a dosagem de cimento: a) sem fibras; b) com fibras (adaptado Consoli et al., 2010).	8
Figura 2.7 – Variação da resistência à compressão com o teor em água: a) dosagem de cimento de 2%; b) dosagem de cimento de 4% (adaptado Consoli et al., 2010).	8
Figura 2.8 – Curva tensão-extensão para ensaios UCS realizados sobre provetes com várias dosagens de fibras metálicas <i>Wiremix</i> (dosagem de ligante = 375 kg/m ³) (Teles, 2013).	9
Figura 2.9 – Análise da evolução de $q_u^{máx}$ com a dosagem de ligante (dosagem de fibras = 50 kg/m ³) através de ensaios UCS (Teles, 2013).	10
Figura 2.10 – Curva força-deslocamento vertical para ensaios CD para várias dosagens de ligante (sem fibras) (Teles, 2013).	10
Figura 2.11 – Curva força-deslocamento vertical para ensaios CD para várias dosagens de fibras metálicas <i>Wiremix</i> (dosagem de ligante = 375 kg/m ³) (Teles, 2013).	11
Figura 2.12 – Distribuição das tensões no betão fissurado sujeito a esforços de tração: a) sem fibras; b) com fibras (adaptado de Figueiredo, 2000).	12
Figura 2.13 – Ensaios à flexão de provetes de betão. Influência do tipo de fibra na curva carga-deformação (Ulrix e Ferreira, 2011).	13

Figura 3.1 – Solo mole do Baixo Mondego: a) grau de sobreconsolidação em profundidade; b) densidade das partículas sólidas; c) teor em matéria orgânica (Coelho, 2000). ...	15
Figura 3.2 – Curva granulométrica do solo em estudo.....	16
Figura 3.3 – Classificação através do triângulo de Feret.....	18
Figura 3.4 – Geometria das fibras <i>Dramix RB305</i> (adaptado de <i>Dramix</i> , 2010)	21
Figura 3.5 – Geometria das fibras <i>Wiremix W30</i> (<i>Wiremix</i> (2001)).....	22
Figura 4.1 – a) Desmoldagem do provete UCS; b) Prensa WYKEHAM FARRANCE LTD <i>Tristar 5000kg</i> ; c) exemplo de provete após a realização do ensaio UCS.	26
Figura 4.2 – Ensaio de compressão diametral: a) início do ensaio; b) exemplo de provete após a realização do ensaio.	27
Figura 5.1 – Curva tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre provete com dosagem de ligante de 50 kg/m ³ e 30kg/m ³ de fibras <i>Dramix</i>	34
Figura 5.2 – Ensaio CD do provete com dosagem de ligante de 50 kg/m ³ e 30kg/m ³ de fibras <i>Dramix</i> : a) imediatamente antes do início do ensaio; b) Curva tensão-extensão do ensaios.....	36
Figura 5.3 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre provetes com fibras <i>Dramix</i> (30kg/m ³) e dosagem de ligante de 250 kg/m ³ com variação do tempo de mistura.	37
Figura 5.4 – Ensaio UCS sobre provetes com a dosagem de ligante 250kg/m ³ e dosagem de fibras <i>Dramix</i> 30kg/m ³ por variação do tempo de mistura - análise da evolução de: a) $q_u^{máx}$; b) ϵ_a ; c) E_{u50}	37
Figura 5.5 – Curvas força-deslocamento vertical de ensaios CD realizados sobre provetes com fibras <i>Dramix</i> (30kg/m ³) e dosagem de ligante de 250kg/m ³ por variação do tempo de mistura.....	38
Figura 5.6 – Ensaio CD sobre provetes com a dosagem de ligante 250kg/m ³ e dosagem de fibras <i>Dramix</i> 30kg/m ³ por variação do tempo de mistura - análise da evolução de: a) f_{ct} ; b) ϵ_a	38
Figura 5.7 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre provetes sem de fibras com variação da dosagem de ligante.	39
Figura 5.8 – Ensaio UCS realizados sobre provetes sem fibras por variação da dosagem de ligante - análise da evolução de: a) $q_u^{máx}$; b) ϵ_a ; c) E_{u50}	40
Figura 5.9 – Curvas força-deslocamento vertical de ensaios CD realizados sobre provetes sem fibras com variação da dosagem de ligante.	40
Figura 5.10 – Ensaio CD realizados sobre provetes sem fibras por variação da dosagem de ligante - análise da evolução de: a) f_{ct} ; b) ϵ_a	40

Figura 5.11 – Provetes CD no final dos ensaios a) Provete CD_L75_F0_1; b) Provete CD_L175_F0_1.	41
Figura 5.12 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre provetes com 30kg/m ³ de fibras <i>Dramix</i> com variação da dosagem de ligante.	42
Figura 5.13 – Ensaio UCS realizados sobre provetes com 30kg/m ³ de fibras <i>Dramix</i> por variação da dosagem de ligante - análise da evolução de: a) $q_u^{máx}$; b) ϵ_a ; c) E_{u50} ; d) w_f	42
Figura 5.14 – Variação da resistência máxima à compressão simples (a) e da rigidez (b) com a dosagem de ligante para provetes com 30kg/m ³ de fibras.	43
Figura 5.15 – Curvas força-deslocamento vertical de ensaios CD realizados sobre provetes com 30kg/m ³ de fibras <i>Dramix</i> com variação da dosagem de ligante.	44
Figura 5.16 – Ensaio CD realizados sobre provetes com 30kg/m ³ de fibras <i>Dramix</i> por variação da dosagem de ligante - análise da evolução de: a) f_{ct} ; b) ϵ_a	44
Figura 5.17 – Variação da resistência máxima à tração através de ensaios de compressão diametral com a dosagem de ligante.	45
Figura 5.18 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre provetes com fibras <i>Dramix</i> (30kg/m ³) com variação da composição do ligante (dosagem de ligante = 175 kg/m ³).	46
Figura 5.19 – Ensaio UCS realizados sobre provetes com a dosagem de ligante de 175kg/m ³ e dosagem de fibras <i>Dramix</i> de 30kg/m ³ para várias composições de ligante - análise da evolução de: a) $q_u^{máx}$; b) ϵ_a ; c) E_{u50}	46
Figura 5.20 – Curvas força-deslocamento vertical de ensaios CD realizados sobre provetes com fibras <i>Dramix</i> (30kg/m ³) com variação da composição do ligante (dosagem de ligante = 175 kg/m ³).	47
Figura 5.21 – Ensaio CD realizados sobre provetes com a dosagem de ligante de 175kg/m ³ e dosagem de fibras <i>Dramix</i> de 30kg/m ³ para várias composições de ligante - análise da evolução de: a) f_{ct} ; b) ϵ_a	48
Figura 5.22 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre provetes com 125kg/m ³ de ligante com variação da dosagem de fibras <i>Dramix</i>	49
Figura 5.23 – Ensaio UCS sobre provetes com a dosagem de ligante 125kg/m ³ por variação da dosagem de fibras <i>Dramix</i> - análise da evolução de: a) $q_u^{máx}$; b) ϵ_a ; c) E_{u50}	49
Figura 5.24 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre provetes com 175kg/m ³ de ligante com variação da dosagem de fibras <i>Dramix</i>	50

Figura 5.25 – Ensaio UCS realizados sobre provetes com a dosagem de ligante de 175kg/m ³ por variação da dosagem de fibras <i>Dramix</i> - análise da evolução de: a) $q_u^{máx}$; b) ϵ_a ; c) E_{u50}	51
Figura 5.26 – Curvas força-deslocamento vertical de ensaios CD realizados sobre provetes com 125kg/m ³ de ligante com variação da dosagem de fibras <i>Dramix</i>	52
Figura 5.27 – Ensaio CD realizados sobre provetes com a dosagem de ligante de 125kg/m ³ com variação da dosagem de fibras <i>Dramix</i> - análise da evolução de: a) f_{ct} ; b) $\delta_{v\ rot}$. ..	52
Figura 5.28 – Curvas força-deslocamento vertical de ensaios CD realizados sobre provetes com 175kg/m ³ de ligante com variação da dosagem de fibras <i>Dramix</i>	53
Figura 5.29 – Ensaio CD realizados sobre provetes com a dosagem de ligante de 175kg/m ³ para várias dosagens de fibras <i>Dramix</i> - análise da evolução de: a) f_{ct} ; b) $\delta_{v\ rot}$	53
Figura 5.30 – Relação entre a resistência à compressão simples e o teor em água final.....	54
Figura 5.31 – Relação entre a resistência à tração e o teor em água final.	55
Figura 5.32 – Relação entre a resistência à tração por compressão diametral e à compressão simples: a) para a dosagem de fibras de 30kg/m ³ ; b) para as dosagens de fibras de 0kg/m ³ , 10kg/m ³ e 50kg/m ³	56
Figura 5.33 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre provetes sem fibras com dosagem de ligante de 125 kg/m ³	58
Figura 5.34 – Curvas força-deslocamento vertical de ensaios CD realizados sobre provetes sem fibras com dosagem de ligante de 125 kg/m ³	58
Figura 5.35– Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre provetes com 50 kg/m ³ de fibras <i>Wiremix</i> e com dosagem de ligante de 125 kg/m ³	59
Figura 5.36 – Curvas força-deslocamento vertical de ensaios CD realizados sobre provetes com 50 kg/m ³ de fibras <i>Wiremix</i> e com dosagem de ligante de 125 kg/m ³	59

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1– Principais características do solo mole do Baixo Mondego (adaptado de Teles, 2013).	17
Quadro 3.2 – Composição química do Cimento Portland CEM I 42,5 R (dados do fabricante)	19
Quadro 3.3 – Composição química da escória granulada de alto-forno (dados do fabricante)	19
Quadro 3.4 – Composição química da cinza volante proveniente do centro de produção de Sines (dados do fabricante).....	20
Quadro 3.5 – Composição típica da cal viva CL90 (dados do fabricante).....	20
Quadro 4.1 – Plano de ensaios base	29
Quadro 4.2 – Plano de ensaios para o tempo de mistura.....	29
Quadro 4.3 – Plano de ensaios para o tipo de ligante.....	30
Quadro 5.1 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios UCS	32
Quadro 5.2 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios CD.....	35
Quadro 5.3 – Quociente entre a resistência à tração e à compressão	57

SIMBOLOGIA

- A_{corr} - Área transversal do provete corrigida tendo em conta a deformação radial
 C_c - Índice de compressibilidade
 C_r - Índice de recompressibilidade
 C_α - Coeficiente de consolidação secundária
 d - Diâmetro dos provetes
 E_{u50} - Módulo de deformabilidade para 50% da carga de rotura
 $E_{u50}^{méd}$ - Módulo de deformabilidade médio para 50% da carga de rotura
 F - Força medida na célula de carga
 f_{ct} - Resistência à tração por compressão diametral (ensaios CD)
 $f_{ct}^{méd}$ - Resistência à tração média por compressão diametral (ensaios CD)
 G - Densidade das partículas sólidas
 h - Altura do provete
 IP - Índice de plasticidade
 L - Comprimento da linha de contacto do provete CD
 OCR - Grau de sobreconsolidação
 OM - Teor em matéria orgânica
 q_u - Tensão obtida para ensaios UCS
 $q_u^{máx}$ - Resistência máxima ou tensão de rotura obtida para ensaios UCS
 $q_u^{méd}$ - Resistência máxima média ou tensão de rotura média obtida para ensaios UCS
 r - raio do provete
 S - Grau de saturação
 w - Teor em água
 w_f - Teor em água no final do ensaio
 $w_f^{méd}$ - Teor em água médio no final do ensaio
 w_L - Limite de liquidez
 w_P - Limite de plasticidade
- $\Delta\delta_v$ - Variação do deslocamento vertical
 δ_v - Deslocamento vertical
 $\delta_{v\ rot}$ - Deslocamento vertical na rotura
 $\delta_{v\ rot}^{méd}$ - Deslocamento vertical na rotura médio
 ϵ_a - Extensão axial
 ϵ_{rot} - Extensão axial de rotura

$\epsilon_{rot}^{méd}$ - Extensão axial média de rotura

γ_{sat} - Peso volúmico saturado

Formulas químicas

Al_2O_3 – Óxido de alumínio ou alumina

CaO – Óxido de cálcio

CO_2 – Dióxido de carbono

Fe_2O_3 – Óxido de ferro

K_2O – Óxido de potássio

MgO – Óxido de magnésio

MnO – Óxido de manganésio

Na_2O – Óxido de sódio

SiO_2 – Dióxido de silício ou sílica

SO_3 – Trióxido de enxofre

ABREVIATURAS

BS – British Standards

CD – Ensaio de Compressão Diametral

EC2 – Eurocódigo 2

DEC – Departamento de Engenharia Civil

EN – Norma Europeia (European Standard)

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NP – Norma Portuguesa

PVC – Policloreto de Vinilo

UCS – Ensaio de Compressão simples ou uniaxial (Unconfined Compressive Strength)

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto do trabalho

Com a evolução da humanidade e implementação do sedentarismo o Homem passou a ter a necessidade de construir infra e superestruturas em número e diversidade crescentes. Atualmente nalgumas zonas do globo existe escassez de solos com características adequadas à construção, pelo que urge a necessidade de promover a melhoria desses solos de características inferiores. Existem diversos fatores que levam à construção sobre este tipo de solos, nomeadamente geográficos, económicos, políticos, entre outros.

De facto, o melhoramento de solos é uma das técnicas mais antigas da Engenharia Civil, sendo as primeiras aplicações datadas de cerca de 3000 anos para a construção de templos na antiga Babilónia, existindo ainda hoje muralhas que foram construídas por intercalação de solo e mantas de raízes (Ulrix e Ferreira, 2011). Nessa época, na China, o reforço de solos fazia-se com madeira, bambu ou palha (Cristelo, 2001).

O melhoramento de solo, tem como objetivo aumentar a resistência, reduzir a deformabilidade e/ou diminuir a permeabilidade, através de processos físicos e/ou químicos que melhoram as propriedades mecânicas do solo. Atualmente existem vários métodos de melhoramento de solos, tais como, *jet grouting*, injeções de calda, estabilização química, entre outros. A estabilização química do solo consiste na adição de ligantes (cimento, cal, cinzas volantes, escórias de alto forno, etc.) ao solo, os quais promovem o desenvolvimento de reações químicas entre a água, o ligante e o solo, que levam à formação de produtos cimentícios que agregam as partículas do solo, induzindo a melhoria das características mecânicas, ou seja, aumento da resistência e diminuição da deformabilidade.

Esta dissertação tem como objetivo principal estudar o comportamento do solo mole do “Baixo Mondego” quimicamente estabilizado, com cimento Portland CEM I 42,5R, e reforçado com adição de fibras metálicas *Dramix RB305*. O programa experimental consiste na realização de ensaios laboratoriais de compressão simples não confinada e compressão diametral em provetes com 28 dias de cura, preparados laboratorialmente. Os parâmetros objetos de estudo são a dosagem de ligante e dosagem de fibras metálicas, tendo por vista a sua otimização.

Complementarmente, também é analisada a influência de diferentes composições de ligante, bem como a influência do tempo de mistura.

1.2 Estrutura da dissertação

Após o presente capítulo de carácter introdutório que pretende enquadrar a dissertação, seguir-se-ão cinco capítulos que pormenorizarão o trabalho efetuado.

No capítulo 2 pretende-se efetuar o ponto de situação sobre o estado de conhecimento e as investigações mais recentes, abordando a temática dos solos estabilizados quimicamente, reforçados ou não com fibras metálicas. Assim, serão apresentadas as ideias decorrentes sobre estudos relevantes sobre a estabilidade química de solos, o solo reforçado com fibras, o solo estabilizado quimicamente e reforçado com fibras e o betão reforçado com fibras.

No capítulo 3 proceder-se-á à caracterização/descrição dos materiais utilizados na elaboração desta dissertação, incidindo principalmente na caracterização geotécnica do solo mole do “Baixo Mondego”, bem como na caracterização dos ligantes e das fibras metálicas.

No capítulo 4 apresenta-se o plano de ensaios, sendo também descrito o procedimento experimental, desde a homogeneização do solo, preparação dos provetes até à realização dos ensaios laboratoriais de compressão não confinada e compressão diametral.

O capítulo 5 contempla a análise e discussão dos resultados obtidos para cada tipo de ensaios laboratoriais realizados.

Por último, no capítulo 6 apresentam-se as conclusões mais relevantes e propostas para a continuação do trabalho desenvolvido nesta dissertação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Solos estabilizados quimicamente

O conceito moderno de estabilização química de solos iniciou-se nos primórdios do século XX, nos Estados Unidos da América, com o objetivo de melhorar a capacidade de suporte de solos de fundação em estradas e aeroportos. A mistura de areia e argila levou a resultados benéficos, mais tarde incluiu-se nesta mistura cimento, betume e alguns químicos (Cristelo, 2001).

A evolução tecnológica levou ao aparecimento de diversas variantes desta técnica, tendo surgido nos Estados Unidos da América a variante de *deep mixing*, que consiste na mistura *in situ* do solo com ligantes em profundidade. No entanto, os maiores desenvolvimentos tecnológicos desta variante dão-se no Japão e nos países Nórdicos a partir da década de 60 do século passado. Nos primórdios, o *deep mixing* era aplicado fundamentalmente para reduzir os assentamentos e aumentar a estabilidade de aterros sobre solos moles, contudo, atualmente a técnica é utilizada numa gama alargada de solos e de aplicações, tais como, estruturas de suporte de escavações, sistemas de controlo de percolação, barreiras impermeáveis, diminuição do potencial de liquefação, mitigação da propagação de vibrações, etc. (Correia, 2011)

A aplicação da técnica de *deep mixing* consiste na introdução no solo de uma haste vertical acoplada a pás misturadoras, sendo que no movimento descendente se procede à destruição da estrutura intrínseca do solo, enquanto que no movimento ascendente, o ligante é injetado através de pequenos aspersores junto às pás, sendo a mistura entre solo e o ligante promovida pela rotação das pás (Figura 2.1). Este processo visa a execução de elementos verticais de solo estabilizado, quer em forma de colunas com diâmetro variável entre 0,3 a 3m, quer em forma de painéis de solo reforçado, os quais podem ter espessuras entre 0,5 a 0,8m e larguras entre 2,4 a 2,8m (Correia, 2011). A tecnologia atual permite alcançar profundidades consideráveis, da ordem de 40m no caso de colunas, podendo chegar aos 70m de profundidade no caso de painéis (Correia, 2011).

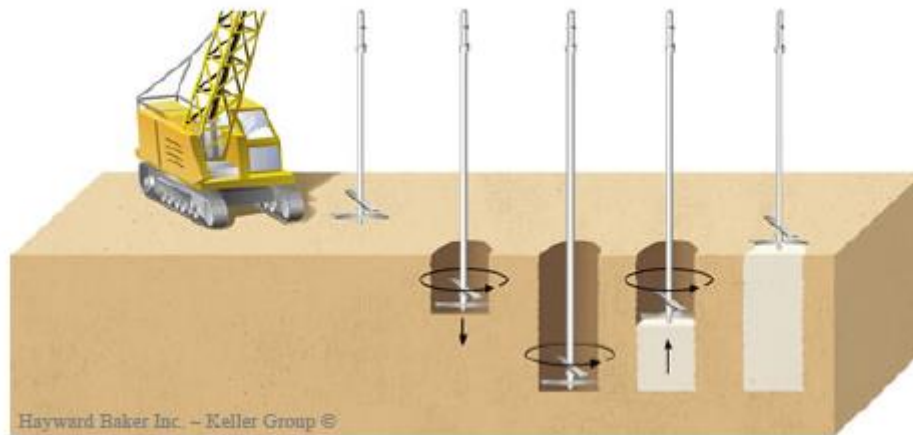


Figura 2.1 – Procedimento construtivo da técnica *deep mixing* (Correia, 2011).

O ligante injetado no solo pode ser introduzido sob via seca ou em calda, correspondendo ao método de *deep mixing* por via seca ou húmida, respetivamente. A via seca tem como principal vantagem o menor teor em água final do solo estabilizado, o que permite uma maior resistência mecânica, sendo normalmente utilizada em argilas saturadas, permitindo a execução de colunas com diâmetros entre 0,3 a 1 m. Por outro lado, a via húmida garante uma melhor homogeneização da mistura, sendo mais versátil, uma vez que pode ser aplicada tanto a solos moles como em rochas brandas, permitindo a execução de colunas com diâmetros entre 0,3 a 3 m. (Venda Oliveira, 2009)

O cimento e a cal viva são os ligantes mais usuais na técnica do *deep mixing*, sendo no entanto possível recorrer a outros ligantes, isolados ou misturados com os primeiros. O ligante mais usual hoje em dia é o cimento Portland, isolado ou misturado com outros ligantes, tais como, escórias granuladas de alto-forno, cinzas volantes, sílica de fumo, entre outros (Correia, 2011).

2.2 Solo reforçado com fibras

Al-azzo et al. (2006) estudaram a influência da adição de fibras metálicas a um solo argiloso não orgânico. Para esse estudo os autores realizaram ensaios de compressão simples (UCS) com percentagens de fibras que variam entre os 0 e os 8%. Concluíram que o incremento da dosagem de fibras origina o aumento da resistência de pico e maiores extensões de rotura, ou seja, o aumento da dosagem de fibras torna o material mais dúctil (Figura 2.2).

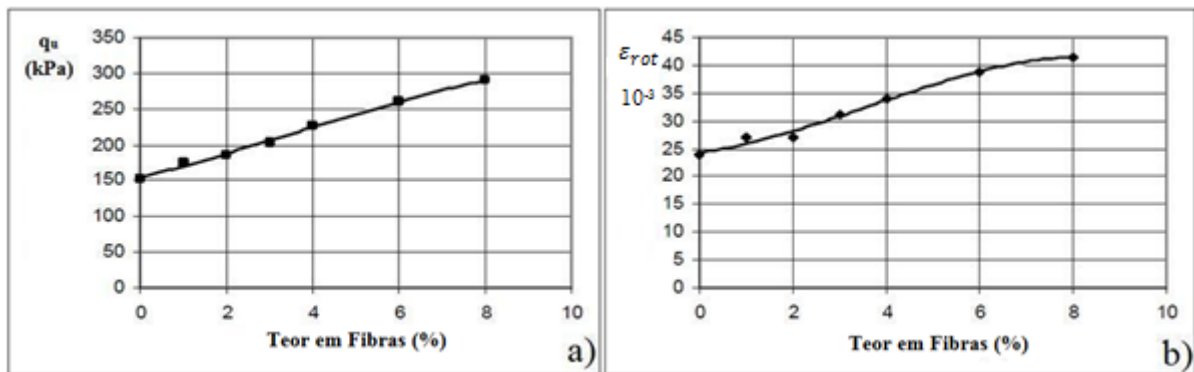
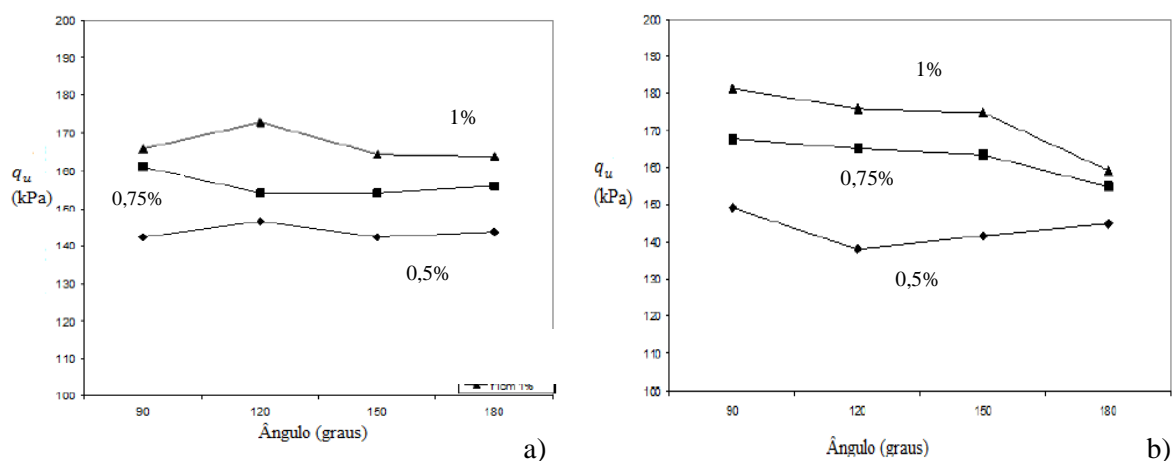


Figura 2.2 – Influência da dosagem de fibras na: a) resistência máxima à compressão simples; b) extensão de rotura (adaptado de Al-azzo et al, 2006)

Kalhor (2008) conduziu um estudo sobre um solo argiloso com predominância de caulinite, tendo analisado para além do efeito da dosagem de fibras (0,5, 0,75 e 1%), a influência do seu comprimento (1, 2 e 3cm) e da dobragem em diferentes ângulos (90, 120, 150 e 180°), na resistência à compressão uniaxial através de ensaios UCS. O estudo foi realizado para o teor em água de 20%, sendo os resultados deste estudo ilustrados nas Figura 2.3. Os melhores resultados foram obtidos para o comprimento de fibras de 2cm, dobradas num ângulo de 120°, na dosagem de 1% relativo à massa seca do solo. O aumento de resistência para o comprimento de 2cm é devido ao facto que para a mesma dosagem, as fibras de 3cm são em menor número, e por isso é menos provável que estas fibras intercetem o plano de rotura; por outro lado, o comprimento das fibras com 1cm parece ficar aquém do comprimento ideal para a sua efetiva mobilização.



