

# RESISTÊNCIA DO SOLO MOLE DO BAIXO MONDEGO QUIMICAMENTE ESTABILIZADO E REFORÇADO COM FIBRAS METÁLICAS

## STRENGTH OF THE SOFT SOIL OF BAIXO MONDEGO CHEMICALLY STABILIZED AND REINFORCED WITH STEEL FIBERS

Antunes, Vanessa; *Dep. Eng<sup>a</sup> Civil, Univ. de Coimbra, Coimbra, Portugal, vsofiantunes@hotmail.com*  
Venda Oliveira, Paulo J.; *Dep. Eng<sup>a</sup> Civil, Univ. de Coimbra, Coimbra, Portugal, pjvo@dec.uc.pt*  
Correia, António A. S. ; *Dep. Eng<sup>a</sup> Civil, Univ. de Coimbra, Coimbra, Portugal, aalberto@dec.uc.pt*

### RESUMO

Neste trabalho estuda-se, por via experimental, a influência da utilização de diversos ligantes no comportamento mecânico (resistência à compressão, tração e rigidez) de misturas solo-ligante-fibras metálicas, com base em resultados de ensaios de compressão simples (UCS) e de compressão diametral (CD, para aferição indireta da resistência à tração). O efeito da variação da composição de ligante é efetuada para as seguintes composições: cimento Portland CEM I 42,5 R, cimento com escória granulada de alto-forno, cimento com cinzas volantes e cimento com cal viva. Os resultados mostram que o cimento Portland CEM I 42,5R aplicado individualmente é aquele que confere melhores propriedades mecânicas ao material compósito.

### ABSTRACT

This work aims to study the effect of different types of binders on the mechanical behaviour of a soil chemically stabilized and reinforced with steel fibres. Unconfined compression strength (UCS) and of diametrical compression tests (CD, these for the indirect gauging/evaluation of tensile resistance) are carried out. It is study the effect of the following composition of binders: Portland cement CEM I 42.5 R, cement with ground granulated blast-furnace slag, cement and fly ash and cement with quicklime. The results show that the use of Portland cement without other binder induces the best mechanical properties of the composite material.

### 1 - INTRODUÇÃO

A construção de aterros sobre solos moles está associada a problemas de estabilidade e a elevados deslocamentos, tanto verticais como horizontais. A construção de obras nestas formações geotécnicas só é possível com a utilização de metodologias de melhoramento/estabilização de solos. Uma das técnicas que tem sido aplicada com sucesso é a estabilização química de solos aplicada em profundidade, consistindo na mistura do solo com ligantes, os quais induzem a alteração do comportamento mecânico, conduzindo ao aumento de resistência e de rigidez.

Quando esta técnica é utilizada em paredes de contenção ou em estacas sujeitas a solicitações sísmicas ou a elevadas pressões horizontais é fundamental dotar este material de adequada resistência à tração, a qual pode ser conferida pela introdução de perfis metálicos I ou pela inclusão de fibras de pequeno comprimento sintéticas ou metálicas (Correia et al. 2015; Venda Oliveira et al. 2015). O reforço de solo estabilizado com fibras metálicas tem sido objeto de um reduzido número de trabalhos, os quais revelaram resultados contraditórios; assim, enquanto que a inclusão de fibras num silte estabilizado com 4% de cal origina o aumento da resistência à compressão (Gülü and Khudir 2014), a utilização de fibras num solo mole estabilizado com um teor em ligante maior que 10% reduz a resistência à flexão (Sukontasukkul and Jamsawang 2012).

Tendo em conta os poucos trabalhos efetuados e as inconsistências dos resultados obtidos, é pertinente aprofundar o conhecimento sobre a temática de solos estabilizados e reforçados com fibras metálicas. Assim, o presente trabalho tem como objetivo principal estudar o comportamento do solo mole do "Baixo Mondego" quimicamente estabilizado, e reforçado com adição de fibras metálicas *Dramix RB305*, utilizando várias tipos de ligante. O programa experimental consiste na realização de ensaios de compressão simples não confinada (UCS) e compressão diametral (CD) em provetes com 28 dias de cura, preparados laboratorialmente.

## 2 - PROGRAMA DE ENSAIOS

### 2.1 - Materiais

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. O solo, segundo a classificação unificada (ASTM D 2487, 1998), classifica-se como silte orgânico (OH) em consequência do elevado teor em matéria orgânica (8,1 %).

