

## ESTUDO DE MISTURAS DE SOLO LIGADO COM CIMENTO COM DIFERENTES TEORES EM ÁGUA E O MESMO PESO VOLÚMICO SECO

### STUDY OF CEMENT BOUND SOIL MIXTURES WITH DIFFERENT WATER CONTENTS AND THE SAME DRY UNIT WEIGHT

Couto, André, *FCT-UNL, Caparica, Portugal, afc.couto@campus.fct.unl.pt*  
Santana, Teresa, *FCT-UNL, Caparica, Portugal, mtgs@fct.unl.pt*

#### RESUMO

No presente trabalho são estudadas misturas de solo ligado com cimento, com diferentes teores em água e com o mesmo peso volúmico seco. É analisada a influência de parâmetros, tais como o teor em cimento, o teor em água e a relação volume de vazios/volume de cimento, nas propriedades mecânicas deste tipo de misturas. Os provetes foram ensaiados à resistência à compressão simples verificando-se que os resultados obtidos são correlacionáveis com a razão entre a porosidade e o índice volumétrico de cimento,  $n/C_{iv}$ , parâmetro já utilizado por outros autores. Com base na análise dos resultados obtidos, é possível propor um método de dosagem do solo ligado com cimento a adotar no campo, com base em ensaios de compactação do solo utilizado.

#### ABSTRACT

In the present work, mixtures of cement bound soil, with different water contents and the same dry density, are studied. The influence of parameters such as the cement content, the water content and the ratio voids volume/cement volume, on the mechanical properties of this type of mixtures, is analysed. The specimens were tested for uniaxial compressive strength, verifying that the results obtained can be correlated with the ratio between porosity and the volumetric cement index,  $n/C_{iv}$ , parameter already used by other authors. Based on this analysis, it is possible to propose a design procedure for cement bound soil to be adopted in the field, based on soil compaction tests.

#### 1. INTRODUÇÃO

Em geral, adicionar cimento a um solo melhora as suas propriedades mecânicas, além de manter o teor em água, aumentar a coesão entre partículas e diminuir a sua permeabilidade, resistindo aos agentes climáticos. Contudo, a forma como se projetam estes trabalhos é feita muitas vezes de forma predominantemente empírica, não havendo um método objetivo para o estabelecimento de dosagens dos componentes, ao contrário do que acontece com o betão, onde a relação água/cimento desempenha um papel fundamental na obtenção da resistência pretendida.

Muitos métodos de dosagem são demorados por ser necessário realizar uma grande quantidade de ensaios de forma a avaliar a percentagem de cimento adequada a obter determinada resistência à compressão simples ou o conjunto da resistência à tração, módulo de elasticidade. Por isso, têm existido tentativas de estabelecer novos métodos

com o intuito de reduzir o número de ensaios para encurtar o tempo de estudos e assim facilitar o processo de obtenção das dosagens.

Uma nova abordagem foi apresentada por Foppa (2005), que consiste na utilização de um parâmetro que relaciona a porosidade com o índice volumétrico de cimento,  $n/C_{iv}$ . Mais recentemente, Baldovino (2021) apresentou equações que relacionam a resistência à compressão com aquele parâmetro, evidenciando a importância da porosidade nas propriedades mecânicas das misturas de solo ligado com cimento. De outros autores que utilizaram este parâmetro, destacam-se Gonçalves (2016) e Matos (2017) que utilizaram o mesmo solo deste trabalho.

O presente trabalho pretende aprofundar a análise daquele parâmetro no estabelecimento de dosagens. Para o efeito, o solo é utilizado em percentagens de cimento de 4%, 6% e 10%, relativamente ao peso do solo seco, mas, enquanto que os trabalhos anteriores utilizaram o mesmo teor em água de compactação, variando o peso volúmico seco de todas as misturas, este trabalho propõe-se variar o teor em água e manter constante o peso volúmico das misturas.

De realçar ainda que o material estudado neste trabalho é designado por solo ligado com cimento, segundo a norma NP EN 14 227-10 (2013).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Solo

O solo utilizado para este estudo foi recolhido na localidade de Capuchos, freguesia de Caparica e Trafaria, no concelho de Almada. A Figura 1 representa a sua localização geográfica. Os terrenos de onde foram retirados os solos estendem-se entre a autoestrada A2 e a Costa de Caparica ao longo de grande parte da superfície planáltica das colinas de Almada e, a partir daí, ocupam a encosta que desce sobre a via rápida IC 20. Toda esta área apresenta uma morfologia suave, favorecida pela estrutura das camadas miocénicas inclinando  $5^\circ$  a  $8^\circ$  para SSE, o que a torna particularmente atrativa para a construção.