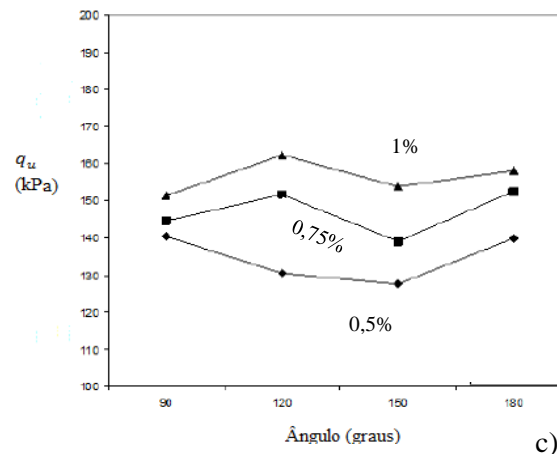


Figura 2.3 – Análise da influência do ângulo de dobragem para diferentes dosagens de fibras para o teor em água de 20% e o comprimento de: a) 1cm; b) 2cm; c) 3cm (Kalhor, 2008).

2.3 Solo estabilizado quimicamente e reforçado com fibras

Consoli et al. (2009) estudaram a introdução de fibras de polipropileno numa areia reforçada com cimento Portland. As dosagens de cimento utilizadas foram de 0%, 1%, 4%, 7% e 10%, para as dosagens de fibras de 0% e 0,5%. Os resultados indicam que a introdução de fibras é mais eficaz para os provetes sem ligante, no entanto, as fibras contribuem para o aumento da resistência de pico para baixos teores de ligante (até 4%, Figura 2.4), efeito que se perde com o aumento do teor em ligante. Este facto é explicado pela necessidade de deformação de solo junto às fibras para que estas sejam mobilizadas, logo, a tensão mobilizada depende da magnitude das deformações do solo e da rigidez das fibras. No provete sem ligante as fibras conseguem aumentar a resistência para deformações elevadas (Figura 2.5a). Nos provetes com baixa dosagem de ligante, o cimento aumenta a resistência de pico e a rigidez, ainda assim as deformações são grandes o suficiente para mobilizar a resistência das fibras, contribuindo estas para o aumento da tensão de pico (Figura 2.5b). Quando mais rígido for o provete (maiores teores de ligante) menor será a mobilização da resistência das fibras e menor a contribuição destas para a resistência de pico. Para teores de ligante maiores que 4% a rotura ocorre para deformações pequenas, por isso não existe a mobilização da resistência das fibras antes da rotura, não contribuindo para o aumento da resistência de pico.

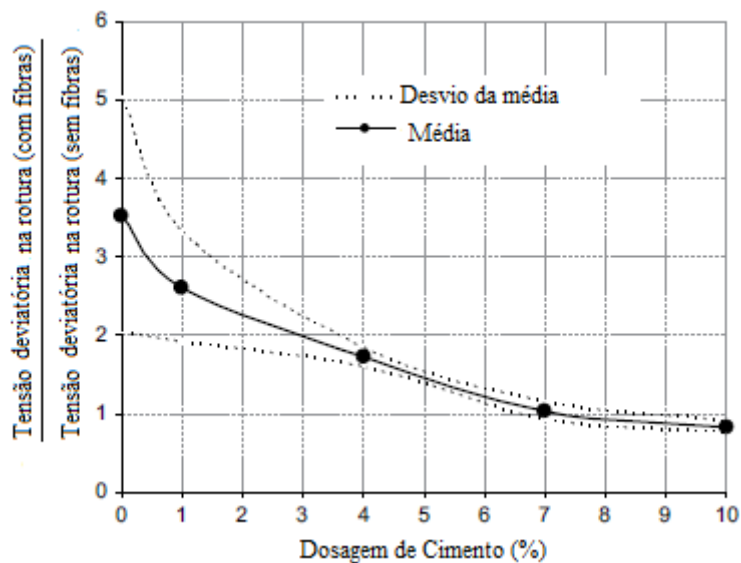


Figura 2.4 – Efeito do reforço com fibras na tensão de pico deviatória com a dosagem de fibras (adaptado de Consoli et al., 2009).

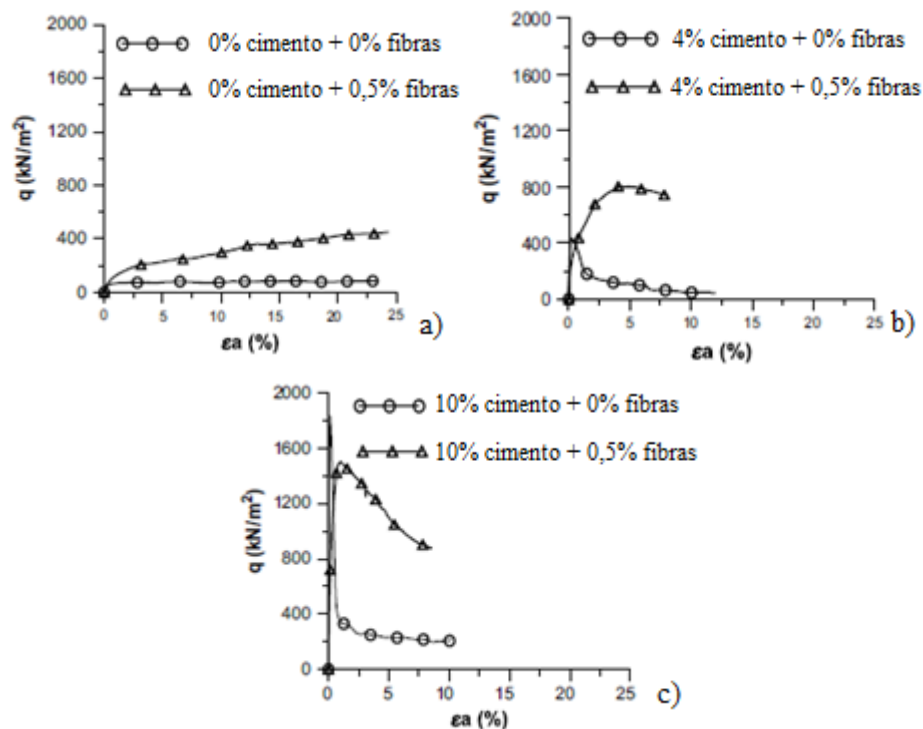


Figura 2.5 – Cuvas tensão- extensão sem fibras e com 0,5% de fibras: a) sem cimento; b) com 4% de cimento; c) com 10% cimento (adaptado de Consoli et al., 2009).

Num outro estudo Consoli et al. (2010) estudaram a resistência à compressão de um solo arenoso quimicamente estabilizado sem e com reforço de fibras de polipropileno, cujos resultados são apresentados nas Figuras 2.6 e 2.7. Os resultados mostram o acréscimo significativo de resistência com o aumento da dosagem de cimento, independentemente do reforço ou não com fibras. Constata-se igualmente que a incorporação de fibras tem um efeito benéfico, originado o incremento da resistência à compressão uniaxial independentemente do teor em água do solo.

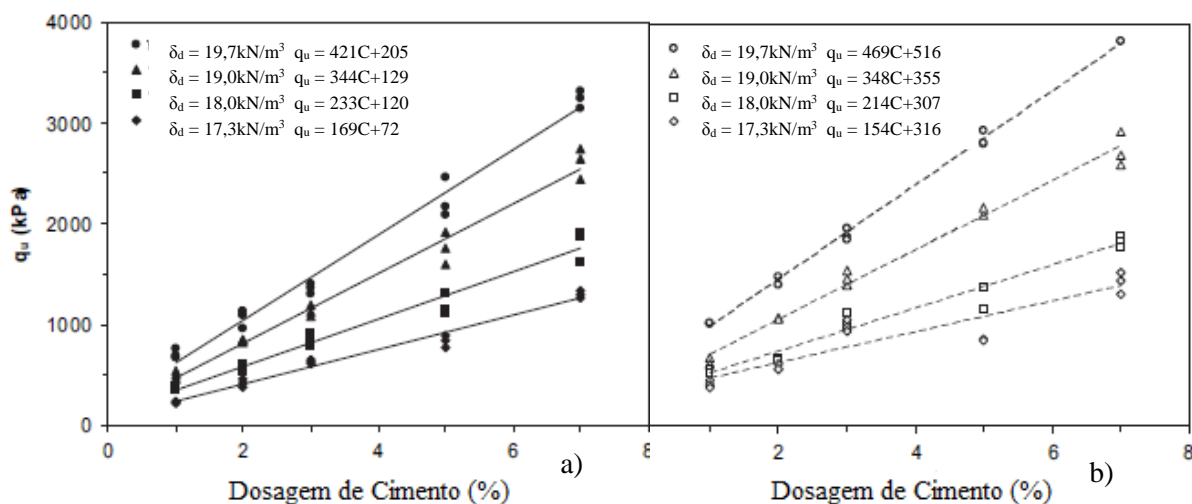


Figura 2.6 – Variação da resistência à compressão com a dosagem de cimento: a) sem fibras; b) com fibras (adaptado Consoli et al., 2010).

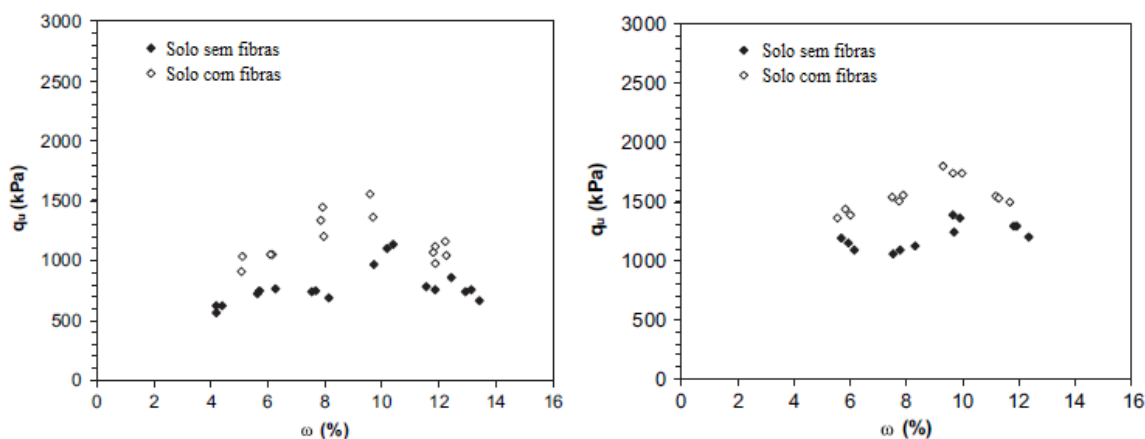


Figura 2.7 – Variação da resistência à compressão com o teor em água: a) dosagem de cimento de 2%; b) dosagem de cimento de 4% (adaptado Consoli et al., 2010).

Sukontasukkul e Jamsawang (2011) concluíram do estudo realizado com fibras metálicas com 35 e 60mm (razão comprimento/diâmetro de 64 e 67, respetivamente) que a utilização de fibras

com menor comprimento traduz-se num melhor comportamento mecânico. Isto deve-se ao facto de que, com fibras mais compridas ser mais difícil garantir a uniformização do provete no processo de mistura e moldagem é, resultando em provetes com maior porosidade e menor resistência.

Em contraponto com os resultados de Consoli et al. (2009) e Consoli et al. (2010), Teles (2013), concluiu a adição de fibras metálicas a um solo mole quimicamente estabilizado origina a diminuição da resistência à tração e à compressão, tendo justificado este comportamento com a distribuição aleatória das fibras que podem criar planos de fraqueza nos provetes (Figuras 2.8, 2.9, 2.10 e 2.11). Adicionalmente Teles (2013) constatou que a quantidade de ligante era o parâmetro fundamental na descrição do comportamento do solo estabilizado e reforçado com fibras. Da análise mais aprofundada dos resultados constata-se que tal comportamento se deve ao facto de terem sido utilizados elevados teores em ligante (desde 13 a 60% correspondendo a 125kg/m^3 e 500kg/m^3 , respetivamente), aos quais está associado um material mais resistente e rígido, não se chegando a mobilizar a resistência das fibras. No entanto, com o aumento da deformação (pós-rotura de pico), as fibras começam a “trabalhar” conferindo ao material resistência residual (Figuras 2.9 e 2.12).

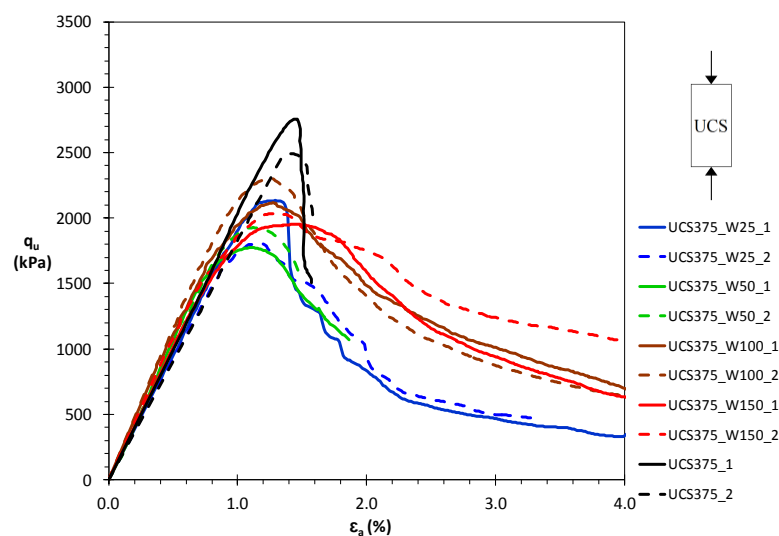


Figura 2.8 – Curva tensão-extensão para ensaios UCS realizados sobre provetes com várias dosagens de fibras metálicas *Wiremix* (dosagem de ligante = 375 kg/m^3) (Teles, 2013).

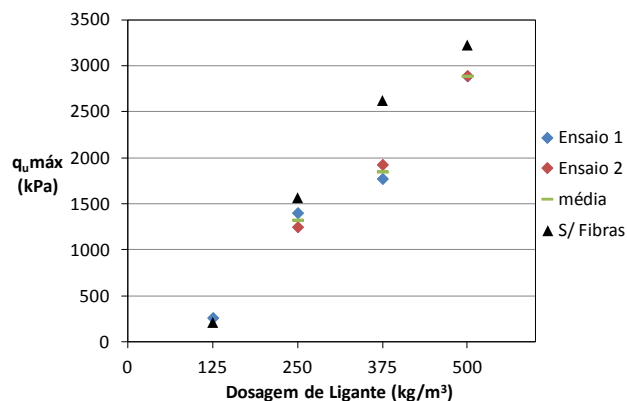


Figura 2.9 – Análise da evolução de $q_u^{\text{máx}}$ com a dosagem de ligante (dosagem de fibras = 50 kg/m^3) através de ensaios UCS (Teles, 2013).

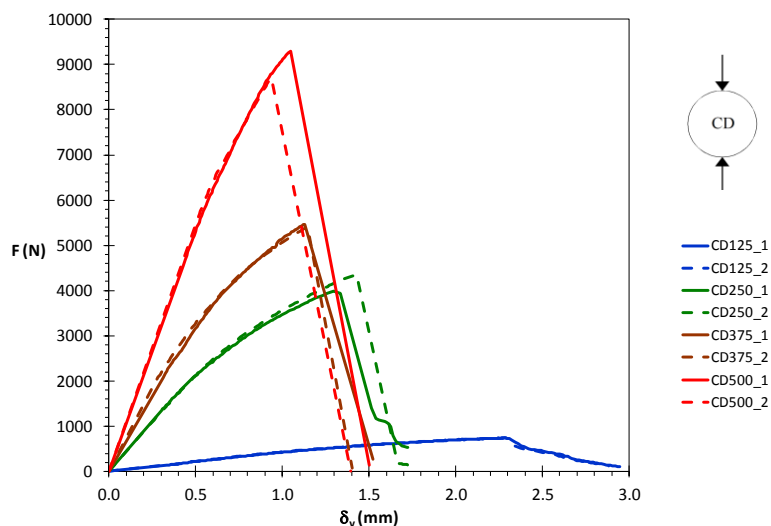


Figura 2.10 – Curva força-deslocamento vertical para ensaios CD para várias dosagens de ligante (sem fibras) (Teles, 2013).

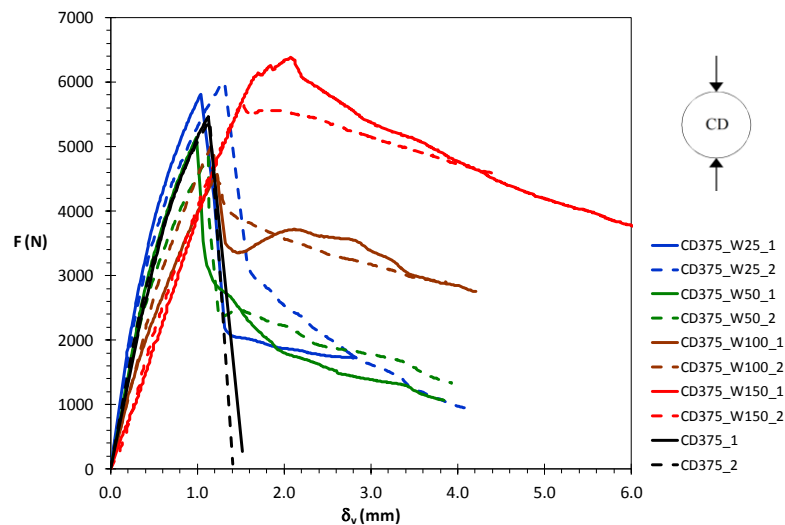


Figura 2.11 – Curva força-deslocamento vertical para ensaios CD para várias dosagens de fibras metálicas *Wiremix* (dosagem de ligante = 375 kg/m³) (Teles, 2013).

2.4 Betão reforçado com fibras

O betão apresenta uma resistência à tração muito inferior à resistência de compressão, variando a relação entre as duas resistências em torno dos 0,07 a 0,11 (Figueiredo, 2000). A reduzida capacidade de resistência à tração advém da criação e propagação das fissuras quando o betão é sujeito a este tipo de esforços. Quando uma peça de betão apresenta uma fissura, a trajetória de tensões é alterada induzindo a concentração de tensões na zona adjacente à fissura (Figura 2.12a). Com a introdução de fibras no betão pode-se atenuar essa concentração de tensões, atuando as fibras como ponte de transferência de tensões como se pode observar na Figura 2.12b). A adição de fibras ao betão altera o comportamento frágil do betão, no entanto, os níveis de tensão transferidos através das fibras nas fissuras depende de aspetos como o comprimento e a dosagem de fibras (Figueiredo, 2000).

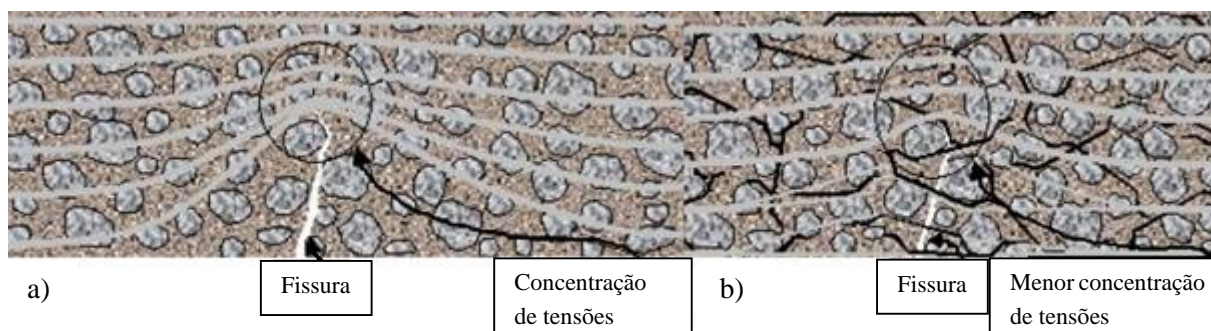


Figura 2.12 – Distribuição das tensões no betão fissurado sujeito a esforços de tração: a) sem fibras; b) com fibras (adaptado de Figueiredo, 2000).

O betão reforçado com fibras metálicas pode substituir completamente o betão com armadura tradicional em estruturas como lajes apoiadas no solo, fundações, paredes e em revestimentos de túneis. Em estruturas que exijam uma maior capacidade de carga, a aplicação do betão reforçado com fibras pode reduzir a utilização de armaduras convencionais ou de pré-esforço (Ulrix e Ferreira, 2011). A utilização de fibras no betão melhora significativamente as seguintes características:

- Ductilidade;
- Resistência à fissuração;
- Resistência ao corte;
- Resistência ao impacto;
- Resistência última.

Tendo em conta que a distribuição de fibras no betão é aleatória e descontínua, as fibras não são tão eficazes a resistir a esforços de tração como os varões de aço da armadura tradicional, no entanto a proximidade entre fibras conduz a um melhor controlo da fendilhação (Ulrix e Ferreira, 2011). A tensão de rotura à compressão de um betão reforçado com fibras mantém-se aproximadamente constante independentemente da dosagem de fibras, podendo existir um ligeiro acréscimo ou decréscimo na resistência. Quando sujeito a esforços de tração e para dosagens de fibras superiores a 2%, o acréscimo de resistência pode ser na ordem de 30% a 40%, dependendo da quantidade de fibras dispostas segundo a direção dos esforços de tração (Proença, 2004).

A aplicação das fibras é de maior importância em estruturas muito esbeltas, em que a armadura convencional não pode ser usada, em locais com cargas e deformações muito elevadas (revestimentos de túneis), e no controlo da fendilhação induzida por humidade ou diferenças de temperatura (lajes ou pavimentos) (Ulrix e Ferreira, 2011). Na aplicação de betão projetado reforçado em túneis existe a dificuldade em prever a localização dos esforços de tração, sendo por isso benéfica a utilização de fibras, uma vez que estas se distribuem por todo o betão,

garantindo em qualquer ponto a resistência a estes esforços (Ulrix e Ferreira, 2011). Atualmente já existem métodos de dimensionamento de estruturas resistentes de betão reforçado com fibras, onde a substituição dos varões de aço pelas fibras é total ou parcial (Ulrix e Ferreira, 2011).

Na Figura 2.13 estão representadas as curvas carga-deformação provenientes de ensaios de flexão com provetes de betão projetado com armadura convencional e reforçado com fibras metálicas (*Dramix 65/35*) e sintéticas (*Barchip 4350* e *STRUX 85/60*). Constata-se que para pequenas deformações as fibras de metálicas suportam uma carga maior comparativamente às fibras de polipropileno e aos provetes armados convencionalmente. No entanto, com o aumento da deformação, este efeito reduz-se, passando os melhores resultados a serem assegurados pela armadura convencional (Ulrix e Ferreira, 2011).

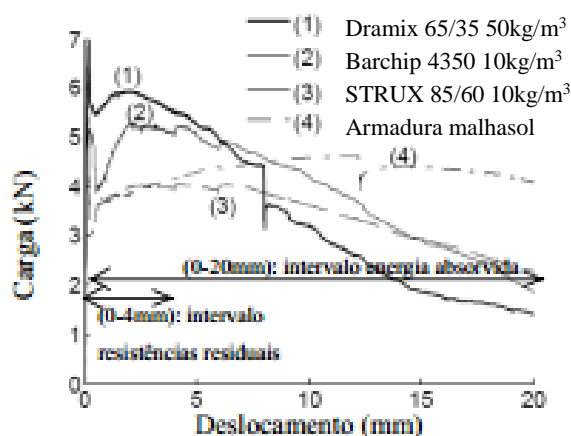


Figura 2.13 – Ensaio à flexão de provetes de betão. Influência do tipo de fibra na curva carga-deformação (Ulrix e Ferreira, 2011).

3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

O presente capítulo pretende caracterizar o solo mole do Baixo Mondego, os materiais aglomerantes que constituem as diversas combinações de ligante e as fibras metálicas utilizadas no trabalho laboratorial.

3.1 Solo mole do Baixo Mondego

Num passado geológico recente, aquando da última época glaciária, designada de Würm, cerca de 30% da superfície terrestre estava coberta por glaciares com espessuras entre 2 a 4km, o que levou a uma descida do nível do mar de aproximadamente 120m, o que originou uma forte ação erosiva junto à foz dos rios, escavando vales profundos. No final da Würm o aumento da temperatura média do planeta levou à redução dos glaciares provocando uma subida no nível médio do mar (transgressão flandriana), consequentemente o perfil longitudinal dos rios mudou, diminuindo a velocidade da corrente dos rios, o que levou ao aumento da sedimentação junto à foz e à formação de depósitos aluvionares litorais, dando origem a diversas formações de solos moles (Venda Oliveira, 2009). Um desses exemplos é o depósito de solos moles do Baixo Mondego, o qual segundo Correia (2011) tem idade inferior a 20 000 anos, tendo-se formado depois da última fase da época Plistocénica do período Quaternário.

3.1.1 Caracterização geotécnica

O solo mole em estudo localiza-se numa parcela de terreno agrícola da Quinta da Foja, junto a Santa Eulália, entre os km 11 e 12 da A14/IP3. De acordo com Coelho (2000) o solo apresenta-se normalmente consolidado a partir de profundidades entre os 4 e 6m, encontrando-se a camada mais superficial ligeiramente sobreconsolidada induzida pelas variações do nível médio do mar e por causa das necessidades agrícolas (cultivo de arroz) (Figura 3.1a). Na Figura 3.1 apresentam-se igualmente a evolução em profundidade da densidade das partículas sólidas e do teor em matéria orgânica, este último com forte impacto sobre as propriedades do solo.