O quadro 1 resume as principais características do solo mole do Baixo Mondego determinadas por Coelho (2000), Correia (2011) e Antunes (2014), para amostras recolhidas à profundidade de 2,5m. Este solo apresenta uma fraca resistência ao corte e elevada compressibilidade, propriedades estas condicionadas pelo elevado teor em matéria orgânica.

Quadro 1 - Propriedades mecânicas e físicas do solo natural (Coelho, 2000; Correia, 2011; Antunes, 2014)

| Características do Solo                            |                                     | Coelho (2000) | Correia (2011) | Presente estudo |
|--|-------------------------------------|---------------|----------------|-----------------|
| Composição Granulométrica                          | Argila (%)                          | 13 - 30       | 8 - 12         | 23              |
|  | Silte (%)                           | 54 - 73       | 71             | 57              |
|  | Areia (%)                           | 14 - 16       | 17 - 21        | 20              |
| Peso Volúmico Saturado                             | $\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 14,80         | 14,56          | -               |
| Densidade das Partículas Sólidas                   | G                                   | 2,58          | 2,555          | 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           | 8,13            |
| Limites de Consistência                            | w <sub>p</sub> (%)                  | 40            | 42,80          | 42,9            |
|  | w <sub>L</sub> (%)                  | 77            | 71,03          | 80              |
| Grau de Sobreconsolidação                          | OCR                                 | 3,3           | 3,3            | -               |
| Índices de Compressibilidade e Recompressibilidade | C <sub>c</sub>                      | 0,63          | 0,57           | -               |
|  | C <sub>r</sub>                      | 0,08          | 0,065          | -               |
| Coeficiente de Consolidação secundária             | C <sub>α</sub>                      | 0,006         | 0,02           | -               |

Para o presente estudo a estabilização química do solo mole do Baixo Mondego foi realizada com diversas misturas de ligantes: cimento Portland CEM I 42,5 R, cimento e escória granulada de alto-forno, cimento e cinzas volantes de Sines, cimento e cal viva. O solo quimicamente estabilizado foi ainda reforçado por intermédio da adição de fibras metálicas Dramix RB305 (Figura 1), fabricadas pela BEKAERT a partir de arame de aço enformado a frio, possuindo pontas em gancho de forma a maximizar a mobilização da resistência à tração. Estas fibras possuem resistência à tração de 1345 MPa e módulo de Young de 210 GPa (Dramix, 2012).



Figura 1 – Fibra metálica Dramix RB305 (Dramix, 2012)

### 2.2 - Preparação de provetes

Antes da preparação dos provetes propriamente dita, foi necessário proceder à 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. Pesou-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 referida 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 misturas. Adicionou-se ainda o volume de água necessário para atingir o teor em água de 113%, valor este definido de maneira a assegurar o melhor compromisso entre trabalhabilidade da mistura e qualidade das amostras (Correia, 2011).

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

De seguida a mistura é colocada no interior de moldes de PVC (ensaios UCS:  $\phi=101,6\text{mm}$ ,  $H=200\text{mm}$ ; ensaios CD:  $\phi=101,6\text{mm}$ ,  $H=100\text{mm}$ ). No caso dos provetes submetidos a ensaios de compressão simples (UCS), 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 ensaios de compressão diametral (CD), 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. Em seguida, os provetes preparados 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 da amostra é inspecionada visualmente e os provetes são submetidos a um dos ensaios mencionados.

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)). Por cada combinação do tipo de ligante e dosagem de fibras foram produzidos dois provetes.

### 3 - RESULTADOS

A partir dos ensaios UCS representaram-se as curvas tensão-extensão ( $q_u-\epsilon_a$ ) para cada um dos provetes. A rotura é caracterizada pelo valor máximo de tensão de compressão do provete, sendo representada por  $q_u^{\text{máx}}$  (NP EN 12390-3 2011).

A partir dos ensaios CD elaboraram-se gráficos força-deslocamento vertical, que permitem o cálculo da resistência máxima à tração por compressão diametral ( $f_{ct}$ ), por intermédio da expressão:

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad [1]$$

onde, F representa a força máxima, e d e L são o diâmetro do provete e o comprimento, respetivamente (NP EN 12390-6, 2011).

No Quadro 2 apresenta-se o programa dos ensaios efetuados com a dosagem de ligante de  $175\text{kg/m}^3$  e a dosagem de fibras metálicas de 0 (sem fibras) ou  $30\text{kg/m}^3$ , os quais estão divididos em dois grupos: no primeiro estão os provetes submetidos ao ensaio de compressão simples – UCS (Figura 2a), no segundo os provetes submetidos ao ensaio de compressão diametral – CD (Figura 2b).