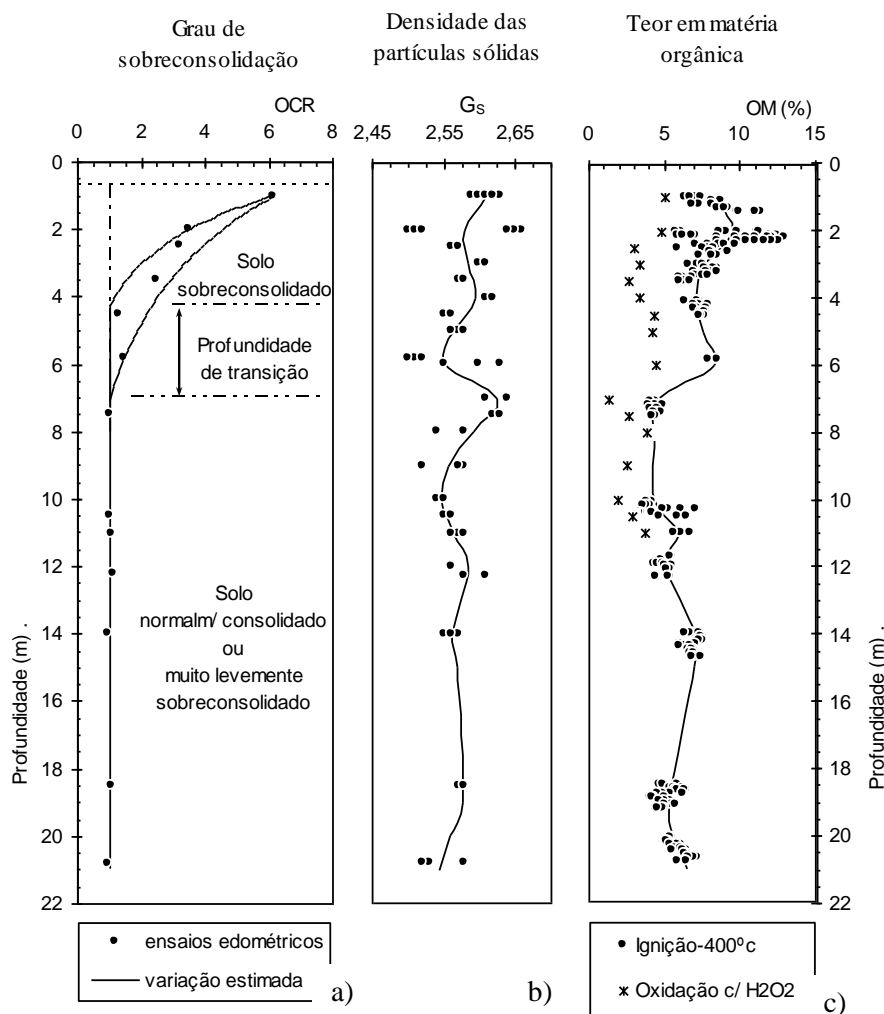


Figura 3.1 – Solo mole do Baixo Mondego: a) grau de sobreconsolidação em profundidade; b) densidade das partículas sólidas; c) teor em matéria orgânica (Coelho, 2000).

Para caracterizar o solo mole em estudo, procedeu-se a ensaios para a determinação da densidade de partículas sólidas (G), da composição granulométrica, do teor em matéria orgânica e dos limites de consistência (w_p e w_L)

Como o teor em água natural determinado por Correia (2011) é de 80,87%, no laboratório houve a preocupação de manter esse valor. Assim, durante o trabalho laboratorial o teor em água foi controlado com base na norma NP 84 (1965).

Densidade de partículas sólidas

A determinação da densidade das partículas sólidas (G) foi efetuada de acordo com a norma NP 83 (1965). A partir do resultado de três amostras definiu-se o valor médio de $G = 2,574$, o qual se encontra entre 2,555 e 2,58, valores avaliados por Correia (2011) e Coelho (2000),

respetivamente. Segundo Coelho (2000) a presença significativa de matéria orgânica pode justificar o baixo valor obtido.

Limites de consistência

A avaliação dos limites de consistência foi efetuada de acordo com a norma NP 143 (1969), tendo-se obtido para o limite de liquidez (w_L) o valor 80,2%, e para o limite de plasticidade (w_P) 42,9%, resultando um índice de plasticidade (IP) de 37,3%.

Composição granulométrica

A composição granulométrica, definida como a distribuição percentual das partículas do solo de acordo com as suas dimensões, foi efetuada seguindo a especificação do LNEC E 196 (1966). Na Figura 3.2 apresenta-se a curva granulométrica obtida.

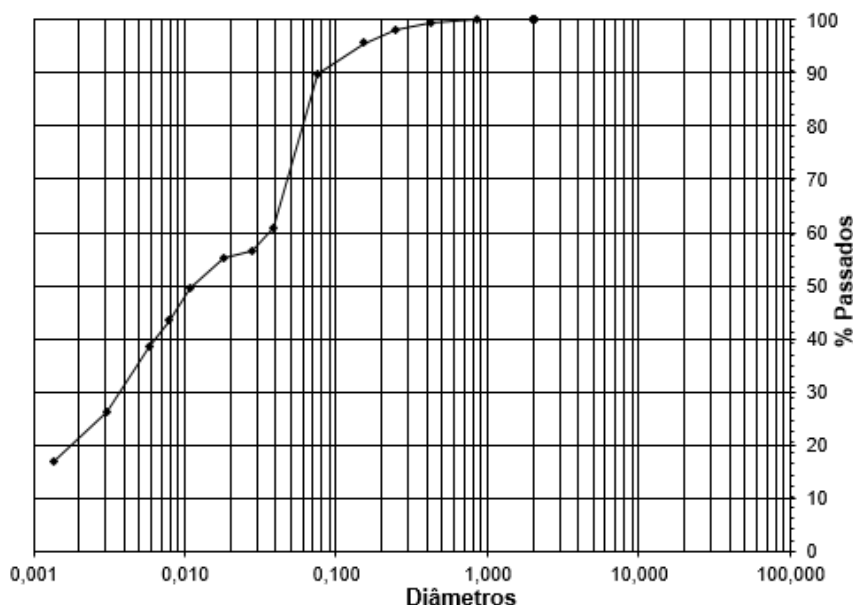


Figura 3.2 – Curva granulométrica do solo em estudo

Constata-se que a fração predominante é a siltosa correspondendo a 57%, 20% da massa total é areia, correspondendo a fração de argila a 23%. Quando se compara os resultados obtidos com os estudos anteriores (Coelho, 2000; Correia, 2011; Teles, 2013) verifica-se que existe uma pequena variação, frequente num solo com variabilidade espacial como o solo em estudo.

Teor em matéria orgânica

Na avaliação do teor em matéria orgânica utilizou-se o método das perdas na ignição (BS 1377-3, 1990), o qual segundo Coelho (2000) é o mais adequado, em comparação com método oxidimétrico (E 201, 1967) e o método de oxidação húmida (E 196, 1966).

A determinação do teor em matéria orgânica foi determinada com base em oito amostras, as quais estiveram submetidas a uma temperatura de referência de 50°C durante 24 horas, sendo sujeitas nas 24 horas seguintes a uma temperatura de ignição de 400°C. Estas temperaturas resultam do estudo conduzido por Coelho (2000) sobre o mesmo solo. O teor em matéria orgânica médio foi de 8,13%, com uma variação entre 7,79 e 8,37%.

O quadro 3.1 resume as principais características do solo mole do Baixo Mondego determinadas por Coelho (2000), Correia (2011), Teles (2013) e no presente estudo, para amostras recolhidas à profundidade de 2,5m.

Quadro 3.1– Principais características do solo mole do Baixo Mondego (adaptado de Teles, 2013).

Características do Solo		Coelho (2000)	Correia (2011)	Teles (2013)	Presente estudo
Composição Granulométrica	Argila (%)	13 - 30	8 - 12	25	23
	Silte (%)	54 - 73	71	61	57
	Areia (%)	14 - 16	17 - 21	14	20
Peso Volúmico Saturado	γ_{sat} (kN/m ³)	14,80	14,56	-	-
Densidade das Partículas	G	2,58	2,555	2,559	2,574
Teor em Água Natural	w (%)	81	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	8,13
Limites de Consistência	w _p (%)	40	42,80	41,9	42,9
	w _L (%)	77	71,03	68	80
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	-	-
Coeficiente de Consolidação	C _{α}	0,006	0,02	-	-

Classificação do solo

Com base na curva granulométrica pode-se afirmar que existe uma predominância de silte no solo, não sendo no entanto desprezável as quantidades de argila e areia existentes. O solo classifica-se granulometricamente como um silte argiloso, de acordo com a Figura 3.3.

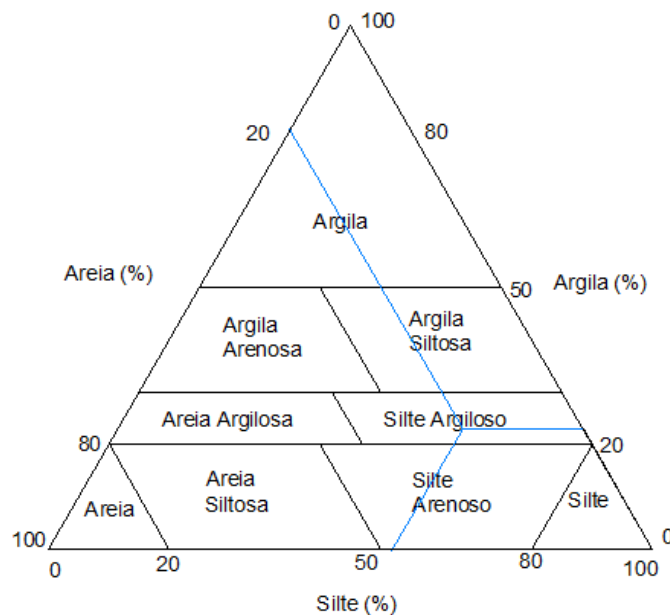


Figura 3.3 – Classificação através do triângulo de Feret

Segundo a classificação unificada (ASTM D 2487, 1998), tendo em conta a composição granulométrica (passados no peneiro nº200 maior que 50%), o limite de liquidez e o teor em matéria orgânica, o solo mole do Baixo Mondego pode classificar-se como silte orgânico (OH). Atendendo à classificação do solo é de prever que este apresente fraca resistência ao corte e elevada compressibilidade.

3.2 Ligantes

A estabilização química do solo será preferencialmente realizada através de uma composição de ligantes de cimento Portland CEM I 42,5R e escória granulada de alto-forno, na proporção 3:1 referida à massa seca dos ligantes (valor estabelecido por Correia, 2011) Para o estudo do tipo de ligante outras composições serão estudadas, todas tendo por base o cimento aplicado isoladamente ou combinado na mesma proporção em massa (3:1), com cal viva ou cinzas volantes de Sines. Seguidamente descrevem-se as principais características e o processo de fabrico de cada um dos ligantes.

3.2.1 Cimento Portland CEM I 42,5 R

O cimento Portland é um material inorgânico finamente moído, que quando misturado com água forma uma pasta que ganha presa devido a reações de hidratação, e depois de endurecida a mistura mantém a sua resistência, mesmo que seja humedecida ou imersa em água (Branco, 2009).

O processo de fabrico do cimento Portland começa pela britagem do calcário e argila, são posteriormente misturados e moídos em moinhos de esferas de aço, até estarem devidamente homogeneizados. De seguida, a matéria-prima é levada para o forno rotativo, dando-se a fusão dos aluminatos e ferratos à temperatura de 1450°C. Como resultado da cozedura formam-se pequenas esferas de cor cinzenta, a que se dá o nome de clínquer, as quais são arrefecidas à saída do forno e armazenadas para mais tarde serem moídas. Aquando da moagem do clínquer é comum a introdução de adjuvantes e aditivos (Branco, 2009). No Quadro 3.2 apresenta-se a composição química do cimento Portland utilizado no presente estudo.

Quadro 3.2 – Composição química do Cimento Portland CEM I 42,5 R (dados do fabricante)

Componentes	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃
Conteúdo (%)	63	19	5	3	3	3

3.2.2 Escória Granulada de Alto-Forno

A escória granulada de alto-forno, doravante designada somente de escória, é constituída pelos mesmos componentes que o cimento Portland mas variando as suas proporções. As escórias são um subproduto industrial resultante do fabrico do ferro fundido ou do aço em alto-forno, obtidas pela fusão das impurezas do minério de ferro com cinzas do coque e materiais fundentes (calcário e dolomite) (Cst@, 2014). Segundo a mesma referência, devido à diferença de densidade entre a escória e o ferro gusa estes são insolúveis, como escória tem a menor densidade fica à superfície e é conduzida até ao local onde será arrefecida. A escória pode ser arrefecida de duas formas distintas: a primeira consiste em deixá-la ao ar até arrefecer, neste processo a escória não adquire propriedades aglomerantes sendo usada como inerte; na segunda forma a escória líquida é levada para granuladores onde é arrefecida com recurso a jatos de água sob alta pressão. Neste último método a escória fica com uma estrutura vítrea, e apresenta propriedades hidráulicas latentes, podendo ser utilizada como aditivo para o cimento Portland.

Neste trabalho foram usadas duas escórias granuladas de alto-forno distintas. A composição química da primeira (e mais utilizada) apresenta-se no Quadro 3.3, ao passo que a composição química da segunda não foi fornecida pelo fabricante até à data.

Quadro 3.3 – Composição química da escória granulada de alto-forno (dados do fabricante)

Componentes	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	MnO	K ₂ O
Conteúdo (%)	37	39	12	0,85	7	0,33	2	0,52

3.2.3 Cinzas volantes

As cinzas volantes são um subproduto industrial resultante da queima de carvão em fornalhas, onde as impurezas (parte não combustível) entram parcialmente em fusão, dando origem a partículas que se aglomeram e solidificam em pequenas esferas de matéria irregular a que se dá o nome de cinzas volantes (Correia, 2011).

As cinzas volantes baixam o calor de hidratação e aumentam a resistência química aos sulfatos porque fixam a cal livre (Branco, 2009). A composição química das cinzas volantes depende do tipo de carvão queimado, todavia, esta deve conter um mínimo de 25% de dióxido de silício e óxido de alumínio quando as cinzas são misturadas com o cimento Portland. No Quadro 3.4 apresenta-se a composição química da cinza volante utilizada, a qual é oriunda do Centro de Produção de Sines.

Quadro 3.4 – Composição química da cinza volante proveniente do centro de produção de Sines (dados do fabricante).

Componentes	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Conteúdo (%)	4	55	22	7	2	0,48	2	0,70

3.2.4 Cal viva

A cal viva é obtida a partir da decomposição de carbonato de cálcio da rocha calcária. A rocha calcária é moída e aquecida a elevadas temperaturas em fornos industriais, e quando se atinge temperaturas da ordem dos 1000°C o carbonato de cálcio transforma-se em dióxido de carbono e óxido de cálcio, ou seja, em cal viva (Branco, 2009; Correia, 2011). No Quadro 3.5 encontra-se descrita a composição típica da cal viva utilizada neste trabalho.

Quadro 3.5 – Composição típica da cal viva CL90 (dados do fabricante)

Componentes	CaO + MgO	MgO	SO ₃	CO ₂
Conteúdo (%)	≥ 90	≤ 5	≤ 2	≤ 4

3.3 Fibras

Neste trabalho utilizou-se dois tipos de fibras metálicas como elementos de reforço do solo mole do Baixo Mondego quimicamente estabilizado. Na generalidade dos estudos recorreu-se

à fibra *Dramix* RB305, uma vez que o outro tipo de fibras, *Wiremix* W30, já foi objeto de intensos estudos realizados por Teles (2013). Seguidamente descrevem-se as principais características de cada uma das fibras.

3.3.1 Fibras metálicas *Dramix* RB305

As fibras *Dramix* RB305, doravante mencionadas por *Dramix*, são fabricadas pela BEKAERT a partir de arame de aço enformado a frio (Teles, 2013), possuindo pontas em gancho de forma a maximizar a mobilização da resistência à tração (Belgobekaert@, 2014). Como se pode observar na Figura 3.4 as fibras têm um comprimento de 30mm e 0,55mm de diâmetro, possuem uma resistência à tração de 1345MPa, sendo o módulo de Young de 210GPa (Dramix, 2012).



Figura 3.4 – Geometria das fibras *Dramix* RB305 (adaptado de Dramix, 2012)

As principais aplicações destas são na utilização de betão projetado no suporte de túneis, pavimentos industriais e fabrico de peças pré-fabricadas (Belgobekaert@, 2014). A função das fibras *Dramix* é reforçar o betão, podendo substituir completamente a armadura tradicional.

3.3.2 Fibras metálicas *Wiremix* W30

As fibras metálicas *Wiremix* W30, designadas a partir deste ponto por *Wiremix*, são produzidas pela BEKAERT, possuindo 30mm de comprimento (Figura 3.5) e uma largura de 2,1mm. A sua forma frisada pretende garantir uma maior superfície de contacto com o material envolvente, maximizando o atrito mobilizado (Teles, 2013). A resistência a esforços de tração é superior a 700kPa, e o seu módulo de elasticidade é de aproximadamente 200GPa (Wiremix, 2013).

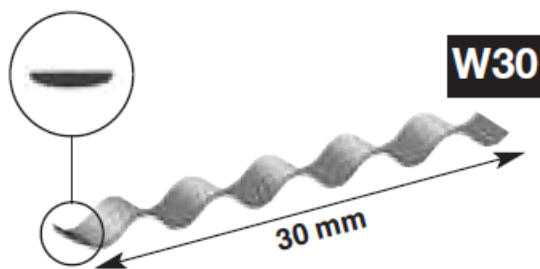


Figura 3.5 – Geometria das fibras *Wiremix* W30 (Wiremix (2001)).

Tal como as fibras *Dramix*, as fibras *Wiremix* pretendem reforçar o betão, sendo usualmente usadas na estabilização de taludes, no suporte de túneis e em obras de reparação (Vival@, 2014).

4 PROCEDIMENTO LABORATORIAL

4.1 Introdução

O presente capítulo visa a descrição dos trabalhos laboratoriais, bem como a apresentação do plano de ensaios desenvolvido no presente trabalho.

4.2 Procedimento experimental

Seguidamente descrevem-se os procedimentos inerentes à preparação laboratorial dos provetes, desde a homogeneização do solo até ao armazenamento dos provetes na câmara termohigrométrica.

4.2.1 Homogeneização do solo

De modo a garantir a reprodutibilidade dos resultados é necessário assegurar que as amostras de solo mole ensaiadas exibem propriedades semelhantes, para o que se procedeu à prévia homogeneização do solo. Para tal, a partir de uma grande amostra de solo mole ($\approx 1\text{m}^3$) retirou-se uma parcela com aproximadamente 300kg, suficiente para a realização de todo o trabalho laboratorial. Esta amostra foi sujeita a períodos de mistura manual, alternados com mistura mecânica (Sammic *BM11*), até se obter uma massa de solo homogénea. Durante este processo, o teor em água da amostra foi controlado por forma a se garantir o valor medido em campo (80,87%, Correia, 2011). Por fim, a amostra de solo homogeneizado foi dividida por pequenas caixas (aproximadamente 40kg), as quais foram isoladas com película aderente e colocadas numa camara termohigrométrica à temperatura de $20\pm 2^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $95\pm 5\%$, até à data da sua utilização.

4.2.2 Preparação dos provetes

Para a preparação laboratorial dos provetes utilizaram-se os materiais/utensílios e o procedimento a seguir descritos

Utensílios:

- Moldes cilíndricos em PVC;
- Fita-cola;
- Misturadora (Sammic BM11);
- Luvas;
- Espátulas;
- Colher de pedreiro;
- Varão para apiloar;
- Placa circular;
- Proveta;
- Balanças;
- Cronómetro;
- Cápsulas;
- Estufa;
- Sacos plásticos;
- Etiquetas.

Procedimento laboratorial

O interior dos moldes de PVC são inicialmente revestidos por uma fina película de vaselina, para facilitar a posterior extração do provete. De seguida coloca-se a base do molde que consiste em película aderente, um círculo de papel de acetato (com um diâmetro ligeiramente inferior ao do tubo de PVC), e fita-cola. Os moldes utilizados para os provetes de compressão simples têm um diâmetro (d) de 101,6mm e uma de altura (h) 200mm, correspondendo a uma razão h/d =2:1, de acordo com a norma NP EN 12390-1 (2010), enquanto os moldes dos provetes de compressão diametral têm de diâmetro (d) 101,6cm e de altura (h) 100cm, a que corresponde uma razão h/d =1:1, de acordo com a norma NP EN 12390-6 (2011).

Antes de utilizar o solo na preparação dos provetes, foi necessário proceder a uma nova homogeneização do solo, uma vez que, quando o solo está em repouso na câmara termohigrométrica a água presente no solo tende a acumular-se à superfície. Pesaram-se a quantidade de solo homogeneizado necessária para dois provetes, a quantidade de ligante (sempre que a mistura tem mais que um ligante a proporção referido à massa seca do ligantes é de 3:1, sendo o cimento CEM I 42,5R o ligante base) e a quantidade de fibras necessária para cada uma das diferentes misturas. Adicionou-se ainda o volume de água necessário para atingir o teor em água de 113%, por forma a se poder comparar os resultados deste trabalho com os obtidos por Teles (2013).

Depois de colocar o solo, os ligantes, as fibras e água no balde da misturadora Sammic *BM11* é necessário uma mistura manual inicial para evitar perdas por projeção, de seguida procede-se à mistura mecânica durante 4 minutos, ao fim de 2 minutos pára-se a misturadora e como auxílio de uma espátula desprende-se a pasta agarrada às paredes do balde, retomando a mistura durante o tempo restante.

De seguida a mistura é colocada no interior dos moldes de PVC. No caso dos provetes submetidos a ensaios de compressão simples, o seu preenchimento é feito por três camadas,

sendo cada camada apiloada com um varão para expulsar o ar e sujeita a compactação manual com auxílio de uma placa circular. No caso dos provetes para os ensaios de compressão diametral, procede-se de forma idêntica, mas devido à altura menor do provete, este é unicamente composto por duas camadas. No final, o topo dos provetes é regularizado com a ajuda de uma espátula.

Uma vez os provetes preparados, estes são cuidadosamente colocados dentro de sacos plásticos, etiquetados, selados, sendo armazenados na câmara termohigrométrica (temperatura = $20\pm 2^\circ\text{C}$; humidade relativa = $95\pm 5\%$) durante 28 dias de cura. No final deste período os provetes são desmoldados com a ajuda de um extrator hidráulico, pesados, a qualidade é inspecionada visualmente e os provetes são submetidos a um dos ensaios seguidamente apresentados.

4.3 Ensaios laboratoriais

Esta secção divide-se em duas partes, correspondentes aos dois ensaios analisados, ensaio de compressão não confinada e ensaio de compressão diametral. Na ausência de documentos normativos que definam as condições de execução dos ensaios e os critérios de conformidade para o material em estudo, adotaram-se as normas específicas para o betão (NP EN 12390-3 (2011); NP EN 12390-6 (2011); NP EN 13286-42 (2011)).

4.3.1 Ensaio de Compressão Simples (UCS)

4.3.1.1 Procedimento do ensaio

A execução deste ensaio baseou-se na norma NP EN 12390-3 (2011). Depois de o provete completar o tempo de cura de 28 dias na câmara termohigrométrica, é desmoldado com auxílio do extrator hidráulico (Figura 4.1 a)) e pesado, colocando-se de seguida o provete na prensa WYKEHAM FARRANCE LTD *Tristar 5000kg Steplless Compression Test Machine*, para ser ensaiado, como se pode observar nas Figura 4.1b) e 4.1c). Os ensaios UCS foram efetuados com uma velocidade de deformação de 0,5mm/min, ou seja, 0,25%/min. Este valor foi adotado de forma conservativa, uma vez que as normas ASTM D2166 (2000) e BS 1377-7 (1990) indicam valores entre 0,5 e 2%/min, dado que quanto maior a velocidade de deformação maior a resistência mecânica (Teles, 2013). Os valores da força aplicada e deslocamento vertical são registados automaticamente com auxílio de uma célula de carga e um transdutor de deslocamento, respetivamente. No final do ensaio são recolhidas duas amostras do provete para avaliação do teor em água final.