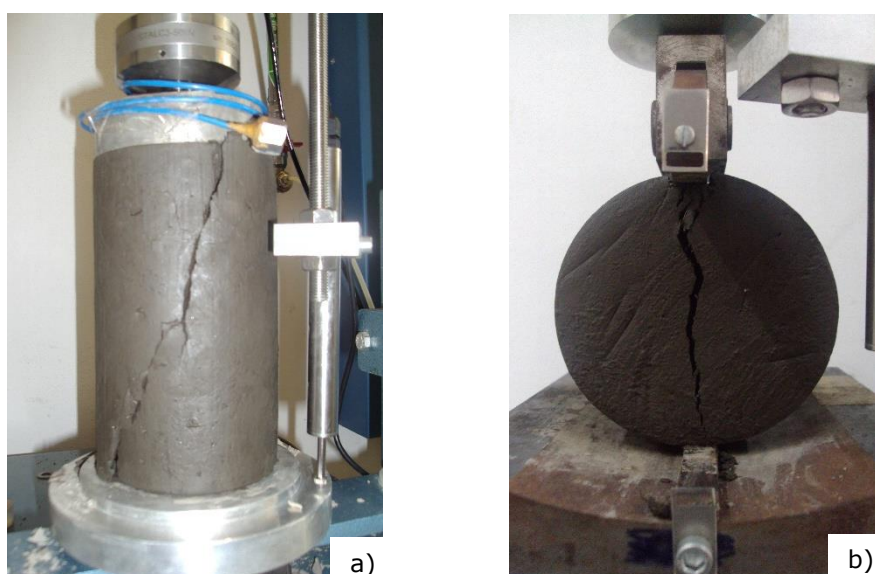


Figura 2 – Provetes ensaiados: a) ensaio UCS; b) ensaio CD

Quadro 2 – Programa dos ensaios UCS e CD e resumo dos resultados obtidos (Antunes, 2014)

| Fibras          | Ensaio             | $q_u^{m\acute{a}x}$<br>(kPa) | $q_u^{m\acute{e}d}$<br>(kPa)    | $\epsilon_{rot}$<br>(%)  | $\epsilon_{rot}^{m\acute{e}d}$<br>(%)  | $w_f$<br>(%) | $w_f^{m\acute{e}d}$<br>(%) | $E_{u50}$<br>(MPa) | $E_{u50}^{m\acute{e}d}$<br>(MPa) |
|-----------------|--------------------|------------------------------|---------------------------------|--------------------------|--|--------------|----------------------------|--------------------|----------------------------------|
| Sem Fibras      | UCS_cim + esc_f0_1 | 151,1                        | 158,0                           | 1,9                      | 2,2                                    | 86,6         | 87,6                       | 17,8               | 18,8                             |
|                 | UCS_cim + esc_f0_2 | 164,9                        | 4%                              | 2,5                      | 14%                                    | 88,5         | 1%                         | 19,9               | 6%                               |
| Dramix<br>RB305 | UCS_cim_esc_1      | 73,7                         | 70,9                            | 4,3                      | 3,7                                    | 84,8         | 85,2                       | 6,2                | 6,3                              |
|                 | UCS_cim_esc_2      | 68,0                         | (4%)                            | 3,2                      | (14%)                                  | 85,5         | (0%)                       | 6,4                | (2%)                             |
|                 | 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%)                             |
| Fibras          | Ensaio             | $f_{ct}$<br>(kPa)            | $f_{ct}^{m\acute{e}d}$<br>(kPa) | $\delta_{v,rot}$<br>(mm) | $\delta_{v,rot}^{m\acute{e}d}$<br>(mm) | $w_f$<br>(%) | $w_f^{m\acute{e}d}$<br>(%) |                    |                                  |
| Sem Fibras      | CD_cim + esc_f0_1  | 14,7                         | 15,0                            | 2,5                      | 2,4                                    | 86,7         | 86,6                       |                    |                                  |
|                 | CD_cim + esc_f0_2  | 15,2                         | 2%                              | 2,4                      | 1%                                     | 86,5         | 0%                         |                    |                                  |
| Dramix<br>RB305 | CD_cim_esc_1       | 17,3                         | 16,5                            | 2,7                      | 2,7                                    | 84,2         | 84,1                       |                    |                                  |
|                 | CD_cim_esc_2       | 15,7                         | (5%)                            | 2,7                      | (0%)                                   | 84,0         | (0%)                       |                    |                                  |
|                 | 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%)                       |                    |                                  |

Nota: Os valores dentro de parêntesis correspondem ao desvio percentual em relação à média.

A nomenclatura utilizada no Quadro 2 é composta pela designação do ensaio a que o provete é sujeito (UCS ou CD), seguido das várias combinações de ligantes analisados, onde Cim, Esc, Cinz e Cal representam as iniciais de cimento Portland CEM I 42,5R, escória granulada de alto forno, cinzas volantes de Sines e cal viva, respetivamente.

Os resultados obtidos encontram-se resumidos no Quadro 2, sendo possível constatar a reprodutibilidade dos provetes, a qual foi assegurada através da adoção de um critério de conformidade baseado na norma NP EN 206-1 (2007), segundo a qual, os resultados individuais obtidos para a resistência se devem situar dentro de um intervalo de variação de  $\pm 15\%$  em relação à média dos resultados obtidos.

### 3.1 – Influência da composição de ligante – ensaios UCS

As Figuras 3 e 4 ilustram os resultados obtidos nos ensaios UCS para várias combinações de ligantes, mantendo a dosagem de ligante de  $175\text{kg/m}^3$ .

Comparando os resultados do solo estabilizado com cimento e escórias com e sem a adição de fibras, constata-se que a introdução de fibras origina a alteração de comportamento, aumentando a ductilidade do material. Em termos das propriedades mecânicas a introdução de fibras origina a diminuição de resistência à compressão e aumento da deformabilidade.

As curvas tensão-extensão representadas na Figura 3 mostram uma grande diferença de comportamento quando são introduzidos diferentes aditivos ao cimento Portland. De facto, enquanto que a utilização de cimento Portland sem outro aditivo gera um material com comportamento frágil, caracterizado por uma significativa redução da resistência pós-pico, a adição de cinzas, cal ou escórias ao cimento Portland aumenta a ductilidade do material estabilizado, levando a que as extensões correspondentes à rotura sejam obtidas para maiores deformações (Figura 4b).

Nas Figuras 3 e 4 também se observa que a utilização de cimento Portland sem outro ligante induz um aumento substancial da rigidez e resistência, em relação às restantes misturas de ligantes. Comparando os diversos provetes estabilizados com cimento Portland e outro ligante, constata-se que a combinação de cimento com cinzas volantes é aquela que gera um material estabilizado de melhores características, ou seja, com maior resistência e rigidez. Por sua vez, os provetes constituídos pela combinação de cimento e cal viva ou cimento e escórias apresentam deformabilidade semelhante, sendo inferior à obtida nos restantes provetes.

A análise da Figura 4d permite constatar que composição de ligante não altera significativamente o teor em água final.

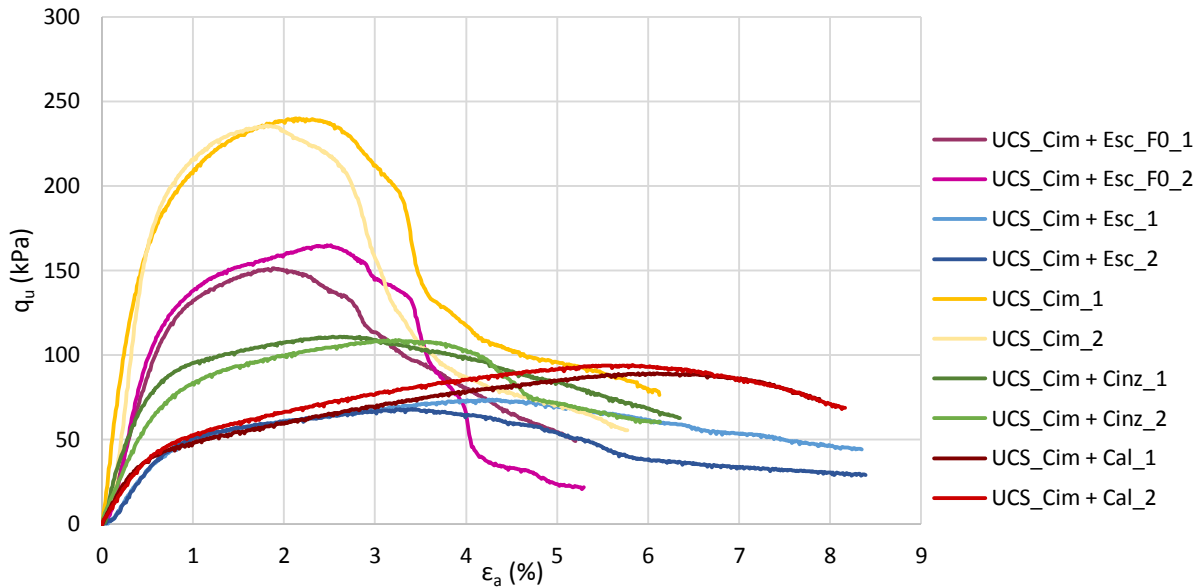


Figura 3 – Curvas tensão-extensão de ensaios UCS realizados sobre provetes com fibras *Dramix* com variação da composição do ligante (dosagem de ligante = 175 kg/m<sup>3</sup>)