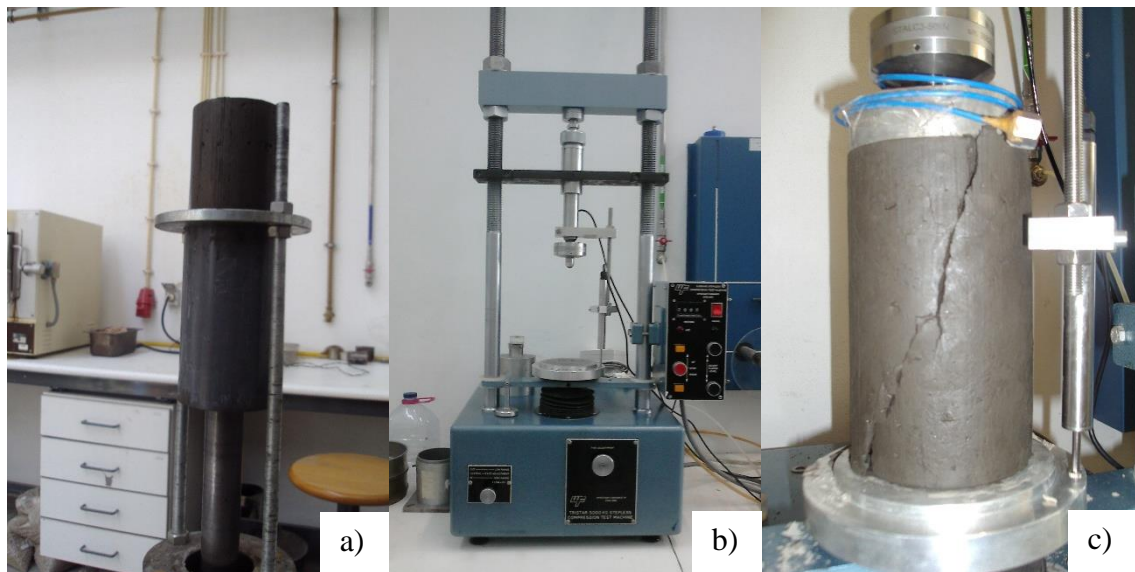


Figura 4.1 – a) Desmoldagem do provete UCS; b) Prensa WYKEHAM FARRANCE LTD *Tristar 5000kg*; c) exemplo de provete após a realização do ensaio UCS.

4.3.1.2 Determinação de parâmetros

A partir dos valores medidos durante o ensaio UCS e sabendo as dimensões dos provetes, procede-se ao cálculo das tensões de compressão (equação 1) e da extensão axial (equação 2) em cada instante, assumindo-se a hipótese simplificativa de distribuição uniforme da deformação no provete. Para o cálculo das tensões foi ainda necessário corrigir a área transversal (equação 3) para ter em consideração a deformação radial do provete ao longo do ensaio.

$$q_u = \frac{F}{A_{corr}} \quad (1)$$

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta\delta_v}{h} \times 100 \quad (2)$$

$$A_{corr} = \frac{\pi \times r^2}{\left(1 - \frac{\varepsilon_a}{100}\right)} \quad (3)$$

Depois destes parâmetros calculados pode-se representar a curva tensão-extensão (q_u - ε_a) para cada um dos provetes submetidos a ensaios UCS. A rotura é caracterizada pelo valor máximo de tensão de compressão do provete, sendo representada por $q_u^{\text{máx}}$.

4.3.2 Ensaio de Compressão diametral (CD)

4.3.2.1 Procedimento do ensaio

Os ensaios de compressão diametral foram realizados em conformidade com a norma NP EN 12390-6 (2011) e NP EN 13286-42 (2011). Após 28 dias de cura na câmara termohigrométrica, o provete é desmoldado com a ajuda do extrator hidráulico, uma vez pesado é colocado de forma cuidadosa na prensa WYKEHAM FARRANCE LTD *Tristar 5000kg* de modo a garantir que a força é aplicada ao longo do eixo longitudinal que passa pelo centro geométrico do provete. A velocidade de deformação do ensaio foi de 0,25mm/min, ou seja, 0,25%/min em relação ao diâmetro. Durante o ensaio são gravados automaticamente o deslocamento vertical e a força aplicada. Na Figura 4.2 apresenta-se a título de exemplo um provete sujeito ao ensaio de compressão diametral, no início do ensaio e após a rotura.

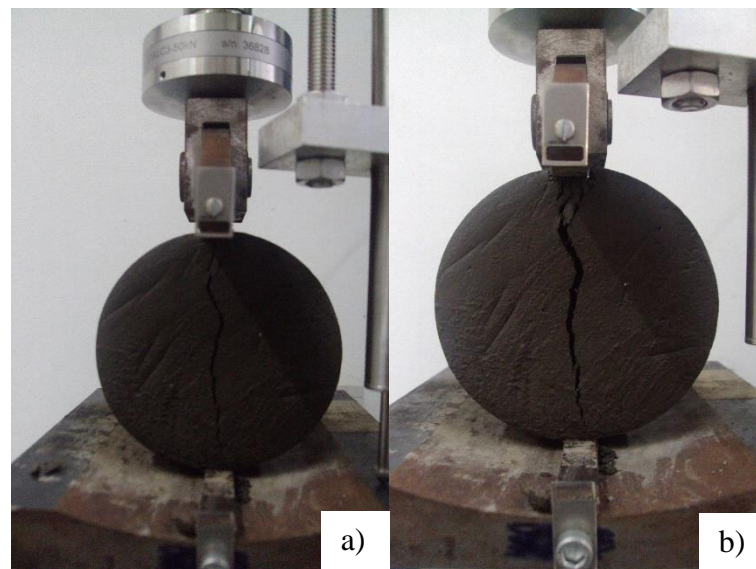


Figura 4.2 – Ensaio de compressão diametral: a) início do ensaio; b) exemplo de provete após a realização do ensaio.

4.3.2.2 Determinação de parâmetros

A partir das grandezas medidas durante o ensaio é possível avaliar de forma indireta a resistência à tração do provete através da equação 4 da norma NP EN 12390-6 (2011):

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad (4)$$

Apesar de ser possível calcular as tensões a partir da expressão anterior, não é possível calcular a extensão na direção das forças de tração, uma vez que para isso era necessário medir os

deslocamentos na direção perpendicular à força aplicada, procedimento não adotado. Assim sendo, para os ensaios de compressão diametral apresentam-se apenas as curvas força-deslocamento vertical (direção da força) em vez das curvas tensão-extensão apresentadas para os ensaios UCS. Pela mesma razão não é possível calcular o módulo de deformabilidade (E). As tensões de tração máximas apresentadas correspondem à força máxima medida ao longo do ensaio.

4.4 Plano de ensaios

Para avaliar as características mecânicas do solo mole do Baixo Mondego quimicamente estabilizado com adição de fibras metálicas, recorreu-se a ensaios de compressão não confinada (UCS) e a ensaios de compressão diametral (CD), os quais permitem avaliar resistência à compressão e à tração, respetivamente. Todos os ensaios foram repetidos duas vezes de modo a garantir a fiabilidade dos resultados obtidos. Para critério de conformidade adotou-se o estipulado na norma NP EN 206-1 (2007) segundo a qual sempre que o intervalo de variação dos resultados individuais obtidos excederem $\pm 15\%$ da média, os resultados deverão ser ignorados.

O plano de trabalhos contempla o estudo de uma ampla gama de valores para a dosagem de ligante (0, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 250kg/m³ da constituído por de cimento Portland CEM 42,5R e escória granulada de alto forno), enquanto a dosagem de fibras *Dramix RB305* varia entre 0 e 50kg/m³ (0, 10, 30, 50kg/m³). As dosagens de ligante e fibras foram combinadas de acordo com o Quadro 4.1. Para comparar com os resultados dos ensaios realizados por Teles (2013) foi adicionada ao plano de ensaios a mistura com 50kg/m³ de fibras *Wiremix W30* e com 125kg/m³ de ligante.

A nomenclatura utilizada é composta pela designação do ensaio a que o provete é sujeito (UCS, compressão não confinado ou CD, compressão diametral), seguido da letra L de ligante adstrito à respectiva dosagem (expressa em kg/m³), e da letra F de fibra seguida da sua dosagem (expressa em kg/m³). Nos provetes com fibras *Wiremix W30*, a letra F é substituída por W.

Quadro 4.1 – Plano de ensaios base

Fibras	Dosagem de ligante (kg/m ³)	Dosagem de Fibras (kg/m ³)	Tipo de ensaio	
			UCS	CD
Sem	75	0	UCS_L75_F0	CD_L75_F0
	125	0	UCS_L125_F0	CD_L125_F0
	175	0	UCS_L175_F0	CD_L175_F0
Dramix RB350	0	30	UCS_L0_F30	CD_L0_F30
	25	30	UCS_L25_F30	CD_L25_F30
		50	UCS_L50_F30	CD_L50_F30
		10	UCS_L75_F10	CD_L75_F10
	75	30	UCS_L75_F30	CD_L75_F30
		50	UCS_L75_F50	CD_L75_F50
	100	30	UCS_L100_F30	CD_L100_F30
		10	UCS_L125_F10	CD_L125_F10
		125	30	UCS_L125_F30
	50		UCS_L125_F50	CD_L125_F50
	150	30	UCS_L150_F30	CD_L150_F30
		10	UCS_L175_F10	CD_L175_F10
		175	30	UCS_L175_F30
	50		UCS_L175_F50	CD_L175_F50
	200	30	UCS_L200_F30	CD_L200_F30
250	30	UCS_L250_F30	CD_L250_F30	
Wiremix W30	125	50	UCS_L125_W50	CD_L125_W50

Com o intuito de se estudar a influência do tempo de mistura na resistência do solo mole do Baixo Mondego, analisaram-se os seguintes tempos de mistura: 4 (tempo padrão para as misturas), 6 e 10 minutos. Estes provetes foram preparados com a dosagem de ligante de 250 kg/m³ (cimento Portland CEM I 42,5R e escória granulada de alto-forno) e dosagem de 30kg/m³ de fibras *Dramix* RB305, conforme indicado no Quadro 4.2. Para identificar estes ensaios, à nomenclatura base foi adicionado o tempo de mistura adotado.

Quadro 4.2 – Plano de ensaios para o tempo de mistura

Fibras	Tempo de Mistura (min)	Tipo de ensaio	
		UCS	CD
Dramix RB350	4	UCS_L250_F30	CD_L250_F30
	6	UCS_L250_F30_6	CD_L250_F30_6
	10	UCS_L250_F30_10	CD_L250_F30_10

A influência do tipo de ligante foi analisada para uma dosagem de ligante de 175kg/m^3 e 30kg/m^3 de fibras *Dramix* RB305. No quadro 4.3 indicam-se as várias combinações de ligantes analisados, bem como a nomenclatura adotada, onde Cim, Cinz e cal representam as iniciais de cimento Portland CEM I 42,5R, cinzas volantes de Sines e cal viva, respetivamente.

Quadro 4.3 – Plano de ensaios para o tipo de ligante

Fibras	Tipo de Ligante	Tipo de ensaio	
		UCS	CD
Dramix RB350	Cimento (75%) + Escória (25%)	UCS_L175_F30	CD_L175_F30
	Cimento (100%)	UCS_Cim	CD_Cim
	Cimento (75%) + Cinzas (25%)	UCS_Cim + Cinz	CD_Cim + Cinz
	Cimento (75%) + Cal viva (25%)	UCS_Cim + Cal	CD_Cim + Cal

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 Introdução

Neste capítulo apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos nos ensaios realizados para a caracterização do solo mole do Baixo Mondego quimicamente estabilizado com incorporação de fibras metálicas. A próxima secção apresenta os resultados obtidos nos ensaios de compressão simples não confinada (UCS) que caracterizam o solo quando sujeito a esforços de compressão. Na secção seguinte são apresentados os resultados referentes a ensaios de compressão diametral (CD), os quais de forma indireta permitem avaliar a resistência à tração. Os resultados apresentados têm como base provetes de solo quimicamente estabilizados com uma mistura de ligantes constituída por cimento Portland CEM I 42,5R e escória granulada e alto-forno numa proporção de 3:1 em relação à massa seca dos ligantes. Os parâmetros objetos de estudo são o tempo de mistura, a dosagem e constituição do ligante e a dosagem de fibras.

As curvas tensão-extensão e força-deslocamento vertical apresentadas neste capítulo foram sujeitas a um tratamento prévio, onde se eliminou o *bedding-error*.

5.2 Ensaio de compressão simples (UCS)

O Quadro 5.1 resume os resultados obtidos nos ensaios de compressão simples não confinada, nomeadamente a resistência máxima à compressão uniaxial ($q_u^{máx}$), a extensão axial na rotura (ϵ_{rot}), o módulo de deformabilidade não drenado secante definido para 50% da carga de rotura (E_{u50}) e o teor em água final (w_f). Adicionalmente, o quadro apresenta o valor médio de todos estes parâmetros bem como o desvio percentual face ao valor médio.

Quadro 5.1 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios UCS

Fibras	Ensaio	$q_u^{máx}$ (kPa)	$q_u^{méd}$ (kPa)	ε_{rot} (%)	$\varepsilon_{rot}^{méd}$ (%)	w_f (%)	$w_f^{méd}$ (%)	E_{u50} (MPa)	$E_{u50}^{méd}$ (MPa)
Sem	UCS_L75_F0_1	5,3	6,6	3,2	4,8	99,8	100,1	0,4	0,3
	UCS_L75_F0_2	8,0	21%	6,5	34%	100,4	0%	0,2	29%
	UCS_L125_F0_1	27,3	27,9	4,5	5,2	93,0	93,5	2,8	2,0
	UCS_L125_F0_2	28,4	2%	5,8	12%	93,9	0%	1,3	37%
	UCS_L175_F0_1	151,1	158,0	1,9	2,2	86,6	87,6	17,8	18,8
	UCS_L175_F0_2	164,9	4%	2,5	14%	88,5	1%	19,9	6%
Dramix RB350	UCS_L75_F10_1	6,9	6,4	9,6	7,9	97,2	97,2	0,4	0,4
	UCS_L75_F10_2	6,0	7%	6,2	22%	97,2	0%	0,5	17%
	UCS_L75_F30_1	7,8	7,4	6,5	7,4	100,8	98,5	0,2	0,2
	UCS_L75_F30_2	7,0	6%	8,3	13%	96,2	2%	0,2	11%
	UCS_L75_F50_1	9,6	9,3	4,8	4,3	97,7	96,9	0,9	1,0
	UCS_L75_F50_2	9,0	3%	3,8	12%	96,0	1%	1,1	9%
	UCS_L100_F30_1	15,0	14,0	6,3	5,4	95,4	94,9	0,7	1,3
	UCS_L100_F30_2	13,0	7%	4,4	17%	94,4	1%	1,9	47%
	UCS_L125_F10_1	*	23,7	*	4,3	*	92,0	*	2,6
	UCS_L125_F10_2	23,7	-	4,3	-	92,0	-	2,6	-
	UCS_L125_F30_1	23,7	21,8	5,7	5,1	92,9	92,3	2,0	2,1
	UCS_L125_F30_2	20,0	8%	4,5	12%	91,6	1%	2,1	2%
	UCS_L125_F50_1	28,7	27,8	4,0	3,7	90,4	89,2	2,8	3,2
	UCS_L125_F50_2	26,8	3%	3,4	9%	88,1	1%	3,6	12%
	UCS_L150_F30_1	39,3	41,0	5,6	6,0	88,9	87,5	2,8	2,8
	UCS_L150_F30_2	42,7	4%	6,5	7%	86,0	2%	2,7	2%
	UCS_L175_F10_1	173,5	172,4	2,5	2,6	84,9	85,1	24,0	23,9
	UCS_L175_F10_2	171,2	1%	2,7	3%	85,2	0%	23,9	0%
	UCS_L175_F30_1	73,7	70,9	4,3	3,7	84,8	85,2	6,2	6,3
	UCS_L175_F30_2	68,0	4%	3,2	14%	85,5	0%	6,4	2%
	UCS_L175_F50_1	176,7	172,6	2,9	2,8	83,2	83,6	22,6	21,7
	UCS_L175_F50_2	168,5	2%	2,7	4%	84,0	0%	20,9	4%
	UCS_L200_F30_1	113,2	113,6	3,8	3,8	80,9	81,9	8,5	8,4
	UCS_L200_F30_2	114,0	0%	3,9	1%	82,9	1%	8,2	2%
	UCS_L250_F30_1	282,1	287,3	2,5	2,5	75,8	75,2	25,0	26,5
	UCS_L250_F30_2	292,5	2%	2,6	2%	74,6	1%	28,0	6%
	UCS_L250_F30_6_1	*	303,3	*	2,4	*	75,8	*	25,6
	UCS_L250_F30_6_2	303,3	-	2,4	-	75,8	-	25,6	-
	UCS_L250_F30_10_1	238,7	248,3	3,2	3,4	75,7	75,6	24,4	25,6
	UCS_L250_F30_10_2	257,8	4%	3,6	5%	75,5	0%	26,9	5%
	UCS_cimento_1	239,8	237,7	2,1	2,0	83,9	85,2	39,7	36,2
	UCS_cimento_2	235,5	1%	1,8	8%	84,2	0%	32,8	2%
UCS_cim_cinzas_1	110,8	109,8	2,8	3,0	85,4	85,6	17,0	14,4	
UCS_cim_cinzas_2	108,9	1%	3,1	5%	85,9	0%	11,9	17%	
UCS_cim_cal_1	89,2	91,6	5,9	5,9	86,6	84,6	5,9	6,1	
UCS_cim_cal_2	94,0	3%	5,8	1%	82,7	2%	6,3	4%	
Wiremix W30	UCS_L125_W50_1	71,8	74,5	3,1	3,2	88,4	89,8	4,3	6,3
	UCS_L125_W50_2	77,3	4%	3,3	3%	91,3	2%	8,3	32%

* Perda de dados do ensaio.

Nota: Os valores que se encontram sob a média correspondem ao desvio percentual em relação à média.

Ao analisar o quadro percebe-se que a dosagem de ligante influencia sobremaneira a resistência e rigidez do solo mole quimicamente estabilizado. Com o aumento da dosagem de ligante constata-se o incremento do módulo de deformabilidade e a diminuição da extensão de rotura, refletindo o desenvolvimento de um maior número de ligações cimentícias as quais tornam a matriz sólida mais resistente e mais rígida. É também notório que com o aumento da dosagem de ligante o teor em água decresce ligeiramente, indicando um maior desenvolvimento de reações de hidratação o que implica um maior consumo de água. A dosagem de fibras não parece ter predominância na resistência máxima à compressão do solo quimicamente estabilizado e no seu teor em água do solo. Os resultados mostram igualmente que a composição do ligante condiciona fortemente o comportamento do material à compressão. Observa-se que os resultados dos ensaios UCS_L75_F0_1 e 2 apresentam um desvio percentual em relação à média superior a 15%, os mesmos são apresentados mas não foram considerados na elaboração de conclusões.

Os provetes com os códigos UCS_L175_F0_1/2, UCS_L175_F10_1/2 e UCS_L175_F50_1/2 foram realizados com uma escória diferente dos restantes ensaios, o que originou o aumento significativo da resistência máxima. Estas diferenças podem revelar a perda de propriedades aglomerantes da escória “mais antiga”, que se encontrava no laboratório do DEC desde 2007 ou uma possível constituição diferente, uma vez que até à data esta ainda não foi fornecida pelo fabricante.

Não foi possível ensaiar à compressão simples os provetes sem ligante nem os com dosagens de ligante de 25 e 50kg/m³ conforme apresentado no plano de ensaios, uma vez que a resistência destes encontra-se abaixo da sensibilidade da própria célula de carga. Este facto é visível na Figura 5.1, onde se encontra a curva tensão-extensão para o provete com dosagem de ligante de 50kg/m³.

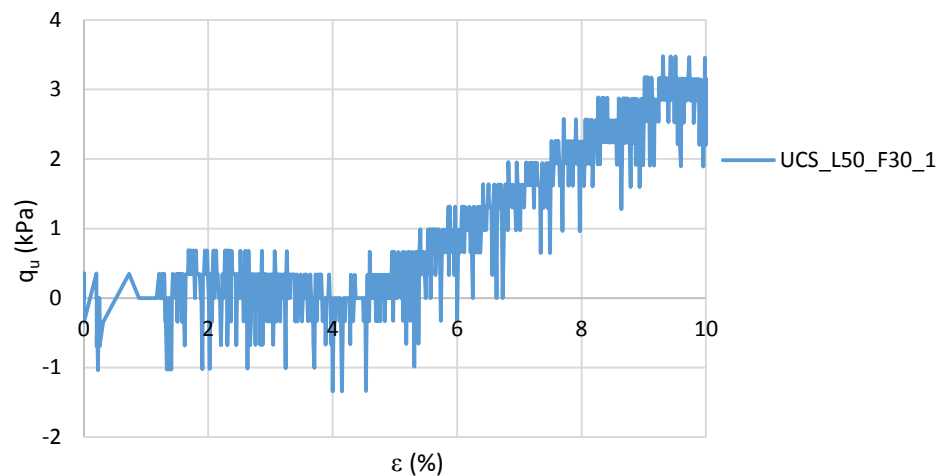


Figura 5.1 – Curva tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre provete com dosagem de ligante de 50 kg/m³ e 30kg/m³ de fibras *Dramix*.

5.3 Ensaios de compressão diametral

O Quadro 5.2 resume os resultados dos ensaios de compressão diametral, caracterizados pela resistência máxima à tração por compressão diametral (f_{ct}), pelo deslocamento vertical na rotura ($\delta_{v\ rot}$) e o teor em água final. Tal como para os ensaios UCS, o quadro apresenta o valor médio de todos esses parâmetros bem como o desvio percentual face ao valor médio.

Tal como nos ensaios UCS, os ensaios CD mostram que a dosagem de ligante é um parâmetro fundamental na resistência à tração, contribuindo o aumento da sua dosagem para uma maior resistência. Verificou-se igualmente, que o teor em água diminui com o aumento da dosagem de ligante, o que reflete o aumento das ligações cimentícias, o que conduz a um maior consumo de água. Mais uma vez se constata que a escolha da composição do ligante condiciona em muito a resistência à tração dos provetes CD. Os resultados do Quadro 5.2 mostram que em alguns pares de ensaios o desvio percentual em relação à média é superior a 15%, não sendo por conseguinte considerados na elaboração de conclusões apesar de serem apresentados nos próximos subcapítulos.

Quadro 5.2 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios CD

Fibras	Ensaio	f_{ct} (kPa)	$f_{ct}^{méd}$ (kPa)	$\delta_{v\ rot}$ (mm)	$\delta_{v\ rot}^{méd}$ (mm)	w_f (%)	$w_f^{méd}$ (%)
Sem	CD_L75_F0_1	1,4	1,8	2,6	2,5	99,6	99,6
	CD_L75_F0_2	2,1	18%	2,5	1%	99,5	0%
	CD_L125_F0_1	4,5	4,1	2,3	2,2	93,8	93,9
	CD_L125_F0_2	3,7	5%	2,1	3%	94,0	0%
	CD_L175_F0_1	14,7	13,0	2,5	2,4	86,7	86,6
	CD_L175_F0_2	15,2	2%	2,4	1%	86,5	0%
Dramix RB350	CD_L75_F10_1	1,8	1,6	2,2	2,2	97,9	97,4
	CD_L75_F10_2	1,4	10%	2,2	0%	96,9	0%
	CD_L75_F30_1	1,6	1,7	3,5	3,5	96,4	96,6
	CD_L75_F30_2	1,9	10%	3,6	1%	96,8	0%
	CD_L75_F50_1	1,4	2,0	2,9	4,2	89,6	91,5
	CD_L75_F50_2	2,6	28%	5,6	32%	93,4	2%
	CD_L100_F30_1	3,8	2,9	2,2	2,6	94,6	93,4
	CD_L100_F30_2	1,9	33%	2,9	12%	92,2	1%
	CD_L125_F10_1	4,5	4,1	2,3	2,2	90,9	90,9
	CD_L125_F10_2	3,7	10%	2,1	3%	90,9	0%
	CD_L125_F30_1	3,8	3,9	2,7	2,8	89,6	89,2
	CD_L125_F30_2	4,0	2%	2,9	3%	88,9	0%
	CD_L125_F50_1	4,9	5,3	2,3	2,7	85,1	86,4
	CD_L125_F50_2	5,6	6%	3,0	14%	87,6	1%
	CD_L150_F30_1	10,5	10,8	2,4	2,6	85,3	85,5
	CD_L150_F30_2	11,2	3%	2,7	6%	85,7	0%
	CD_L175_F10_1	10,8	9,7	1,8	1,7	84,1	84,7
	CD_L175_F10_2	8,6	12%	1,6	7%	85,4	1%
	CD_L175_F30_1	17,3	16,5	2,7	2,7	84,2	84,1
	CD_L175_F30_2	15,7	5%	2,7	0%	84,0	0%
	CD_L175_F50_1	14,3	13,0	1,8	1,6	82,7	82,8
	CD_L175_F50_2	11,7	10%	1,4	10%	82,9	0%
	CD_L200_F30_1	22,5	19,3	3,1	2,6	79,6	80,3
	CD_L200_F30_2	16,1	17%	2,0	23%	81,0	1%
	CD_L250_F30_4_1	58,7	60,5	2,4	2,4	74,9	75,3
	CD_L250_F30_4_2	62,2	3%	2,4	0%	75,7	1%
	CD_L250_F50_6_1	57,4	58,5	2,3	2,4	75,9	75,7
	CD_L250_F50_6_2	59,7	2%	2,4	1%	75,5	0%
	CD_L250_F30_10_1	65,9	59,5	2,5	2,2	72,0	73,9
	CD_L250_F30_10_2	53,1	11%	2,0	12%	75,8	3%
	CD_cimento_1	38,4	41,1	1,7	1,7	84,2	84,1
	CD_cimento_2	43,8	7%	1,8	5%	85,7	1%
CD_cim_cinzas_1	20,8	20,4	1,8	1,7	86,5	85,5	
CD_cim_cinzas_2	20,1	2%	1,6	6%	84,5	1%	
CD_cim_cal_1	11,9	12,5	1,5	1,6	83,7	83,0	
CD_cim_cal_2	13,1	5%	1,8	9%	82,3	1%	
Wiremix W30	CD_L125_W50_1	19,0	18,9	2,2	2,2	85,3	86,2
	CD_L125_W50_2	18,9	0%	2,3	2%	87,2	1%

Os valores que se encontram por baixo da média correspondem ao desvio percentual em relação à média.