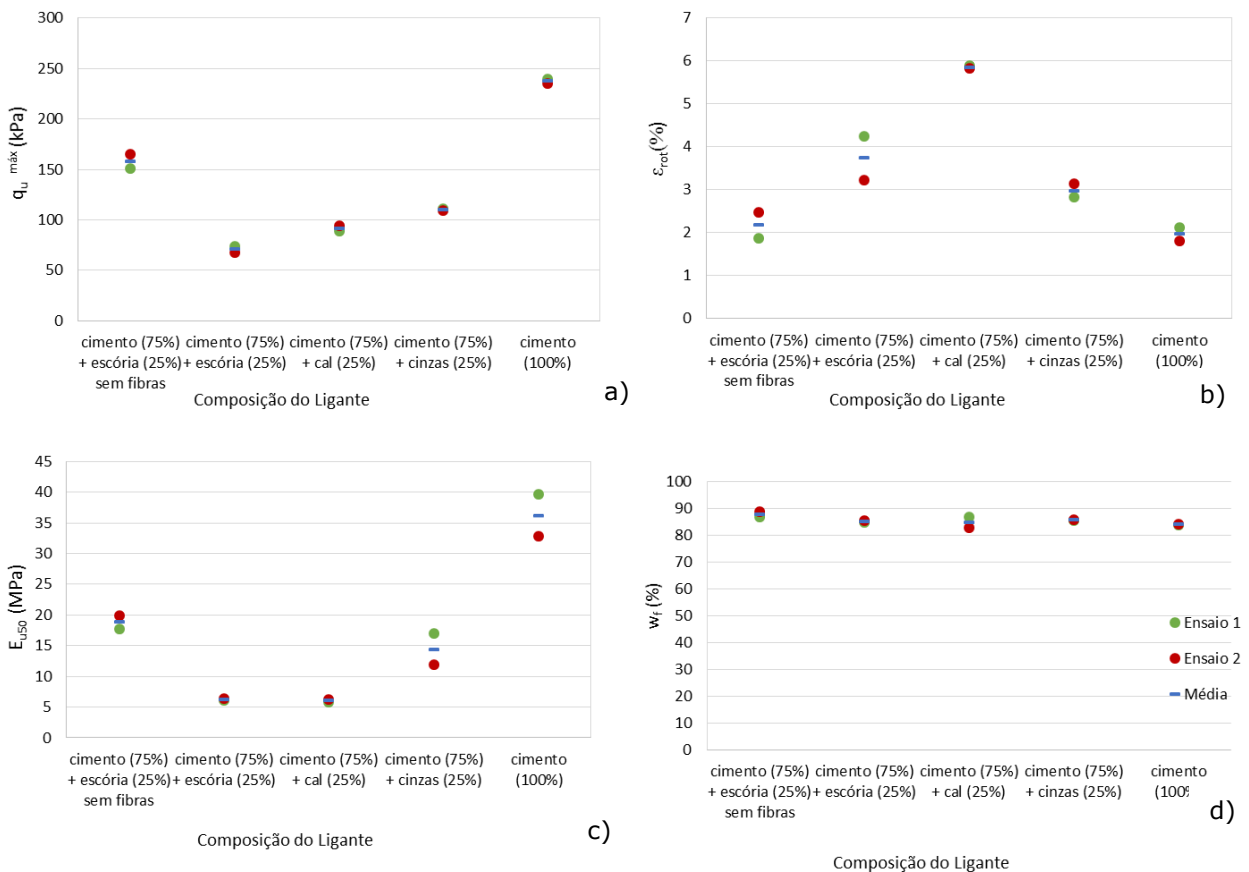


Figura 4 – Ensaios UCS realizados sobre provetes com a dosagem de ligante de 175kg/m<sup>3</sup> e dosagem de fibras *Dramix* de 30kg/m<sup>3</sup> para várias composições de ligante - análise da evolução de: a)  $q_u^{máx}$ ; b)  $\epsilon_a$ ; c)  $E_{u50}$ ; d)  $w_f$

### 3.2 – Influência da composição de ligante – ensaios CD

As Figuras 5 e 6 exibem os resultados obtidos em ensaios de compressão diametral realizados sobre provetes com dosagem de fibras *Dramix* de 0 e 30kg/m<sup>3</sup> e dosagem de ligante de 175kg/m<sup>3</sup> em que a composição de ligante varia.