Tal como ocorreu para os ensaios UCS, não foi possível ensaiar os provetes à compressão diametral para as menores dosagens de ligante, porque a resistência dos provetes é menor que a sensibilidade da célula de carga. A Figura 5.2a) mostra um provete antes de ser ensaiado, podendo-se constatar que apresenta deformações consideráveis apenas por ação do seu peso próprio. Na Figura 5.2b) observa-se a curva força-deslocamento vertical a partir da qual se conclui não ser possível identificar a rotura do provete por compressão diametral.

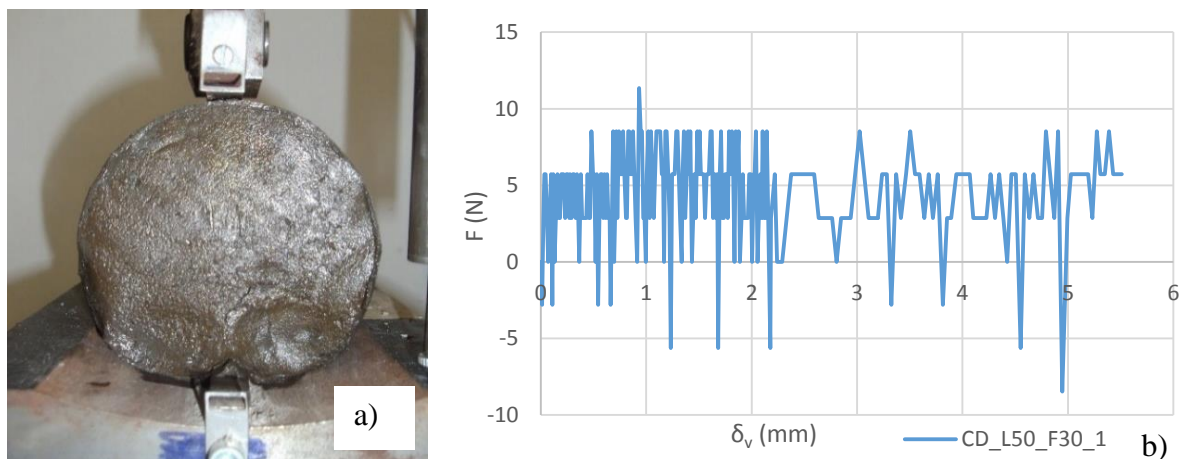


Figura 5.2 – Ensaio CD do provete com dosagem de ligante de 50 kg/m^3 e 30 kg/m^3 de fibras *Dramix*: a) imediatamente antes do início do ensaio; b) Curva tensão-extensão do ensaios.

5.4 Análise da influência do tempo de mistura

Nas Figuras 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 analisa-se a influência do tempo de mistura, tendo como base os resultados de ensaios UCS e CD com dosagem de ligante (constituído por cimento Portland e escória) de 250 kg/m^3 e dosagem de fibras *Dramix* de 30 kg/m^3 .

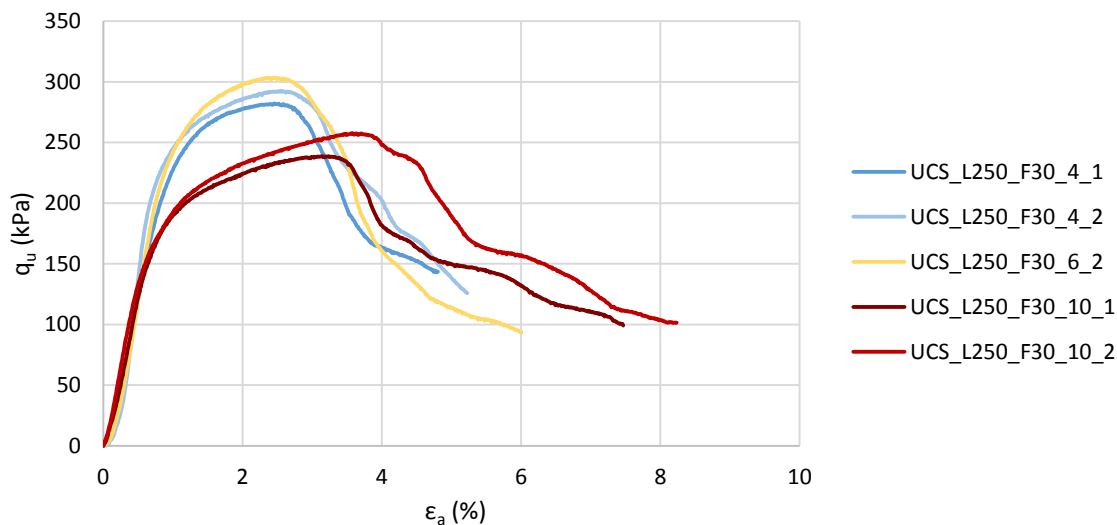


Figura 5.3 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre provetes com fibras *Dramix* (30kg/m^3) e dosagem de ligante de 250 kg/m^3 com variação do tempo de mistura.

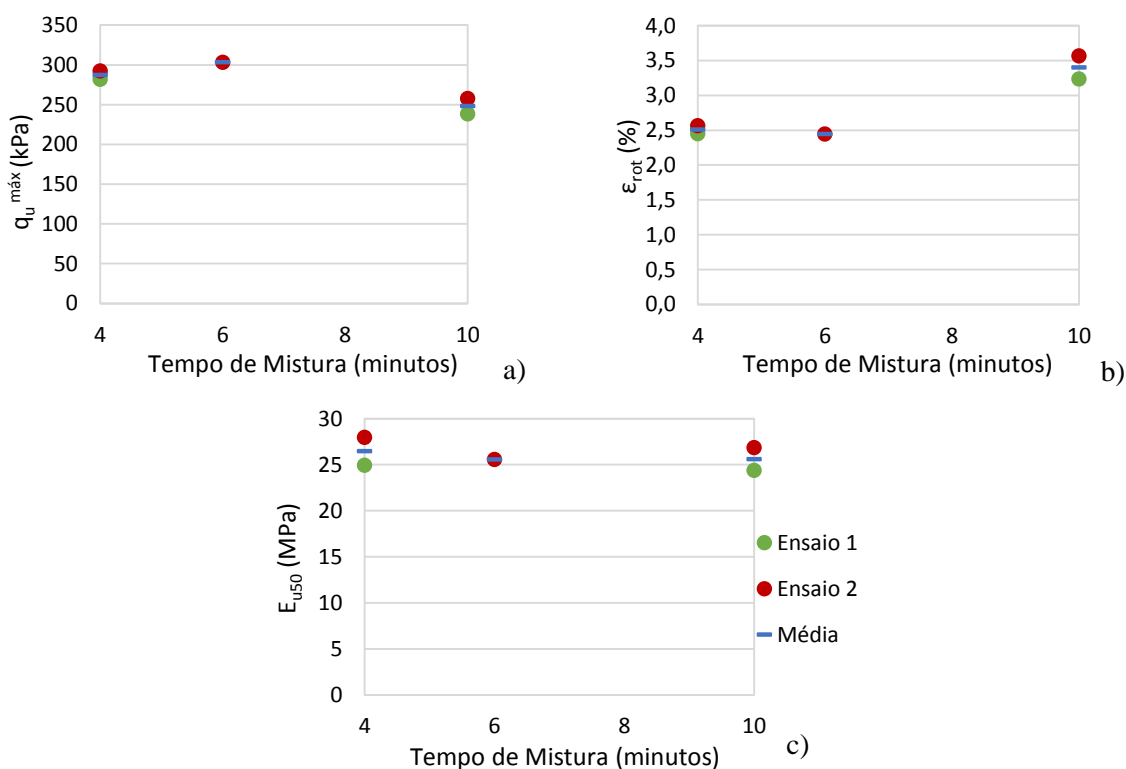


Figura 5.4 – Ensaios UCS sobre provetes com a dosagem de ligante 250kg/m^3 e dosagem de fibras *Dramix* 30kg/m^3 por variação do tempo de mistura - análise da evolução de: a) $q_u^{\text{máx}}$, b) ϵ_a ; c) E_{u50} .

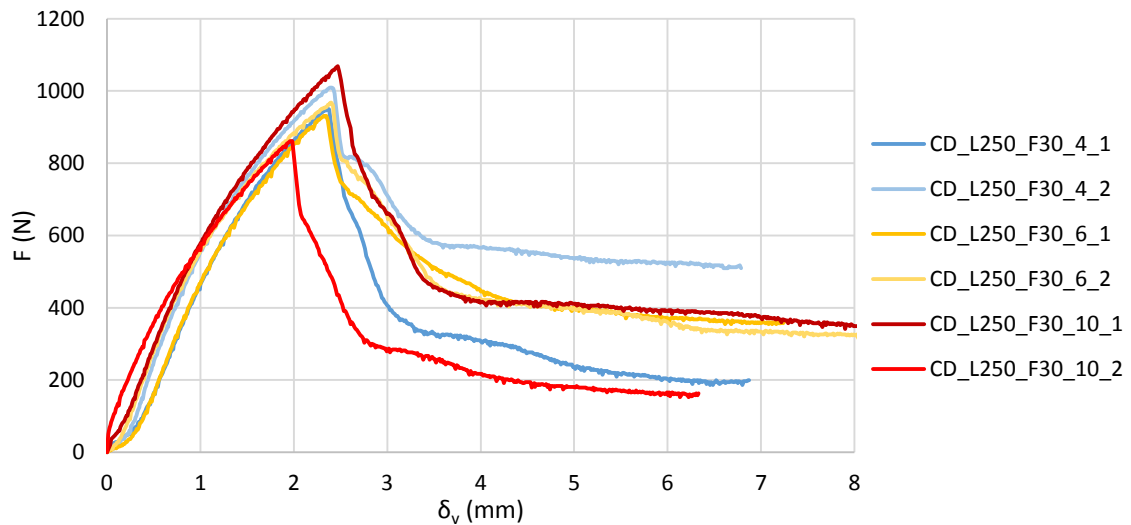


Figura 5.5 – Curvas força-deslocamento vertical de ensaios CD realizados sobre provetes com fibras *Dramix* (30kg/m³) e dosagem de ligante de 250kg/m³ por variação do tempo de mistura.

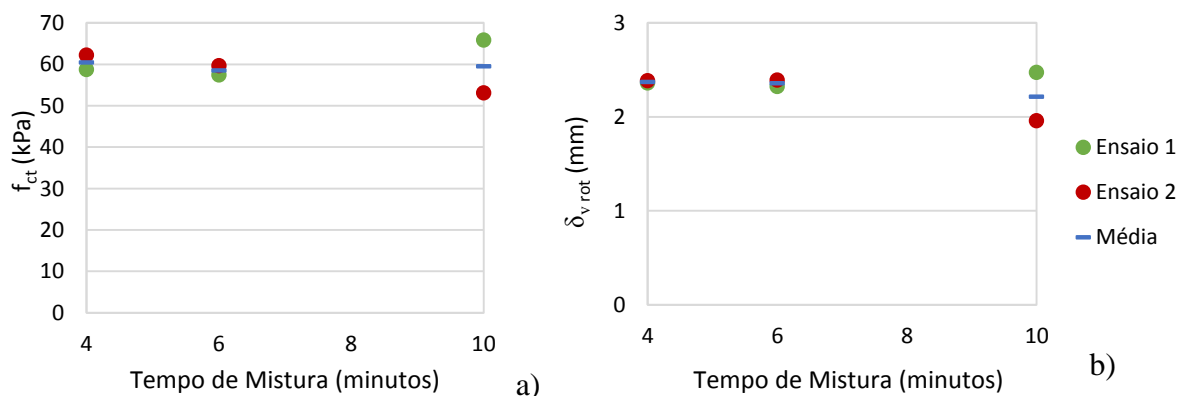


Figura 5.6 – Ensaios CD sobre provetes com a dosagem de ligante 250kg/m³ e dosagem de fibras *Dramix* 30kg/m³ por variação do tempo de mistura - análise da evolução de: a) f_{ct} ; b) ϵ_a .

Da análise verifica-se que, tanto nos ensaios UCS como nos ensaios CD, o tempo de 4 minutos é suficiente para assegurar uma adequada mistura dos vários elementos que compõem os provetes, uma vez que para maiores tempos de mistura não existe um acréscimo de resistência. Para os ensaios UCS a rigidez mantém-se constante independentemente do tempo de mistura. Também a extensão de rotura e o deslocamento vertical (ensaios UCS e CD, respetivamente), são muito semelhantes para qualquer tempo de mistura.

5.5 Análise da influência da dosagem de ligante

5.5.1 Sem fibras

As Figuras 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10 apresentam os resultados obtidos em ensaios UCS e CD sem fibras, para dosagens de ligante que variam entre 75 e 175kg/m³. Em qualquer dos casos utilizou-se uma composição de cimento e escória.

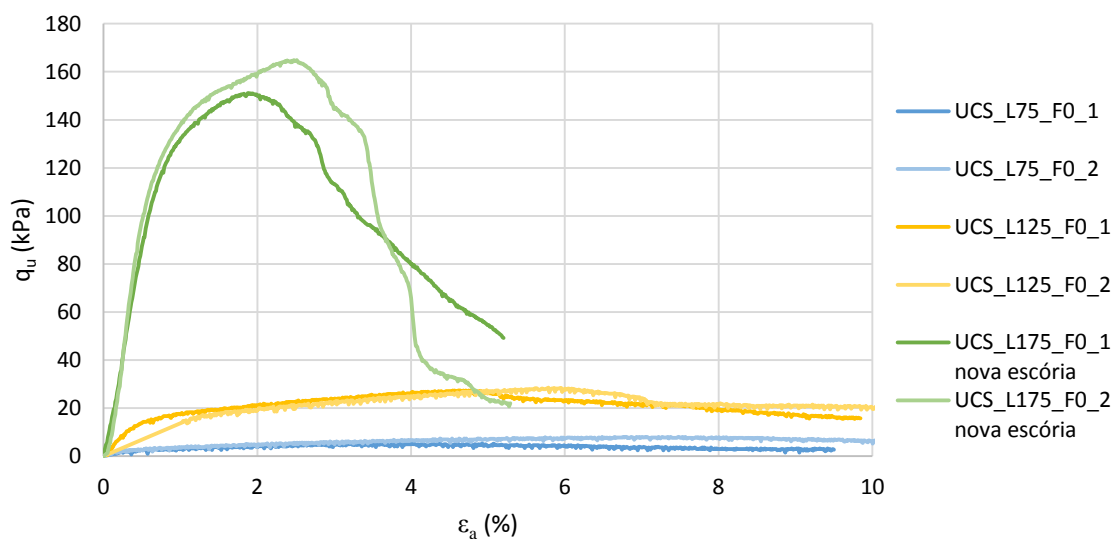
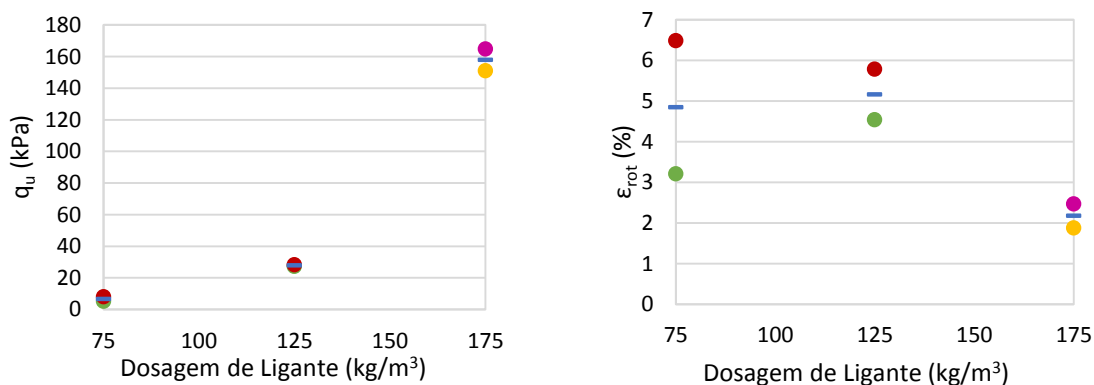


Figura 5.7 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre provetes sem de fibras com variação da dosagem de ligante.



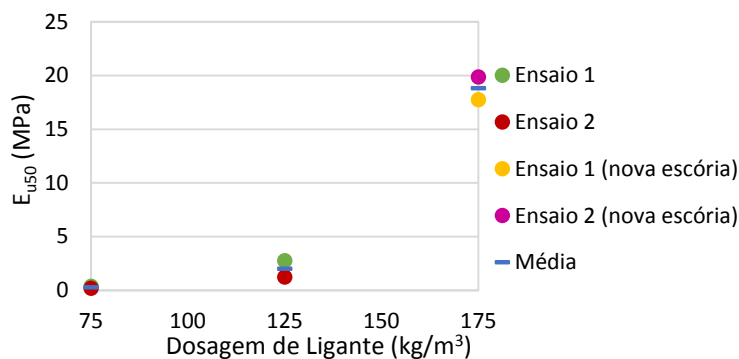


Figura 5.8 – Ensaio UCS realizados sobre provetes sem fibras por variação da dosagem de ligante - análise da evolução de: a) $q_u^{máx}$; b) ϵ_a ; c) E_{u50} .

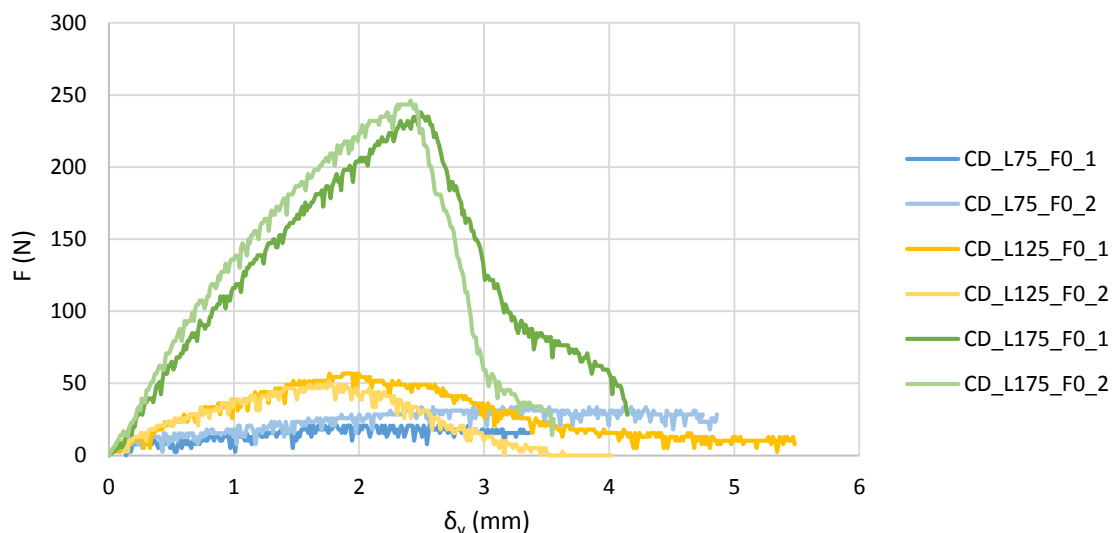


Figura 5.9 – Curvas força-deslocamento vertical de ensaios CD realizados sobre provetes sem fibras com variação da dosagem de ligante.

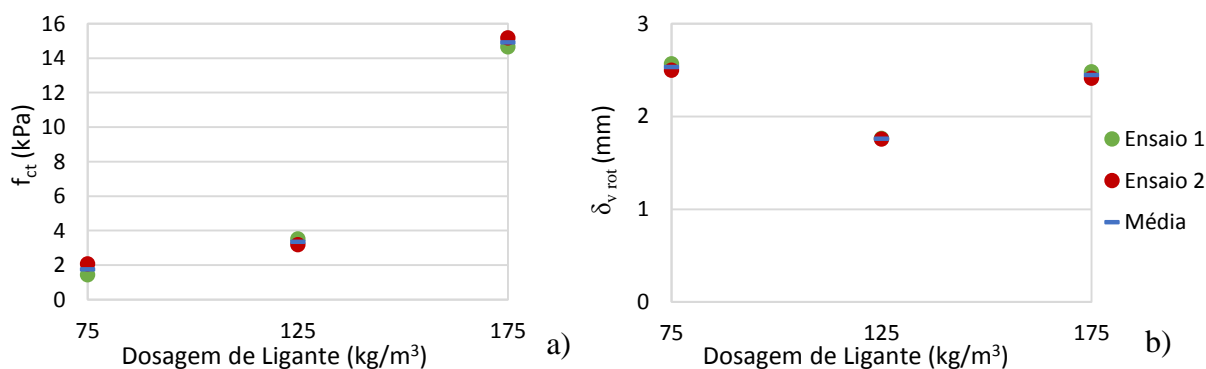


Figura 5.10 – Ensaio CD realizados sobre provetes sem fibras por variação da dosagem de ligante - análise da evolução de: a) f_{ct} ; b) ϵ_a .

Os resultados indicam que com o aumento da dosagem de ligante existe incremento da resistência, tanto à compressão simples como à tração. Na Figura 5.7 observam-se dois comportamentos distintos: nos provetes com a maior dosagem de ligante (175kg/m^3) verifica-se que após a rotura de pico a resistência diminui drasticamente até um valor residual, enquanto nos provetes com menor dosagem de ligante a resistência após a rotura mantém-se aproximadamente constante com o aumento da extensão (comportamento mais dúctil). Independentemente da dosagem de ligante nos ensaios CD a resistência pós-rotura diminui até ser nula (Figura 5.9), ficando o provete separado em duas partes (Figura 5.11). A rigidez dos provetes ensaiados à compressão simples tende a aumentar com a dosagem de ligante e a extensão de rotura a diminuir, podendo-se concluir que para maiores dosagens de ligante o solo quimicamente estabilizado tem um comportamento mais frágil induzido por um maior desenvolvimento de ligações cimentícias. Os provetes UCS_L175_F0_1 e 2 apresentam um ganho de resistência muito elevado, o que em parte é devido à utilização de uma nova escória como referido, exibindo um comportamento muito mais frágil que os restantes provetes.

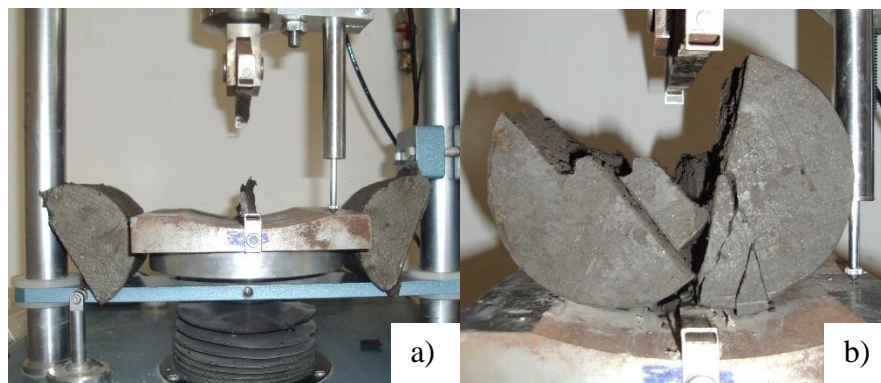


Figura 5.11 – Provetes CD no final dos ensaios a) Provete CD_L75_F0_1; b) Provete CD_L175_F0_1.

5.5.2 Com fibras *Dramix*

Nas Figuras 5.12 e 5.13 apresentam-se os resultados de ensaios UCS que ilustram o efeito da variação da dosagem de ligante (entre 75 e 250kg/m^3), mantendo constante a dosagem de fibras *Dramix* (30kg/m^3).

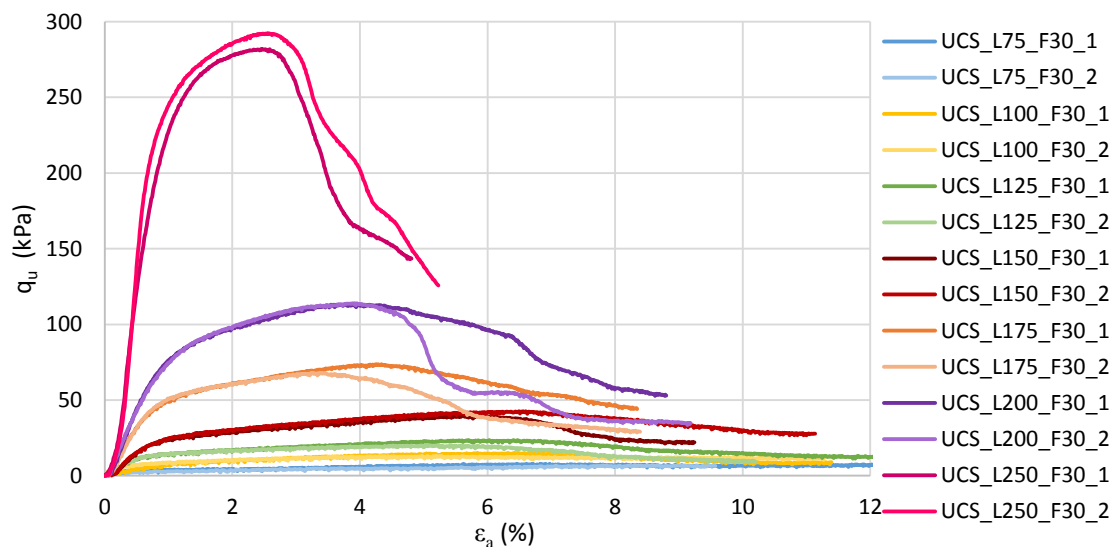


Figura 5.12 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre provetes com 30kg/m^3 de fibras *Dramix* com variação da dosagem de ligante.