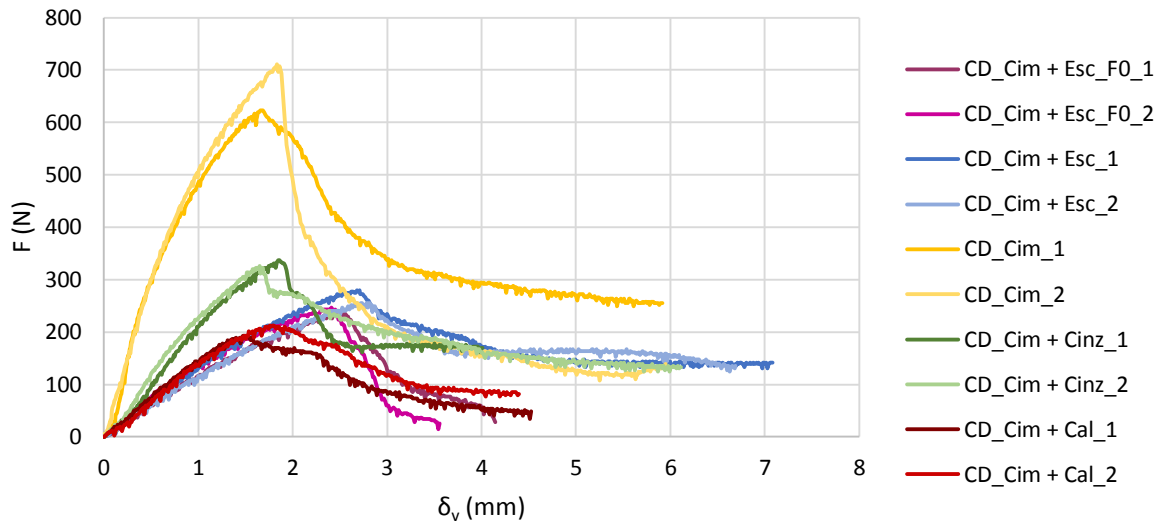


Figura 5 – Curvas força-deslocamento vertical de ensaios CD realizados sobre provetes com fibras *Dramix* (30kg/m<sup>3</sup>) com variação da composição do ligante (dosagem de ligante = 175 kg/m<sup>3</sup>)