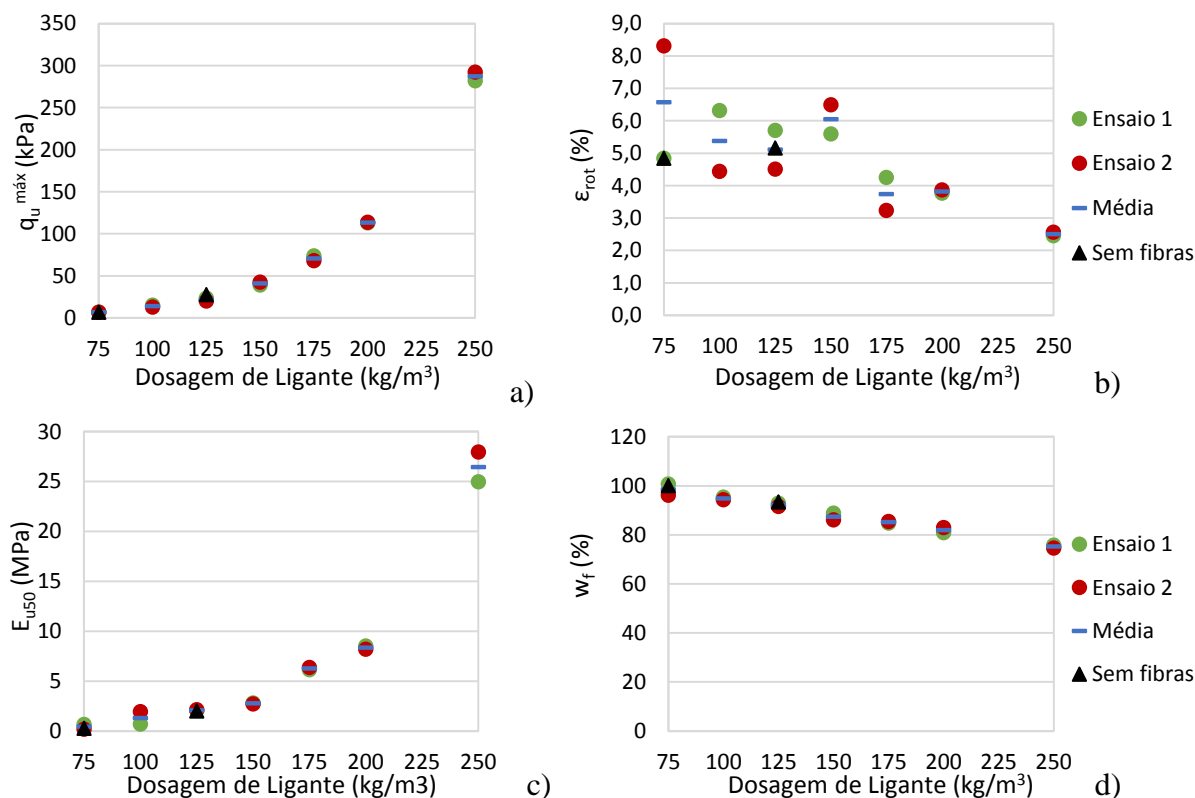


Figura 5.13 – Ensaios UCS realizados sobre provetes com 30kg/m^3 de fibras *Dramix* por variação da dosagem de ligante - análise da evolução de: a) $q_u^{\text{máx}}$; b) ϵ_a ; c) E_{u50} ; d) w_f .

Como expectável, constata-se que o aumento da dosagem de ligante origina o incremento tanto da resistência à compressão como da rigidez, apresentando uma variação exponencial (Figura 5.14) caracterizada por coeficiente de correlação próximo da unidade, ou seja, com reduzida dispersão de resultados. Este aumento de resistência advém do desenvolvimento das ligações cimentícias promovidas pelo incremento da dosagem de ligante, sendo este facto comprovado pela diminuição do teor em água (Figura 5.13d), não dependendo da presença de fibras na dosagem de 30kg/m³. Também se verifica que após a rotura a resistência dos vários provetes tende para valores semelhantes, evidenciando este facto que a resistência máxima é fundamentalmente conferida pelas ligações cimentícias, sendo que após a sua quebra a resistência tende para um valor residual que depende da mobilização da resistência das fibras e do atrito entre as partículas. Também se observa que a extensão de rotura tende a diminuir com o aumento da dosagem de ligante, ou seja, para menores dosagens de ligante o provete tem um comportamento mais deformável, mais próximo do comportamento do solo não estabilizado.

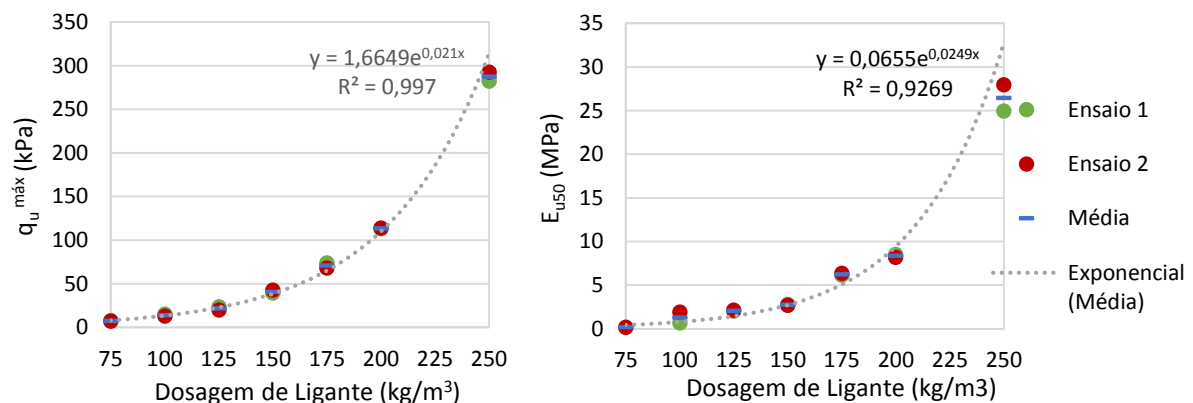


Figura 5.14 – Variação da resistência máxima à compressão simples (a) e da rigidez (b) com a dosagem de ligante para provetes com 30kg/m³ de fibras.

Nas Figuras 5.15 e 5.16 estão representados os resultados dos ensaios CD que ilustram o efeito da variação da dosagem de ligante mantendo a dosagem de fibras *Dramix* em 30kg/m³.

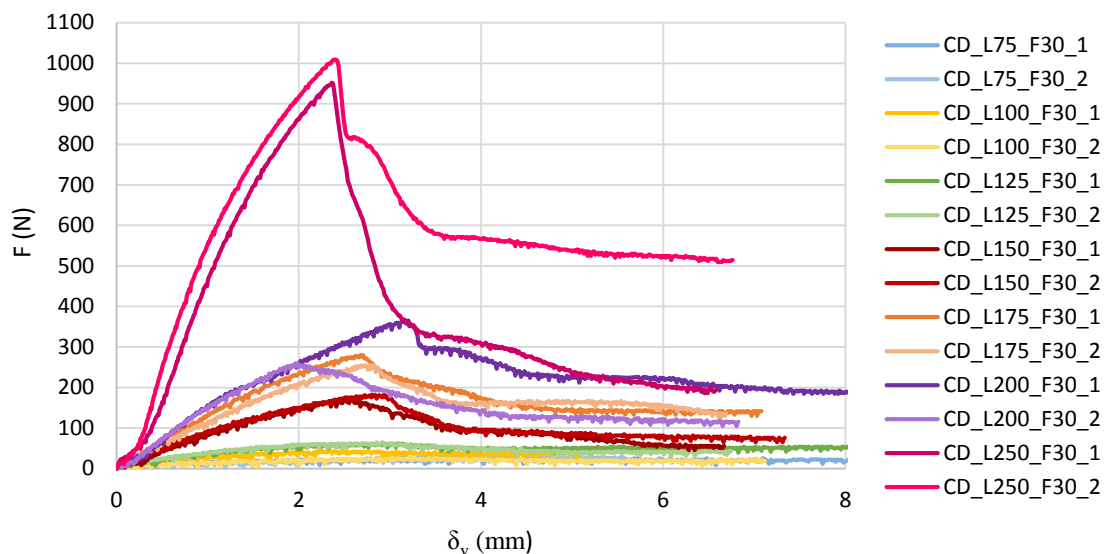


Figura 5.15 – Curvas força-deslocamento vertical de ensaios CD realizados sobre provetes com 30kg/m^3 de fibras *Dramix* com variação da dosagem de ligante.

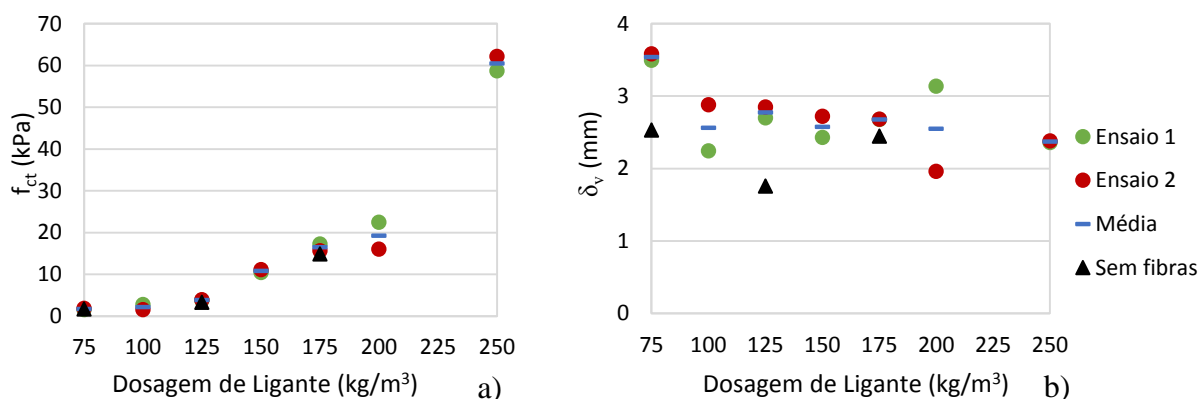


Figura 5.16 – Ensaios CD realizados sobre provetes com 30kg/m^3 de fibras *Dramix* por variação da dosagem de ligante - análise da evolução de: a) f_{ct} ; b) ϵ_a .

Uma vez mais, conclui-se que a resistência à tração aumenta com o incremento da dosagem de ligante. O deslocamento vertical na rotura tende a diminuir ligeiramente com o aumento da dosagem de ligante, indicando que o comportamento do material é cada vez mais rígido devido ao desenvolvimento das ligações cimentícias, ou seja, a rotura dá-se para deslocamentos menores. Da análise da Figura 5.16a) percebe-se que a resistência máxima à tração não se altera com a presença de fibras na dosagem de 30kg/m^3 , sendo no entanto de realçar que a presença de fibras incrementa o deslocamento vertical na rotura (Figura 5.16b), o que em parte é explicado pelo modo de deformação do ensaio. Estes resultados indicam que a presença de

fibras altera o comportamento mecânico do solo mole quimicamente estabilizado quando sujeito a esforços de tração tornando-o mais dúctil.

Também a resistência máxima à tração avaliada em ensaios de compressão diametral pode ser relativamente bem aproximada por uma curva exponencial, caracterizada por um coeficiente de correlação elevado (Figura 5.17).

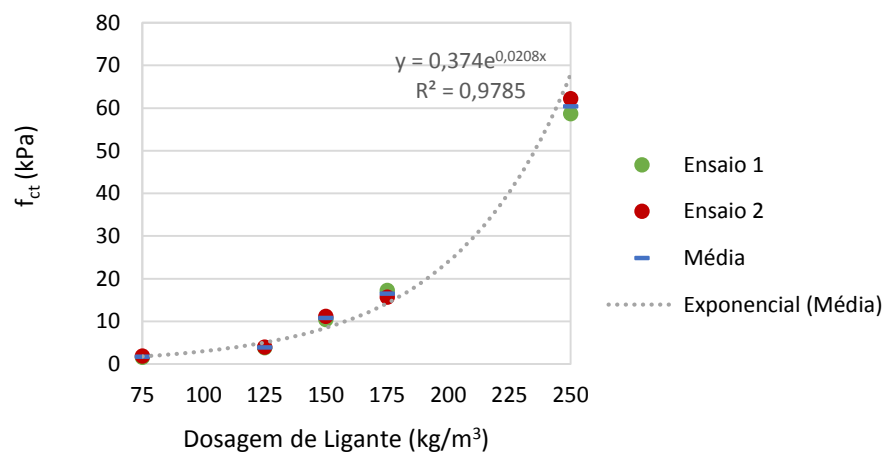


Figura 5.17 – Variação da resistência máxima à tração através de ensaios de compressão diametral com a dosagem de ligante

5.6 Análise da influência da composição do ligante

As Figuras 5.18 e 5.19 ilustram os resultados obtidos nos ensaios UCS, para várias combinações de ligante, mantendo a dosagem de ligante de 175kg/m^3 e a dosagem de fibras *Dramix* de 30kg/m^3 .

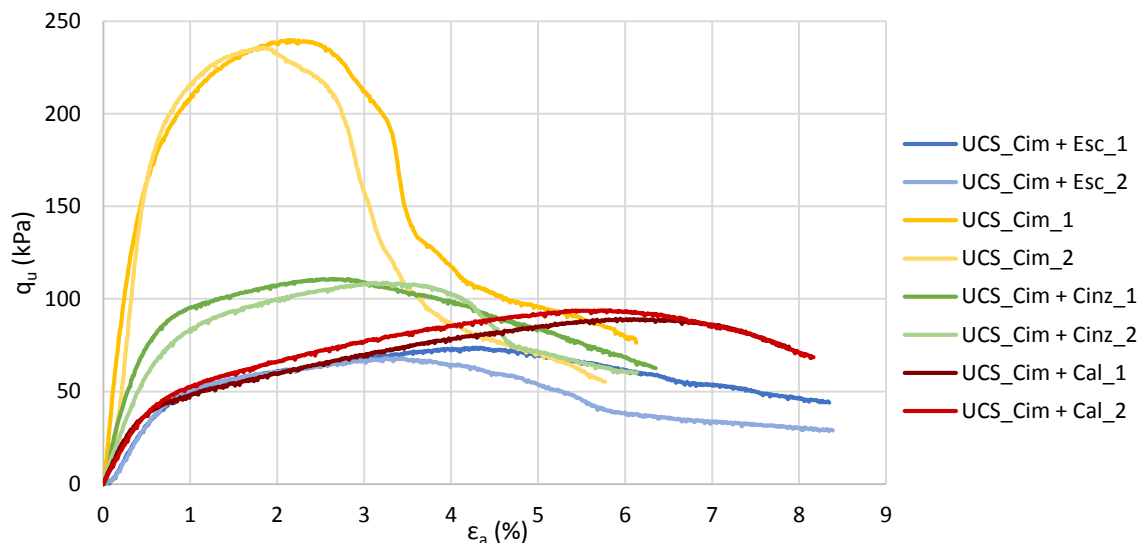


Figura 5.18 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre provetes com fibras *Dramix* (30kg/m^3) com variação da composição do ligante (dosagem de ligante = 175kg/m^3).

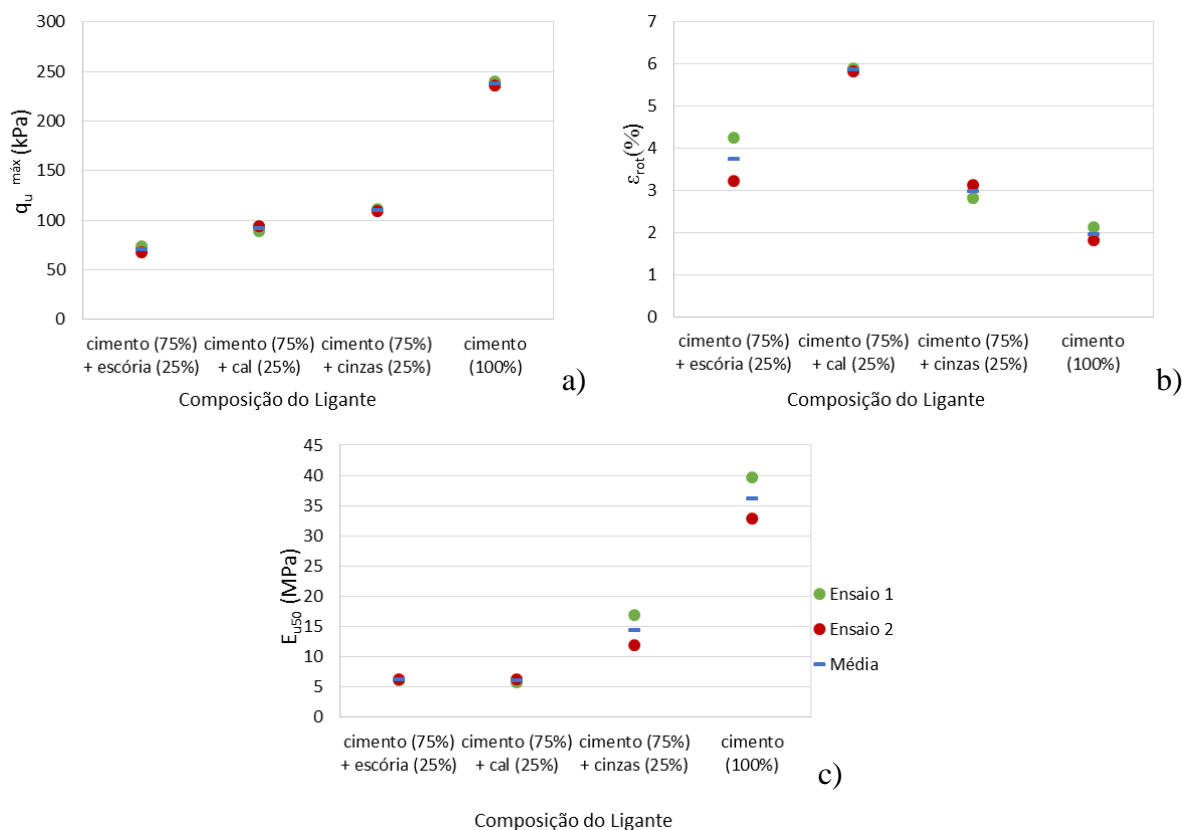


Figura 5.19 – Ensaios UCS realizados sobre provetes com a dosagem de ligante de 175kg/m^3 e dosagem de fibras *Dramix* de 30kg/m^3 para várias composições de ligante - análise da evolução de: a) $q_u \text{ máx}$; b) ϵ_a ; c) E_{u50} .

As curvas tensão-extensão representadas na Figura 5.18 mostram uma grande diferença de comportamento quando são adicionados diferentes aditivos ao cimento Portland de base. Observa-se uma elevada rigidez e resistência quando é usado o cimento Portland, apresentando um comportamento mais rígido que os demais. A resistência máxima varia muito pouco com o tipo de aditivo misturado com o cimento Portland, como se pode ver na Figura 5.19 a). No entanto, os provetes constituídos pela combinação de cimento e cal viva apresentam maior ductibilidade.

As Figuras 5.20 e 5.21 exibem os resultados obtidos em ensaios de compressão diametral realizados sobre provetes com dosagem de fibras *Dramix* de 30kg/m^3 e dosagem de ligante de 175kg/m^3 em que a composição de ligante varia.

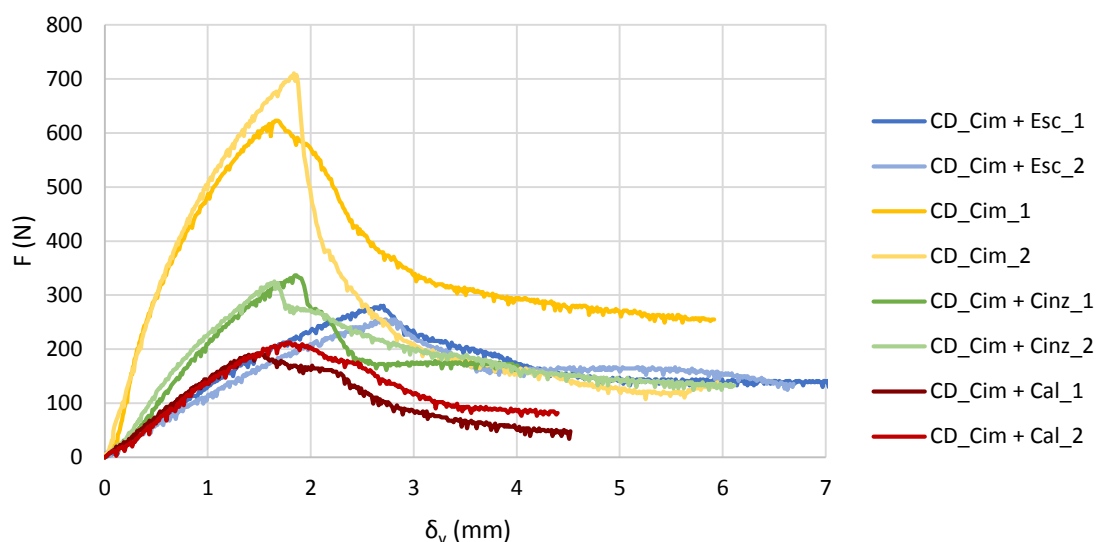


Figura 5.20 – Curvas força-deslocamento vertical de ensaios CD realizados sobre provetes com fibras *Dramix* (30kg/m^3) com variação da composição do ligante (dosagem de ligante = 175 kg/m^3).

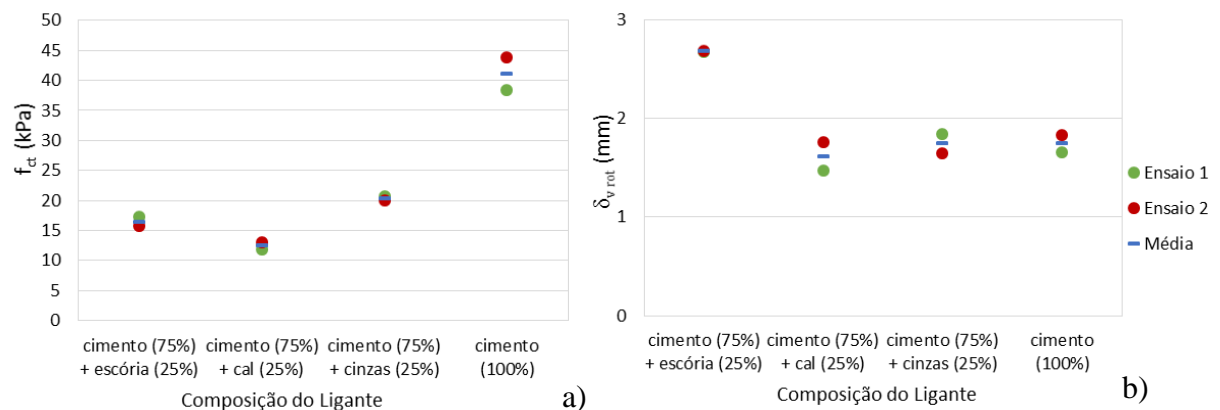


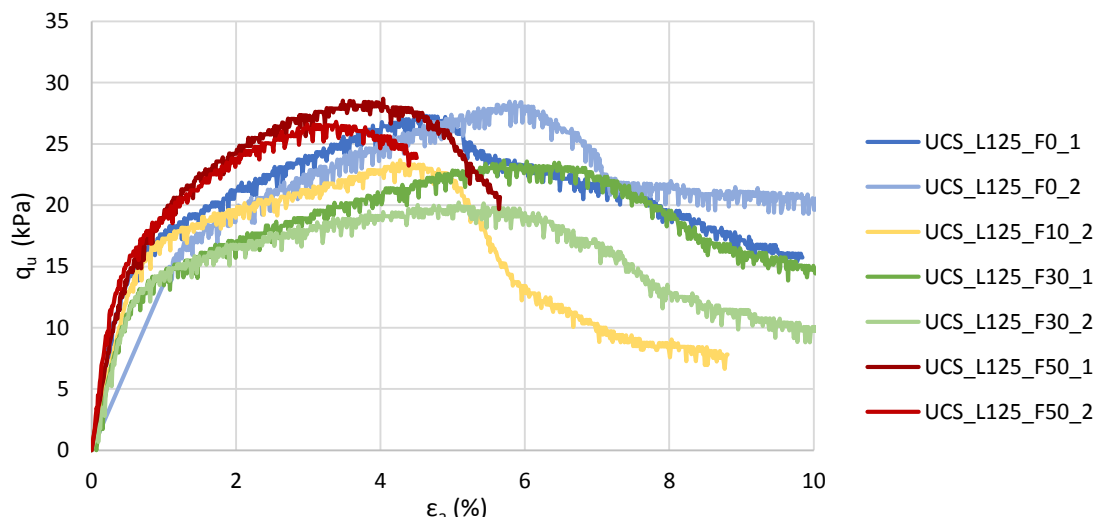
Figura 5.21 – Ensaio CD realizado sobre provetes com a dosagem de ligante de 175kg/m³ e dosagem de fibras *Dramix* de 30kg/m³ para várias composições de ligante - análise da evolução de: a) f_{ct} ; b) ϵ_a .

Tal como nos ensaios de compressão simples, também nos ensaios de compressão diametral a tensão de rotura é muito maior quando o ligante é constituído unicamente por cimento. Quando adicionados outros aditivos ao cimento, a resistência à tração diminui em relação a qualquer um dos casos. O deslocamento vertical na rotura é ligeiramente maior para a composição de cimento Portland e escória granulada de alto-forno, sendo praticamente igual para as demais composições de ligante.

Pela análise dos ensaios UCS e CD, pode-se concluir que o cimento é o ligante que induz maior resistência e rigidez. Relativamente à incorporação de aditivos no cimento Portland, a melhor opção corresponde à utilização de cinzas volantes uma vez que apresentam a melhor resistência e rigidez, com a vantagem adicional de se estar a usar um subproduto industrial.

5.7 Análise da influência da dosagem de fibras *Dramix*

As Figuras 5.22 e 5.23 mostram os resultados obtidos para os ensaios UCS para a dosagem de ligante (constituído por cimento Portland e escória granulada) de 125kg/m³ por variação da dosagem de fibras *Dramix* de 0 a 50kg/m³.



Os ensaios com os códigos UCS_L125_F50_1/2 foram realizados por um operador diferente

Figura 5.22 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre provetes com 125kg/m³ de ligante com variação da dosagem de fibras *Dramix*.

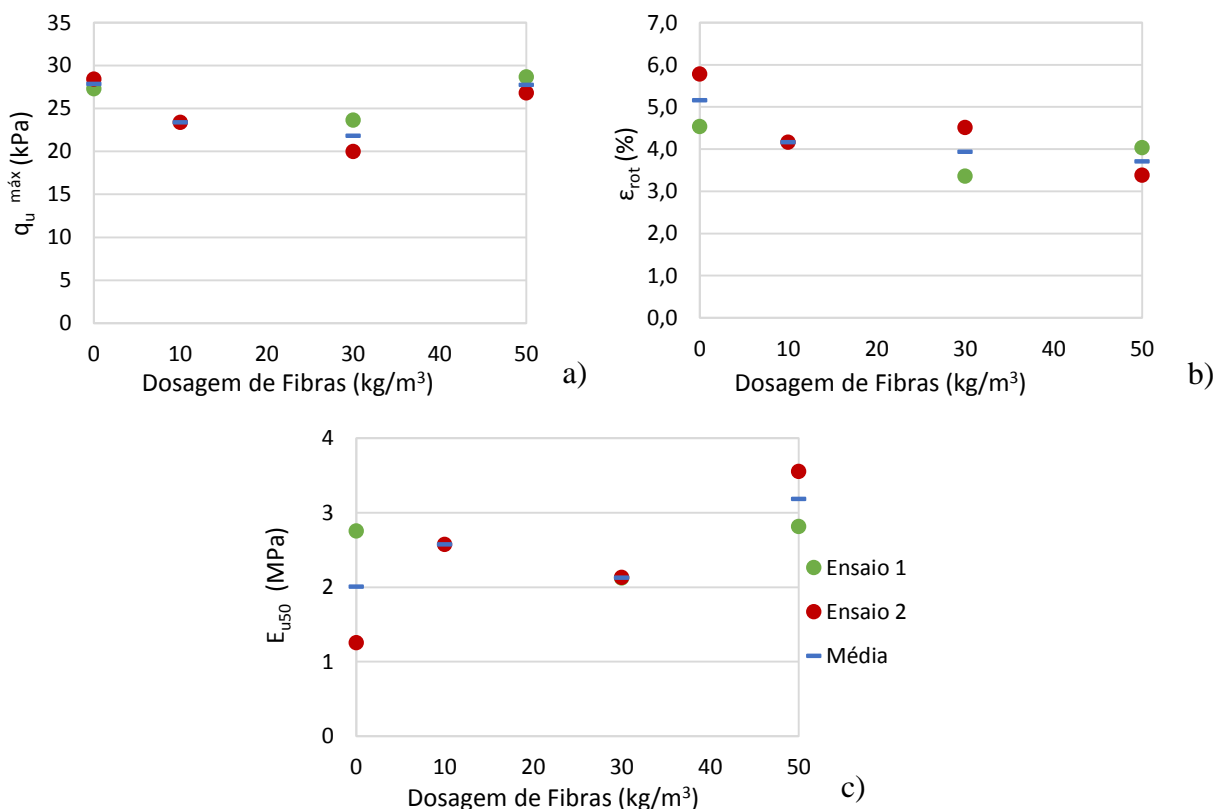


Figura 5.23 – Ensaios UCS sobre provetes com a dosagem de ligante 125kg/m³ por variação da dosagem de fibras *Dramix* - análise da evolução de: a) $q_u^{\text{máx}}$; b) ϵ_a ; c) E_{u50} .

Nas Figuras 5.24 e 5.25 estão representados os resultados obtidos nos ensaios UCS para a dosagem de ligante de 175kg/m³ para várias dosagens de fibras.

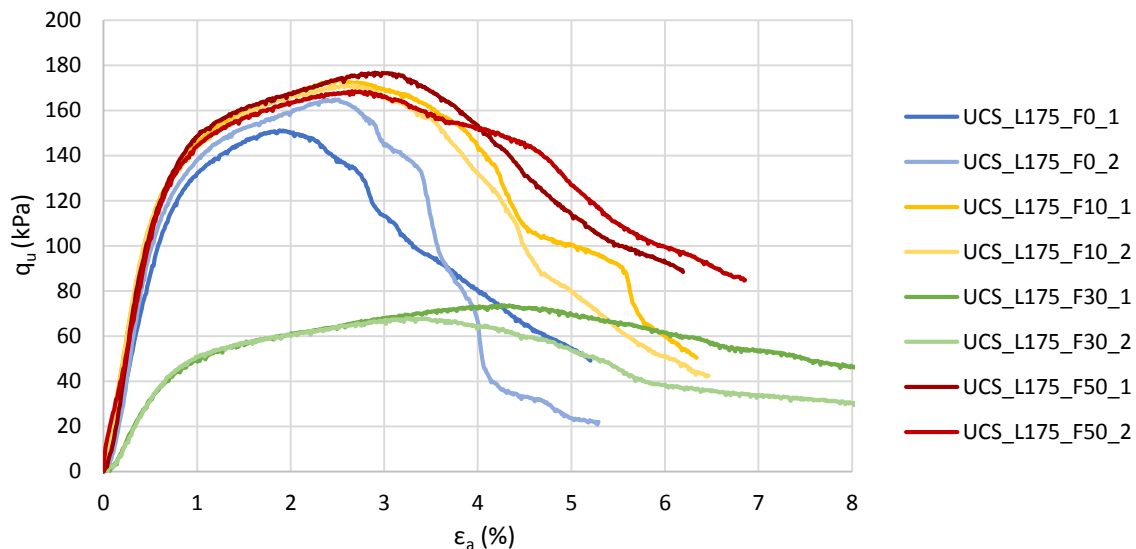
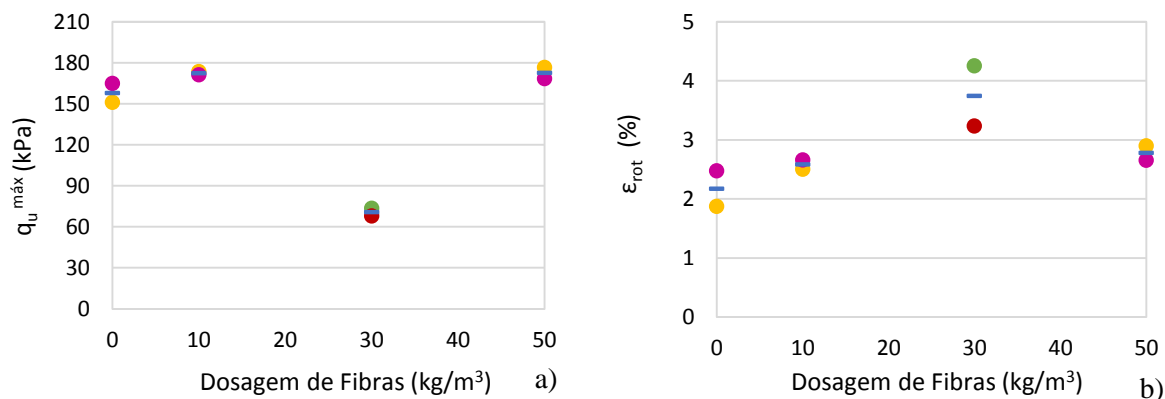


Figura 5.24 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre provetes com 175kg/m³ de ligante com variação da dosagem de fibras *Dramix*.



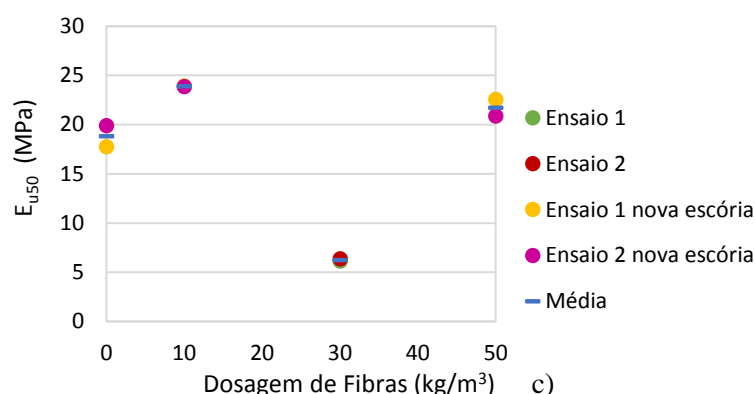


Figura 5.25 – Ensaio UCS realizados sobre provetes com a dosagem de ligante de 175kg/m^3 por variação da dosagem de fibras *Dramix* - análise da evolução de: a) $q_u^{\text{máx}}$; b) ϵ_a ; c) E_{u50} .

Para a dosagem de 175kg/m^3 de ligante apenas o provete com dosagem de fibras de 30kg/m^3 é constituído pela escória inicial, não sendo por isso comparável com os outros resultados apresentados nas Figuras 5.24 e 5.25. Ao analisar as Figuras 5.22, 5.23, 5.24 e 5.25 percebe-se que não existe uma tendência definida quanto ao comportamento do solo mole estabilizado com a incorporação de fibras *Dramix*, quer no que diz respeito à resistência máxima quer à rigidez, tal como constatou Teles (2013) com a utilização de fibras *Wiremix*. Para a dosagem de ligante de 125kg/m^3 a extensão de rotura diminui com o aumento da dosagem de fibras, não sendo no entanto esse o comportamento esperado, uma vez que seria suposto as fibras reforçarem o solo quimicamente estabilizado. Por outro lado, para a dosagem de 175kg/m^3 o comportamento é oposto, ou seja, a resistência máxima e a rigidez aumentam ligeiramente com a introdução de fibras e a extensão de rotura aumenta também. De facto observa-se que a adição de fibras metálicas *Dramix* ao solo quimicamente estabilizado tem um impacto incipiente, por vezes até contraproducente, o que é em grande medida explicado pela “elevada” dosagem de ligante utilizada, responsável por conferir um carácter frágil ao material, não se chegando a mobilizar a resistência das fibras na rotura. No entanto é de registar que com o aumento da deformação (pós-rotura de pico), as fibras começam a “trabalhar”, conferindo ao material resistência residual (Figuras 5.22 e 5.24). Este comportamento está de acordo com o observado por Consoli et al. (2009), tal como apresentado no capítulo 2.

Os resultados obtidos nos ensaios CD realizados sobre provetes preparados com dosagem de ligante de 125kg/m^3 (constituído por cimento e escória) por variação de dosagem de fibras *Dramix* encontram-se ilustrados nas Figuras 5.26 e 5.27.

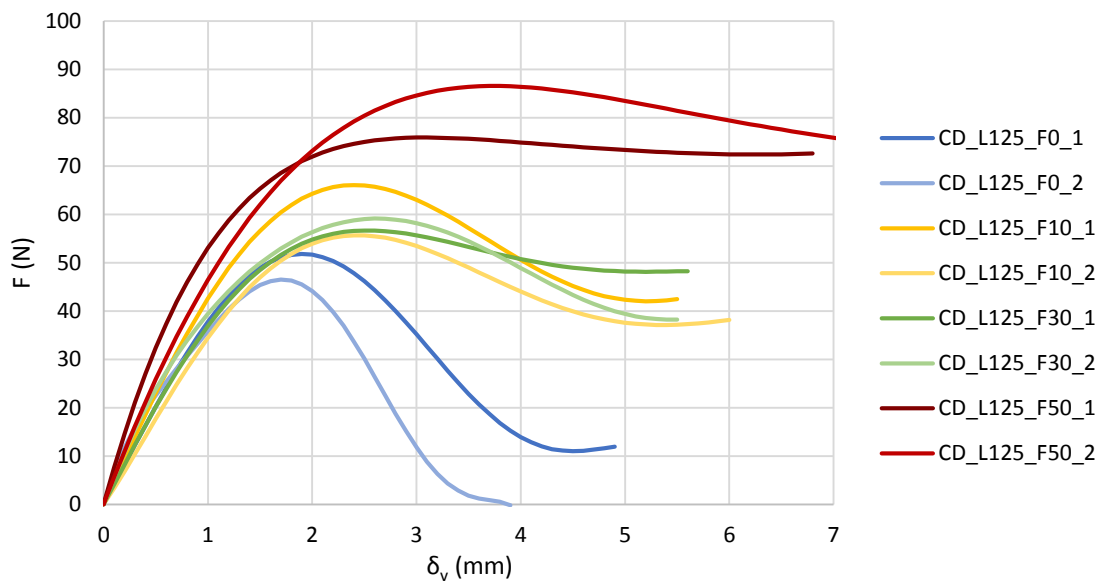


Figura 5.26 – Curvas força-deslocamento vertical de ensaios CD realizados sobre provetes com 125kg/m³ de ligante com variação da dosagem de fibras *Dramix*.

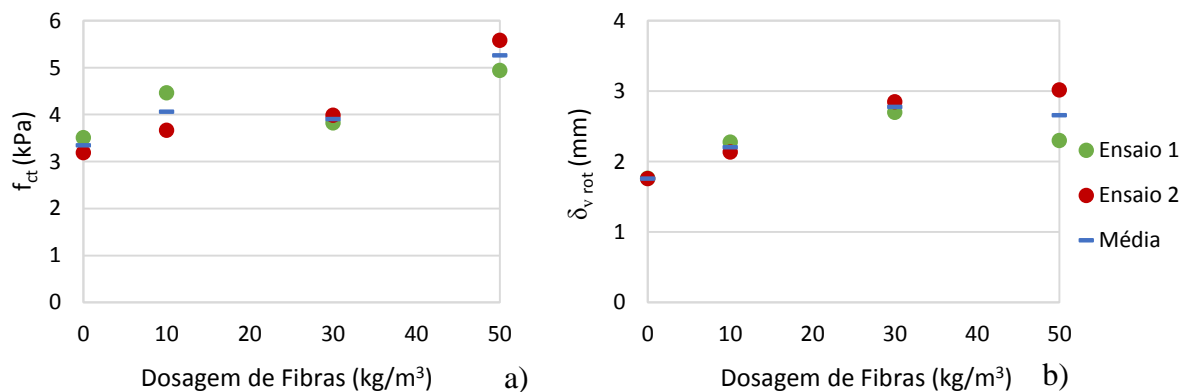


Figura 5.27 – Ensaio CD realizados sobre provetes com a dosagem de ligante de 125kg/m³ com variação da dosagem de fibras *Dramix* - análise da evolução de: a) f_{ct} ; b) $\delta_{v,rot}$.

Os resultados dos provetes com dosagem de ligante de 125kg/m³ mostram que a resistência à tração aumenta ligeiramente com o incremento da dosagem de fibras *Dramix*. É notório o efeito das fibras no comportamento pós-rotura, retratado por resistências residuais significativas, as quais tendem a aumentar com o incremento da dosagem de fibras. Este comportamento é contrastante com o observado em provetes sem fibras onde a resistência decresce abruptamente pós-rotura para valores nulos. O deslocamento vertical na rotura aumenta com a dosagem de fibras, como seria de esperar.

As Figuras 5.28 e 5.29 apresentam os resultados obtidos para os ensaios CD realizados sobre provetes, agora, com dosagem de ligante de 175kg/m^3 e com variação de fibras *Dramix* entre 0 e 50kg/m^3 .

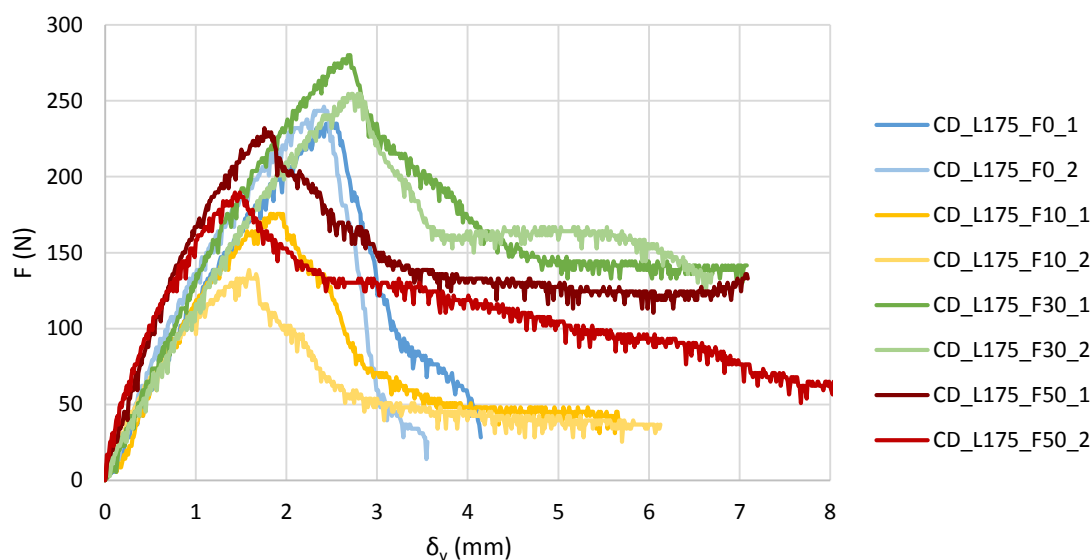


Figura 5.28 – Curvas força-deslocamento vertical de ensaios CD realizados sobre provetes com 175kg/m^3 de ligante com variação da dosagem de fibras *Dramix*.

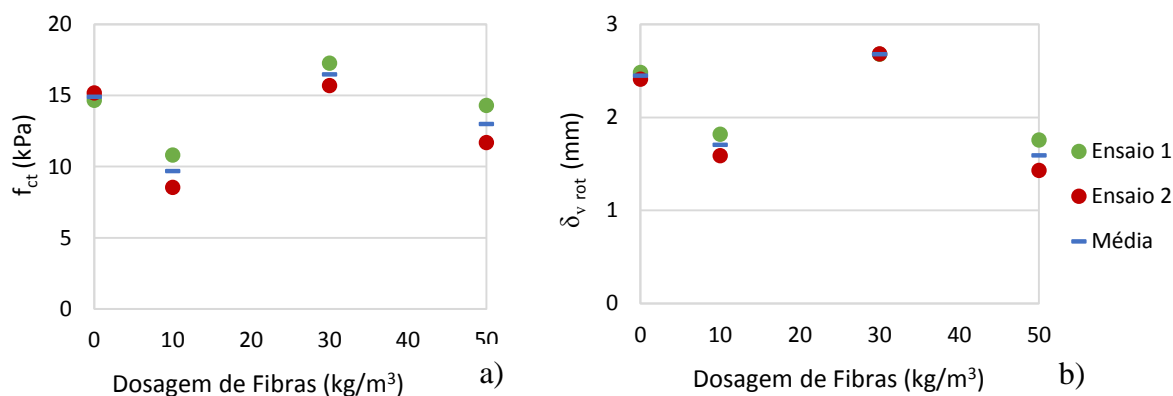


Figura 5.29 – Ensaios CD realizados sobre provetes com a dosagem de ligante de 175kg/m^3 para várias dosagens de fibras *Dramix* - análise da evolução de: a) f_{ct} ; b) $\delta_{v\text{ rot.}}$

Contrariamente ao observado nos provetes com 125kg/m^3 de ligante, para a dosagem de ligante de 175kg/m^3 constata-se a não existência de uma relação direta entre o aumento da dosagem de fibras e a resistência à tração por compressão diametral, nem tão pouco com o deslocamento vertical na rotura. Apesar disso verifica-se, novamente, que o comportamento pós-rotura melhora substancialmente fruto da introdução de fibras, principalmente para as dosagens de

fibras de 30 e 50kg/m³. Este comportamento parece resultar do aumento da rigidez do esqueleto sólido associado ao incremento da dosagem de ligante de 125 para 175 kg/m³, o que parece assegurar a mobilização de maior atrito fibra-solo estabilizado, permitindo desta forma a mobilização de maiores esforços de tração nas fibras.

De forma geral, parece que as fibras não têm grande influência na resistência máxima à compressão uniaxial e à tração. No entanto, nos resultados dos ensaios de compressão diametral, que avaliam a resistência à tração, observa-se um crescimento significativo da resistência pós-rotura. De facto, as fibras começam a “trabalhar” principalmente depois do provete romper, quando surgem as primeiras fissuras, ou seja, quando as deformações são suficientes para mobilizar a resistência das fibras. Contudo, neste trabalho não é possível determinar uma dosagem ótima de fibras, uma vez que foi testada uma gama de valores pequena, não existindo tendências completamente definidas, podendo este comportamento ser devido à distribuição aleatória das fibras.

5.8 Relação entre o teor em água e a resistência máxima

Nas Figuras 5.30 e 5.31 relaciona-se a resistência à compressão obtida em ensaios UCS e a resistência à tração obtida em ensaios CD com o teor em água final, respetivamente.

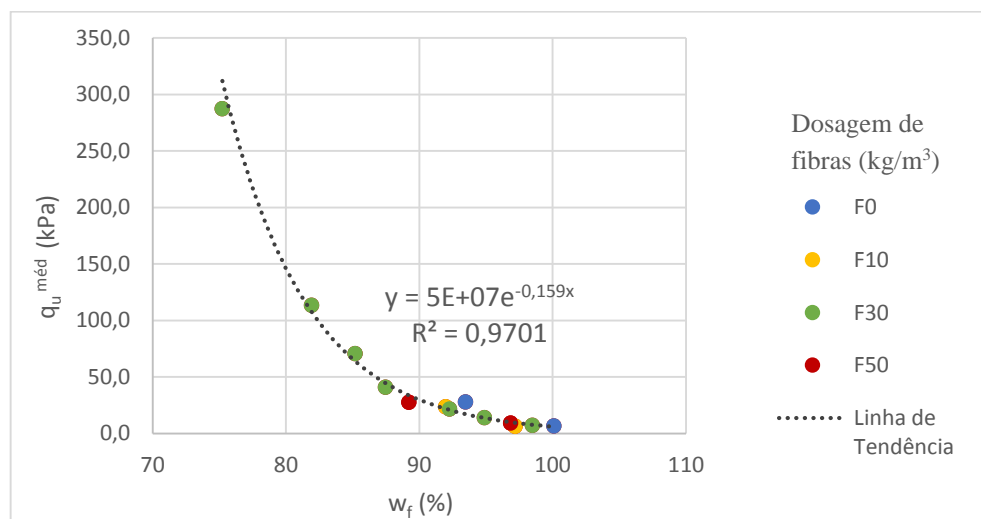


Figura 5.30 – Relação entre a resistência à compressão simples e o teor em água final.

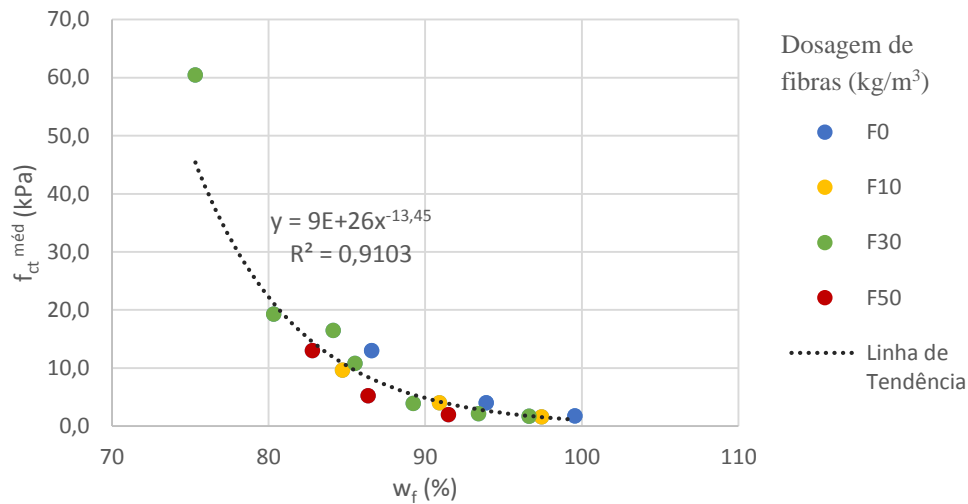


Figura 5.31 – Relação entre a resistência à tração e o teor em água final.

Os resultados mostram que tanto a resistência à compressão simples como à tração, correlacionam-se com o teor em água final, observando-se que o aumento de resistência está associado à diminuição do teor em água final. O menor teor em água final deve-se ao aumento da dosagem de ligante que conduz ao desenvolvimento das reações de hidratação e ao consequente aumento do consumo de água, induzindo o incremento das ligações cimentícias que se traduz em maior resistência.

5.9 Relação entre a resistência à Tração e à Compressão

Na Figura 5.30 relaciona-se a resistência à compressão obtida em ensaios UCS com a resistência à tração avaliada indiretamente em ensaios de compressão diametral. Na figura incluem-se também os resultados preconizados pelo Eurocódigo 2, EC2 (norma NP EN 1992-1-1, 2010) para o betão sem fibras de classes de resistência inferiores a C50/60.