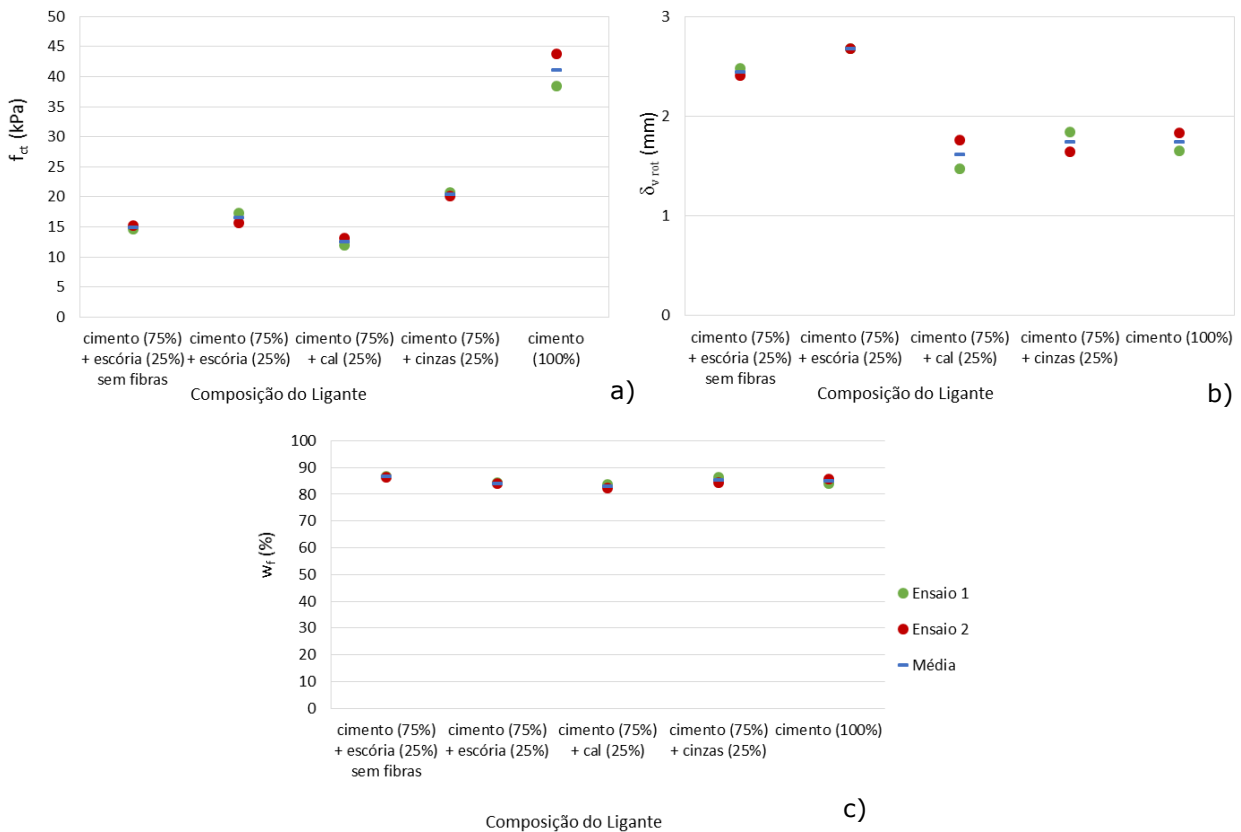


Figura 6 – Ensaios CD realizados sobre provetes com a dosagem de ligante de 175kg/m<sup>3</sup> e dosagem de fibras *Dramix* de 30kg/m<sup>3</sup> para várias composições de ligante - análise da evolução de: a)  $f_{ct}$ ; b)  $\epsilon_a$ ; c)  $w_f$

Os resultados dos provetes estabilizados com cimento e escórias, permitem constatar que o efeito da introdução de fibras origina um ligeiro aumento da resistência à tração, ou seja, tem efeito contrário ao observado em provetes sujeitos a ensaios UCS.

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 qualquer dos casos (Figura 6a). 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 (Figura 6b). A variação da composição de ligante não altera de forma significativa o teor em água final dos provetes (Figura 6c).

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 maior rigidez e resistência à compressão e à tração, com a vantagem adicional de se estar a usar um subproduto industrial.

### 3.3 – Relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão

Na Figura 7 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 (NP EN 1992-1-1, 2010) para o betão sem fibras de classes de resistência inferiores a C50/60.

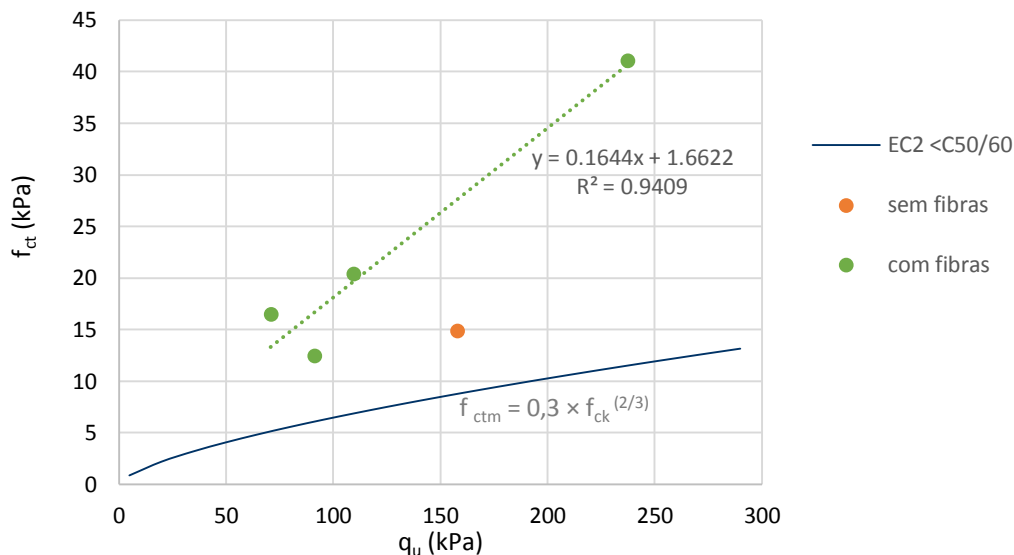


Figura 7 – Relação entre a resistência à tração por compressão diametral e à compressão simples

Da análise da Figura 7 verifica-se existir uma tendência aproximadamente linear definida pela relação entre as resistências à tração e à compressão nos provetes reforçados com fibras. Constata-se que os provetes exibem uma relação  $f_{ct}/q_u$  caracterizada por um declive bastante superior ao preconizado para o betão, para os níveis de tensão apresentados.

No Quadro 3 é apresentada a razão entre as resistências à tração ( $f_{ct}$ ) e à compressão ( $q_u$ ). Comparando o efeito da adição de fibras nos provetes estabilizados com cimento e escórias, constata-se que a relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão aumenta significativamente com a adição de fibras (varia de 10,5% para 23%), o que vem comprovar o efeito benéfico do reforço na resistência à tração. Da análise global dos resultados dos materiais reforçados com fibras metálicas, verifica-se que a relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão varia entre 14% e 23%, não se registando nenhuma relação bem definida entre  $f_{ct}^{méd}/q_u^{méd}$  e a composição de ligante.

Quadro 3 – Quociente entre a resistência à tração e à compressão

| Fibras      | Dosagem de Fibras (kg/m³) | Dosagem de Ligante (kg/m³) | Composição do Ligante | $f_{ct}^{méd}/q_u^{méd}$ |
|-------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Sem fibras  | 0                         | 175                        | Cimento + Escória     | 10,5%                    |
| Dramix 30mm | 30                        | 175                        | Cimento + Escória     | 23%                      |
|             |                           |                            | Cimento               | 17%                      |
|             |                           |                            | Cimento + Cinzas      | 19%                      |
|             |                           |                            | Cimento + Cal         | 14%                      |

## 4 - CONCLUSÕES

Este trabalho visou 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.

Nos provetes estabilizados com cimento e escórias, constata-se que a adição de fibras aumenta a resistência à tração e a ductilidade do material, e em contraponto tem um efeito negativo na resistência à compressão e na rigidez do solo estabilizado.

Os resultados obtidos para dosagens de ligante de 175 kg/m<sup>3</sup> e de fibras metálicas de 30 kg/m<sup>3</sup>, permitiram concluir que 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.

Constata-se que o declive da relação entre a resistência à tração e à compressão que os provetes exibem é superior ao apresentado pelo betão, aumentando significativamente com a adição de fibras. Nos provetes reforçados, verifica-se ainda que a resistência à tração varia entre 14% e 23% da resistência à compressão.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar os seus agradecimentos à CIMPOR e à BEKAERT pelo fornecimento dos ligantes e das fibras, respetivamente, e às instituições que suportaram financeiramente esta investigação: FCT (PTDC/ECM/101875/2008), ISISE (UID/ECI/04029/2013), CIEPQP e ACIV.

## REFERÊNCIAS

- Antunes, V.S.F. (2014). Estabilização química do solo mole do Baixo Mondego com incorporação de fibras metálicas. Dissertação de Mestrado, Dep. de Eng<sup>a</sup> Civil da FCTUC, Coimbra, Portugal.
- ASTM D 2487 (1998). *Standard classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)*. West Conshohocken, PA.
- 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<sup>a</sup> Civil da FCTUC, Coimbra, Portugal.
- Correia, A.A.S. (2011). Aplicabilidade da técnica de Deep Mixing aos solos moles do Baixo Mondego. Dissertação de Doutoramento, Dep. de Eng<sup>a</sup> Civil da FCTUC, Coimbra, Portugal.
- Correia, A.A.S., Venda Oliveira, P.J., Custódio, D.G. (2015). Effect of polypropylene fibres on the compressive and tensile strength of a soft soil, artificially stabilised with binders. *Geotextiles and Geomembranes*, 43(2): 97-106.
- Dramix (2012). BEKAERT Dramix RB305. Ficha do produto.
- Güllü, H. e Khudir A. (2014). Effect of freeze-thaw cycles on unconfined compressive strength of fine-grained soil treated with jute fibre, steel fibre and lime. *Cold Regions Science and Technology*, 106-107: 55-65.
- NP EN 12390-3 (2011). *Ensaios do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão de provetes*. IPQ.
- NP EN 12390-6 (2011). *Ensaios 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.
- 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.
- Sukontasukkul, P. e Jamsawang, P. (2012). Use of steel and polypropylene fibres to improve flexural performance of deep soil-cement column. *Construction and Building Materials*, 29(1): 201-205.
- Venda Oliveira, P.J., Correia, A.A.S., Teles, J.M.N.P.C. and Custódio, D.G. (2015). Effect of fibre type on the compressive and tensile strength of a soft soil chemically stabilised. *Geosynthetics International*. [<http://dx.doi.org/10.1680/jgein.15.00040>]