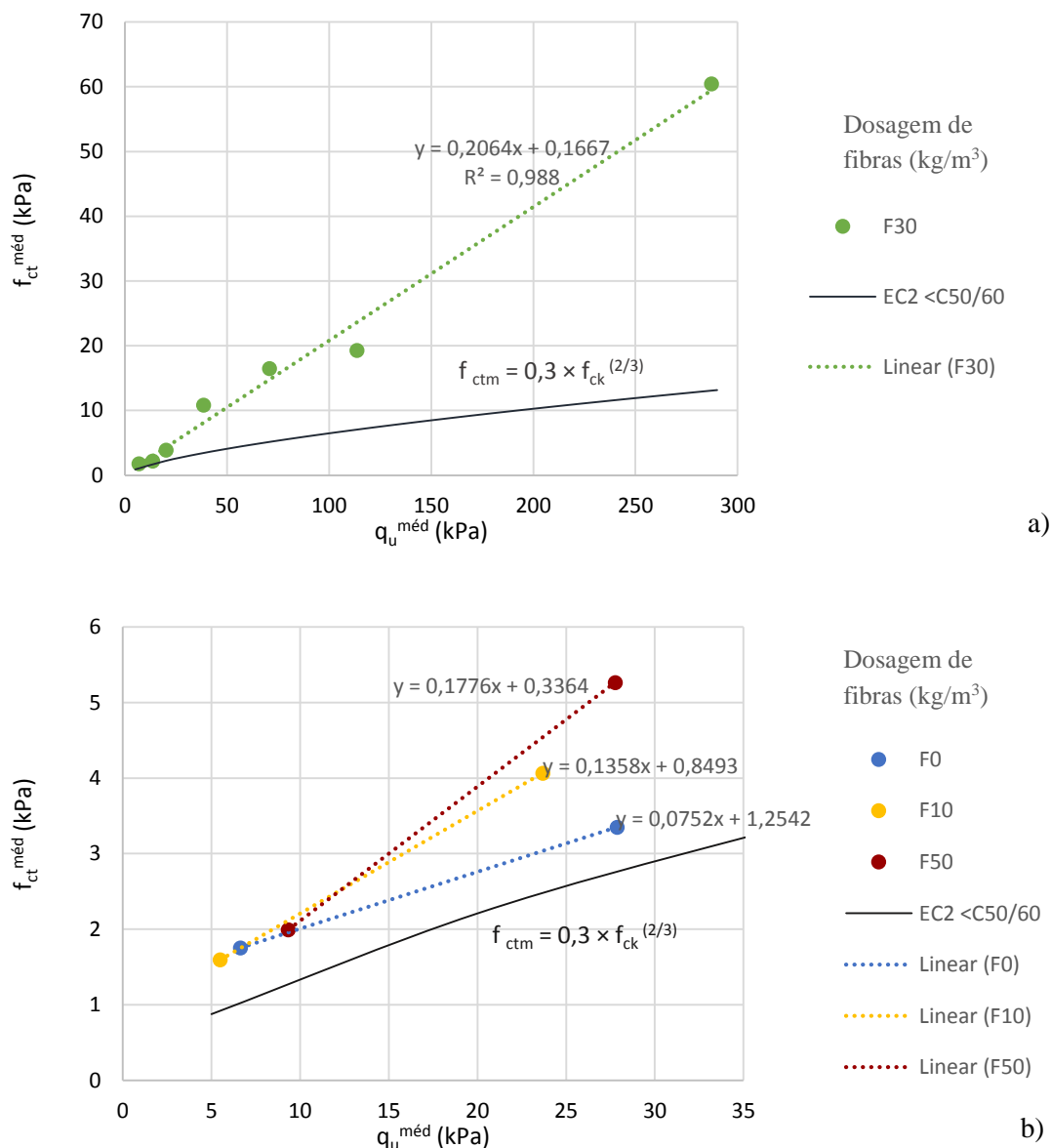


Figura 5.32 – Relação entre a resistência à tração por compressão diametral e à compressão simples: a) para a dosagem de fibras de 30kg/m³; b) para as dosagens de fibras de 0kg/m³, 10kg/m³ e 50kg/m³.

Da análise da Figura 5.32a) verifica-se existir uma tendência linear bem definida para a relação entre as resistências à tração e à compressão para a dosagem de fibras de 30kg/m³. Na Figura 5.30b) encontram-se as restantes dosagens de fibras, excluindo os resultados obtidos com a nova escória para uma dosagem de 175kg/m³ pelo que as linhas de tendência são definidas por apenas dois pontos, não sendo suficiente para comprovar as tendências apresentadas. Constatase que os provetes sem fibras exibem uma relação f_{ct}/q_u caracterizado por um declive idêntico

ao betão para os níveis de tensão apresentados. No entanto, a introdução de fibras origina o aumento do declive da relação f_{ct}/q_u , o qual cresce com o aumento da dosagem de fibras.

No Quadro 5.3 é apresentada a razão entre as resistências à tração (f_{ct}) e à compressão (q_u), excluindo-se da análise os resultados obtidos com a nova escória. Da análise global dos resultados pode-se constatar que a resistência à tração é cerca de 20% da resistência à compressão, não se registando nenhuma tendência bem definida por variação da dosagem de ligante ou de fibras.

Quadro 5.3 – Quociente entre a resistência à tração e à compressão

Fibras	Dosagem de Ligante (kg/m ³)	Composição do Ligante	Dosagem de fibras (kg/m ³)	$f_{ct}^{méd}/q_u^{méd}$	
Sem	75	Cimento + Escória	0	26%	
	125			15%	
	175			*	
Dramix 30mm	75	Cimento + Escória	10	25%	
			30	23%	
			50	21%	
	100		30	16%	
	125		10	17%	
			30	18%	
			50	19%	
	150		30	26%	
	175		10	*	
			30	23%	
			50	*	
	200			17%	
	250			21%	
	175		Cimento	30	17%
			Cimento + Cinzas		19%
Cimento + Cal			14%		

Nota: Nova escória

5.10 Comparação com o trabalho desenvolvido por Teles (2013)

Nas Figuras 5.33, 5.34, 5.35 e 5.36 confrontam-se os resultados obtidos neste trabalho com os obtidos por Teles (2013) para os ensaios de compressão simples e compressão diametral, para a dosagem de ligante de 125kg/m³, sem fibras e com fibras *Wiremix*.

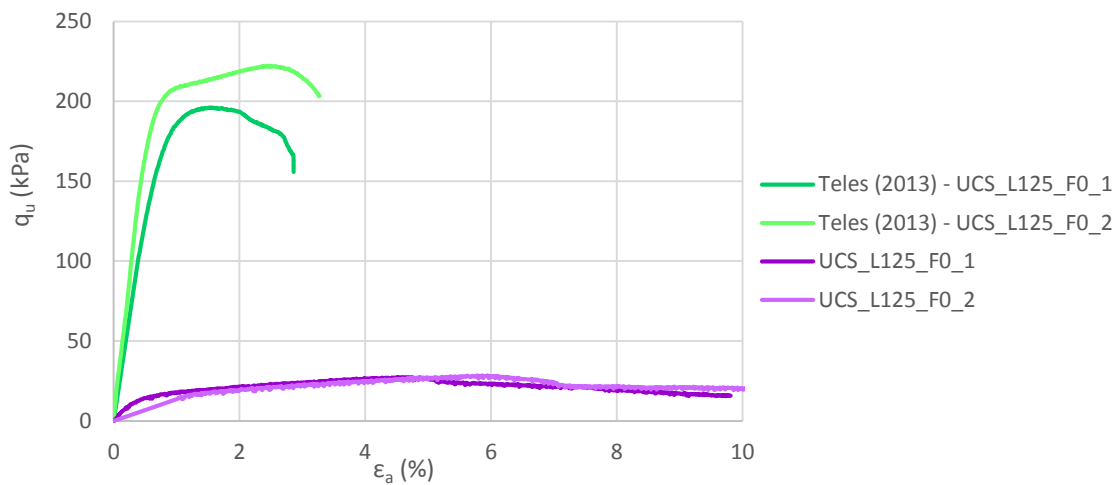


Figura 5.33 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre provetes sem fibras com dosagem de ligante de 125 kg/m^3 .

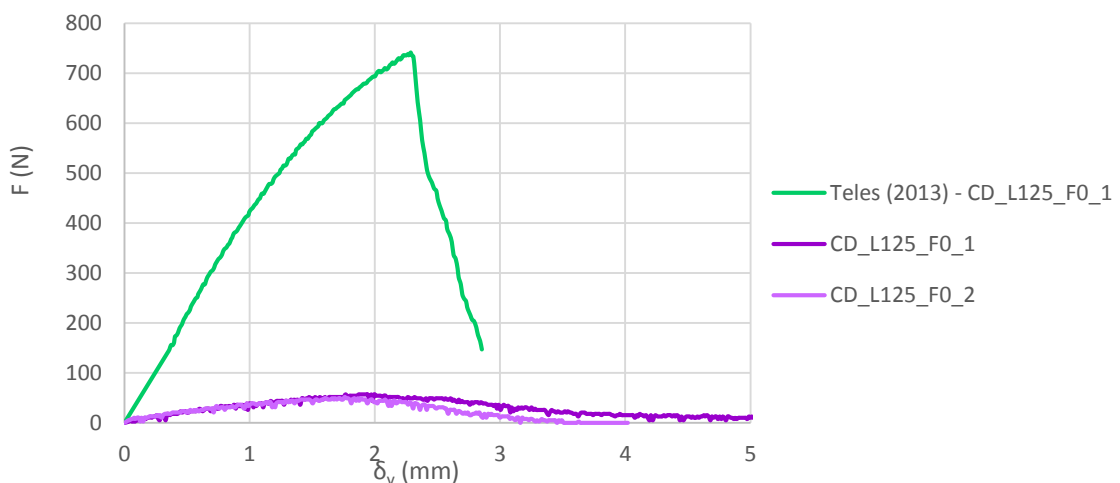


Figura 5.34 – Curvas força-deslocamento vertical de ensaios CD realizados sobre provetes sem fibras com dosagem de ligante de 125 kg/m^3 .

Todos os componentes são iguais nos provetes realizados por Teles (2013) e no presente trabalho com exceção do solo, que apesar de recolhido no mesmo local, Quinta da Foja, apresenta algumas características distintas devido à elevada variabilidade do depósito natural. Da análise do Quadro 3.1 constata-se que a generalidade dos parâmetros geotécnicos que caracterizam ambos os solos (o do presente trabalho e o de Teles, 2013), estão na mesma gama de valores, não sendo por isso evidente o motivo de tais diferenças. No entanto, não foi calculada a composição mineralógica por via direta nem a composição química, podendo ser esta a origem das expressivas diferenças do comportamento dos dois solos estabilizados (Figuras 5.33 a 5.36).

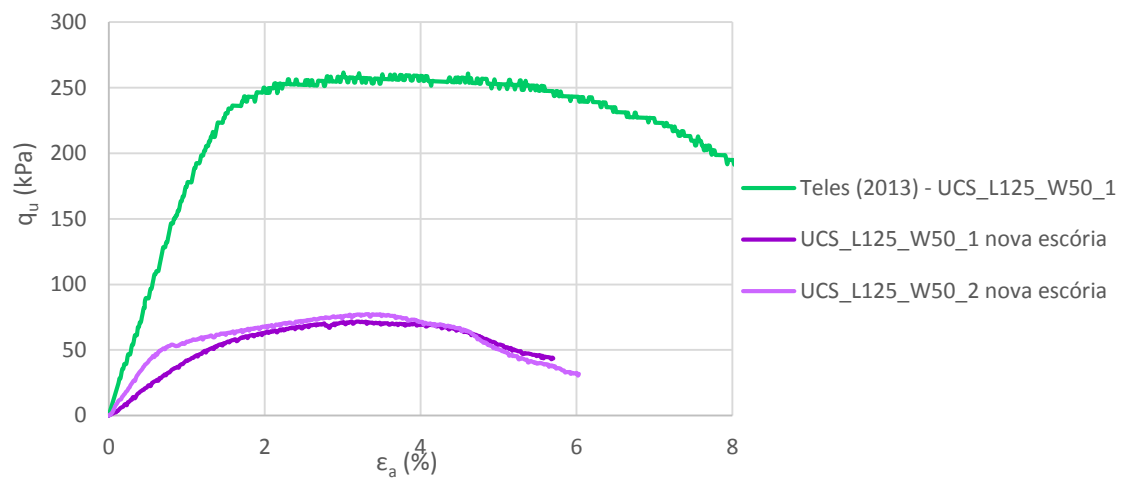


Figura 5.35– Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre provetes com 50 kg/m³ de fibras *Wiremix* e com dosagem de ligante de 125 kg/m³.

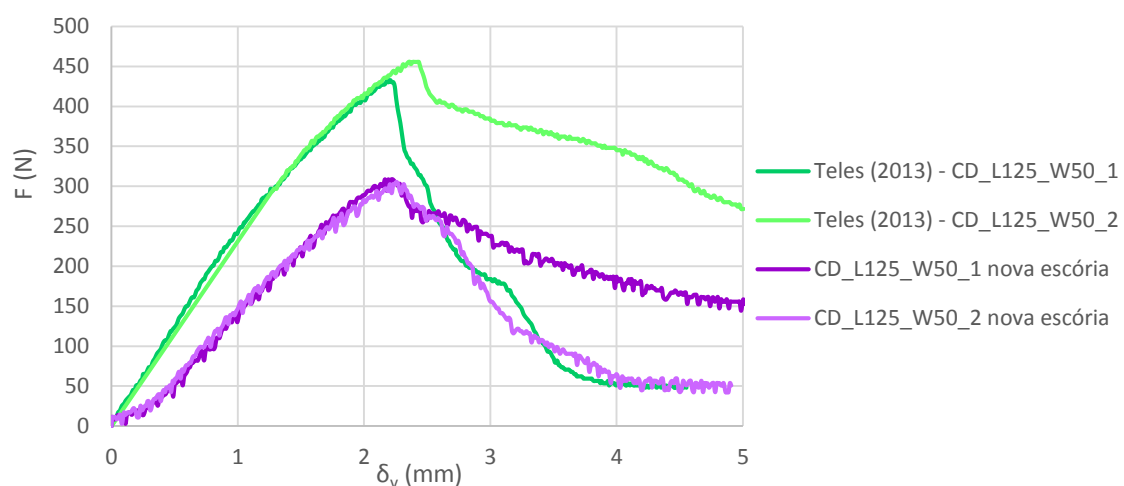


Figura 5.36 – Curvas força-deslocamento vertical de ensaios CD realizados sobre provetes com 50 kg/m³ de fibras *Wiremix* e com dosagem de ligante de 125 kg/m³.

Os provetes com fibras *Wiremix* realizados no presente trabalho foram preparados com recurso à nova escória granulada, que confere uma maior resistência quando comparada com a escória “mais antiga” utilizada nos restantes provetes. Atende-se que esta ultima escória, a “mais antiga”, foi também a utilizada no trabalho de Teles (2013) e, mesmo assim, as resistências obtidas são superiores às avaliadas nesta dissertação (Figuras 5.35 e 5.36). Do exposto resulta não ser possível comparar os resultados obtidos com os dois tipos de fibras, *Wiremix* (Teles, 2013) e *Dramix* (presente trabalho).

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

A dissertação tinha como objetivo a caracterização do solo mole do Baixo Mondego quimicamente estabilizado com incorporação de fibras metálicas *Dramix* RB305 quando sujeito a esforços de compressão e de tração, avaliado através de ensaios de compressão simples (UCS) e compressão diametral (CD), respetivamente. Procurou-se estabelecer a relação entre a resistência à compressão e à tração, comparando os valores obtidos com os preconizados para o betão. Tentou-se ainda proceder à comparação dos resultados obtidos nesta dissertação com fibras *Dramix* RB305 com os resultados obtidos por Teles (2013) com fibras *Wiremix* W30.

A primeira conclusão resultante dos ensaios de compressão simples e compressão diametral é que o tempo de mistura de 4 minutos é suficiente para que seja realizada uma mistura adequada dos diversos constituintes. Tempos de mistura superiores não levam a resistências superiores.

Conclui-se também que a resistência máxima, quer à compressão simples quer à tração (por compressão diametral), é influenciada fundamentalmente pela dosagem de ligante, correspondendo a maiores dosagens de ligante maiores resistências, módulos de deformabilidade e menores deslocamentos na rotura. Nos ensaios UCS e para pequenas dosagens de ligante, o solo estabilizado apresenta uma curva tensão-extensão semelhante à curva típica de uma argila normalmente consolidada, em que depois de atingir a rotura a resistência mantém-se aproximadamente constante com o incremento da extensão. Já para maiores dosagens de ligante, o comportamento do solo mole quimicamente estabilizado é fortemente determinado pela resistência das ligações cimentícias até se dar a rotura, após o que a resistência diminui significativamente e o comportamento do solo passa a ser determinado pelo atrito entre partículas e/ou pela mobilização da resistência das fibras metálicas. Nos ensaios CD é também evidente a melhoria da resistência máxima com o aumento da dosagem de ligante, quer para os provetes sem fibras quer para os com fibras. Enquanto nos provetes sem fibras a resistência pós-rotura decresce abruptamente para zero, a introdução de fibras no solo estabilizado origina a diminuição da perda de resistência pós-rotura devido à mobilização da resistência à tração das fibras, denotando o material de resistência residual.

A escolha dos ligantes aplicados na estabilização química é de extrema importância, tendo grande influência no seu comportamento. Conclui-se que o cimento Portland CEM I 42,5R aplicado individualmente é aquele que confere uma maior resistência à compressão e à tração, maior rigidez e menores deformações na rotura. A substituição de parte do cimento Portland CEM I 42,5R por cinzas volantes de Sines é o mais interessante de entre os aditivos estudados, com a vantagem ambiental de ser estar a valorizar um subproduto industrial.

A introdução de fibras nas misturas solo-ligante de forma geral não altera significativamente a resistência máxima quer à compressão quer à tração (por compressão diametral). Nos ensaios UCS não existe uma tendência definida no que diz respeito à resistência máxima, à rigidez e à extensão de rotura, constatando-se diferenças no comportamento para as dosagens de ligante estudadas. Para a dosagem de 125kg/m^3 existe uma diminuição da resistência máxima com a introdução de fibras o que pode ser explicado pela descontinuidade da matriz que estas provocam, impedindo o estabelecimento de algumas ligações cimentícias. Já para a dosagem de 175kg/m^3 a resistência máxima e a rigidez aumentam ligeiramente com a introdução de fibras. Nos ensaios CD constatou-se resultados diferentes para as dosagens de ligante estudadas. Enquanto que para a dosagem 125kg/m^3 , o incremento da dosagem de fibras aumenta a resistência máxima à tração e o deslocamento vertical na rotura, para a dosagem de 175kg/m^3 não parece existir uma relação direta entre o aumento da dosagem de fibras e a resistência à tração ou o deslocamento vertical na rotura. Para que a resistência das fibras seja mobilizada é necessário que existam deslocamentos junto destas, tendo-se concluído neste trabalho que os deslocamentos ocorridos até à rotura não são suficientes para a mobilização da resistência das fibras. No entanto, após a rotura (quebra das ligações cimentícias) a resistência das fibras é mobilizada, principalmente nos provetes sujeitos a ensaios de compressão diametral, conferindo resistência residual.

A relação entre a resistência à tração e à compressão para os provetes sem fibras parece ser semelhante à relação do betão enunciada no Eurocódigo 2. A introdução de fibras aumenta ligeiramente o declive da relação entre a resistência à tração e à compressão, no entanto não é possível determinar a dosagem de fibras ideal. Em qualquer dos casos, verifica-se que a resistência à tração é de cerca de 20% da resistência à compressão.

Não foi possível determinar qual o tipo de fibras metálicas (*Dramix* ou *Wiremix*) mais vantajoso na incorporação no solo mole quimicamente estabilizado, uma vez que existem diferenças significativas nas resistências determinadas para a mesma dosagem de ligante na presente dissertação e no trabalho desenvolvido por Teles (2013). Julga-se que as diferenças podem ser devidas à diferente reatividade dos ligantes utilizados, a qual varia com o tempo, e à elevada variabilidade do solo natural.

Em geral pode-se afirmar que a introdução de fibras metálicas não é relevante na estabilização química do solo mole do Baixo Mondego no que diz respeito à resistência máxima, tanto em compressão como em tração. No entanto, tem a enorme vantagem de alterar o comportamento pós-rotura dotando o material de uma significativa resistência residual.

6.2 Trabalhos futuros

De forma a completar o presente estudo seria importante abordar os seguintes aspetos:

- Completar a análise da influência da constituição de ligantes, com a utilização de diferentes combinações;
- Estudar a estabilização química do referido solo com cimento Portland CEM I 42,5R e cinzas volantes de Sines (realizar ensaios com diferentes dosagens de ligante e fibras metálicas), uma vez que esta é a combinação que apresenta maior resistência com a vantagem da incorporação de um subproduto industrial (melhor sob o ponto de vista ambiental);
- Analisar a influência de fibras *Dramix* com diferentes comprimentos e configurações geométricas;
- Repetir os ensaios de compressão diametral com as várias dosagens de fibras *Dramix* para a dosagem de ligante de 175kg/m^3 , de forma a clarificar os resultados obtidos;
- Analisar a importância do teor em água inicial, avaliando não só a resistência máxima como a sua trabalhabilidade;
- Analisar a estabilização química com introdução de fibras metálicas noutros tipos de solo (como areias e outros tipos de argila);
- Estudar mais aprofundadamente as características do solo mole do Baixo Mondego (nomeadamente a sua composição química e mineralógica) por forma a melhorar os resultados;
- Analisar a viabilidade da técnica de estabilização química com introdução de fibras em campo, confrontando com os resultados obtidos em laboratório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Azzo, S. I., Salih, S. M., e Salim, T. A. (2006). “Compressive strength and swelling properties of randomly distributed fiber reinforced clayey soil”. University of Mosul, Mosul.
- ASTM D 2166 (2000). “Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil”. American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 2487 (1998). “Standard classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)”. American Society for Testing and Materials.
- Belgobekaert@ (2014). <http://www.belgobekaert.com.br/Produtos/Documents/Catalogo-Dramix.pdf>. Acedido em Março de 2014
- 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.
- Branco, F. J. F. G. (2009). “Apontamentos das aulas da disciplina de Materiais de Construção”. Dep. de Eng^a Civil da FCTUC, Universidade de Coimbra.
- Coelho, P. A. L. F. (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, Universidade de Coimbra.
- Consoli, N. C., Vendruscolo, M. A., Fonini, A., e Rosa, F. D. (2009). “Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range”. Geotextiles and Geomembranes, Vol. 27, pp.196-203.
- Consoli, N. C., Bassani, M. A. A., e Festugato, L. (2010). “Effect of fiber-reinforcement on the strength of cemented soils”. Geotextiles and Geomembranes, Vol. 28, pp.344-351.

- 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, Universidade de Coimbra.
- Cristelo N, (2001). “Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal.” Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho.
- Cst@ (2014). http://www.cst.com.br/produtos/co_produtos/catalogo_produtos/escoria_forno/index.asp. Acedido em Abril de 2014
- Dramix (2012). BEKAERT Dramix RB305. Ficha do produto.
- E196 (1966). “Solos – Análise granulométrica”. Especificação do LNEC, Lisboa, Portugal.
- E201 (1967). “Solos - Determinação do teor em matéria orgânica”. Especificação do LNEC, Lisboa, Portugal.
- Figueiredo, A. D. (2000). “Concreto com fibras de aço.” Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politecnica da Univerdidade de São Paulo
- Kalhor, A. (2008), “Effect of Metal Fibers on Clayey Soils”. Eletronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol.13, Bund K, Teerão.
- 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 1992-1-1 (2010) “Eurocódigo 2 – Projeto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios”. IPQ
- NP EN 206-1 (2007). “Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade”. IPQ.
- 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”. IPQ.
- NP EN 12390-3 (2011). “Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão de provetes”. IPQ.

- NP EN 12390-6 (2011). “Ensaio do betão endurecido. Parte 6: Resistência à tracção por compressão de provetes”. IPQ.
- 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”. IPQ.
- Proença, A. M. (2004). “Apontamentos sobre Betão com Fibras”. FEUP, Universidade do Porto
- Sukontasukkul, P. e Jamsawang, P. (2011). “Use of steel and polypropylene fibers to improve flexural performance of deep soil-cimented column”. *Construction and Building Materials*, Vol. 29, pp.201-205.
- Teles, J. M. N. P. C. (2013). “Comportamento Mecânico do Solo Mole do Baixo Mondego Quimicamente Estabilizado com Adição de Fibras Metálicas”. Dissertação de Mestrado, Dep. de Eng^a Civil da FCTUC, Universidade de Coimbra
- Ulrix, E., Ferreira, N. (2011). “Betões com fibras em aplicações subterrâneas”. 1^{as} jornadas de materiais de construção. Acedido em http://paginas.fe.up.pt/~jmc2011/wp-content/uploads/2011/03/Erik_Ulrix.pdf.
- Venda Oliveira, P. J. (2009). “Apontamentos das aulas da disciplina de Obras de Terra”. Dep. de Eng^a Civil da FCTUC, Universidade de Coimbra.
- Vival@ (2014). http://www.vival.ua/UserFiles/File/Broshure_Bekaert_Wiremix_eng.pdf. Acedido em Março de 2014.
- Wiremix (2013). BEKAERT Wiremix W30. Ficha do produto.