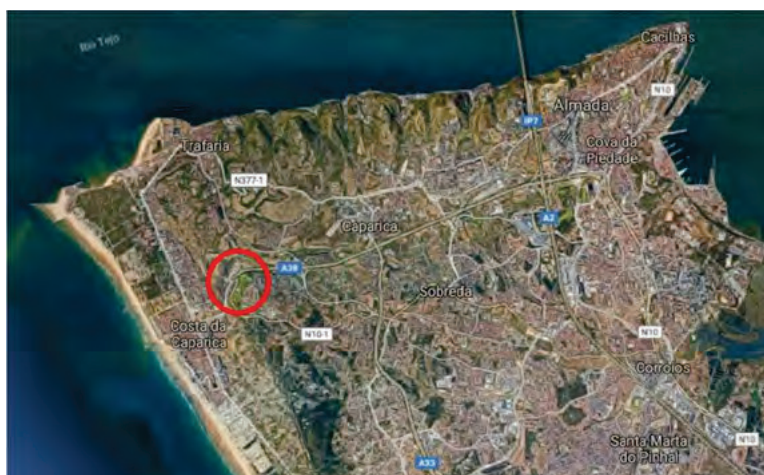


Figura 1 - Localização geográfica do solo

O solo recolhido apresentava um teor em água natural médio de 29,5%, pelo que foi necessário secá-lo ao ar para desagregação e posterior peneiração da qual se obteve a curva granulométrica apresentada na Figura 2.

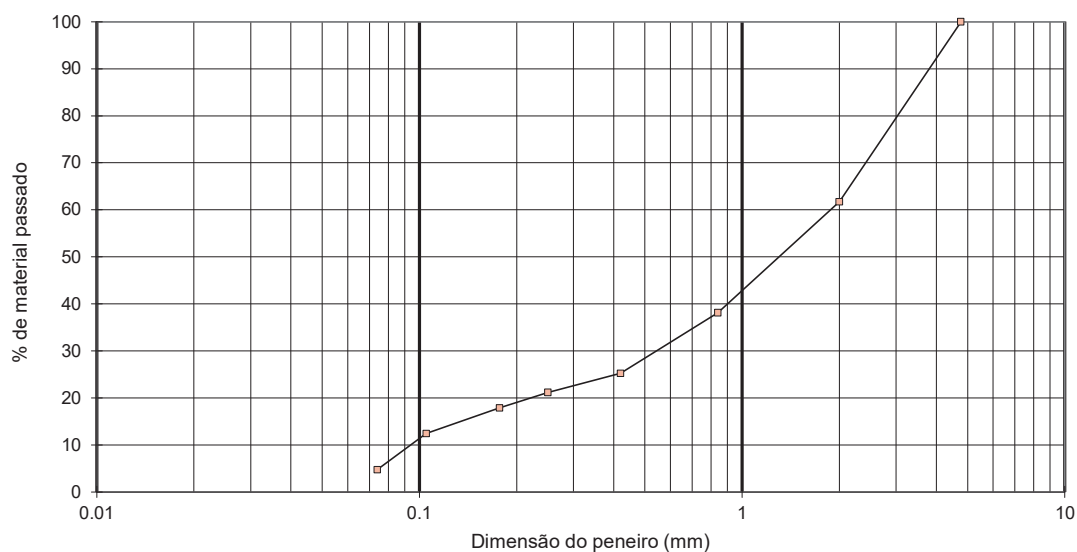


Figura 2 - Curva granulométrica do solo

No Quadro 1 são apresentadas as propriedades físicas do solo e as suas classificações unificada e para fins rodoviários AASHTO, em que  $\gamma_s$  é o peso volúmico das partículas sólidas do solo.

Quadro 1 – Classificação do solo e propriedades físicas		
Propriedade	Solo	Norma
Classificação Unificada	SW	ASTM D 2487
Classificação AASHTO	A-1-b	-
Limite de Liquidez	NP	NP-143
Limite de Plasticidade	-	NP-143
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	26,4	

## 2.2. Cimento

O cimento utilizado é um cimento Portland de calcário CEM II/B-L 32,5N, tipo II, NP EN 197-1 (2012). As suas características, tais como a trabalhabilidade e baixo calor de hidratação, tornam-no adequado para trabalhos correntes de civil. É um cimento de cor cinzenta, muito fino, com 100 % das partículas menores que 0,074 mm e tem um peso volúmico das partículas,  $\gamma_c$ , de 3,15 kN/m<sup>3</sup>. A ficha técnica deste cimento refere ainda um tempo de presa de 75 min.

## 2.3. Água

A água utilizada foi a da rede pública, assumindo-se que as disposições legais foram cumpridas.

## 3. PREPARAÇÃO DOS PROVETES

### 3.1. Compactação Proctor e pontos de moldagem

Neste trabalho foram adotadas misturas de solo ligado com cimento com 4, 6 e 10 % de cimento. Para a sua caracterização, foi necessário realizar ensaios de compactação Proctor Modificado, manual, sobre o solo e sobre cada mistura, para determinar os

teores em água ótimos e os pesos volúmicos secos máximos. A quantidade de cimento, a adicionar a cada mistura, foi calculada em relação ao peso seco do solo. Determinadas as quantidades destes constituintes, o restante procedimento foi realizado segundo a especificação do LNEC E 197-1966. Para a mistura de solo ligado com cimento, o tempo que demorou a preparar cada provete, mistura com água e compactação, foi sempre inferior a 1 hora, tempo inferior ao princípio de presa.

Das curvas de compactação obtidas para o material solo e para o solo ligado com as diferentes percentagens de cimento, representadas na Figura 3, obtiveram-se os resultados indicados no Quadro 2.

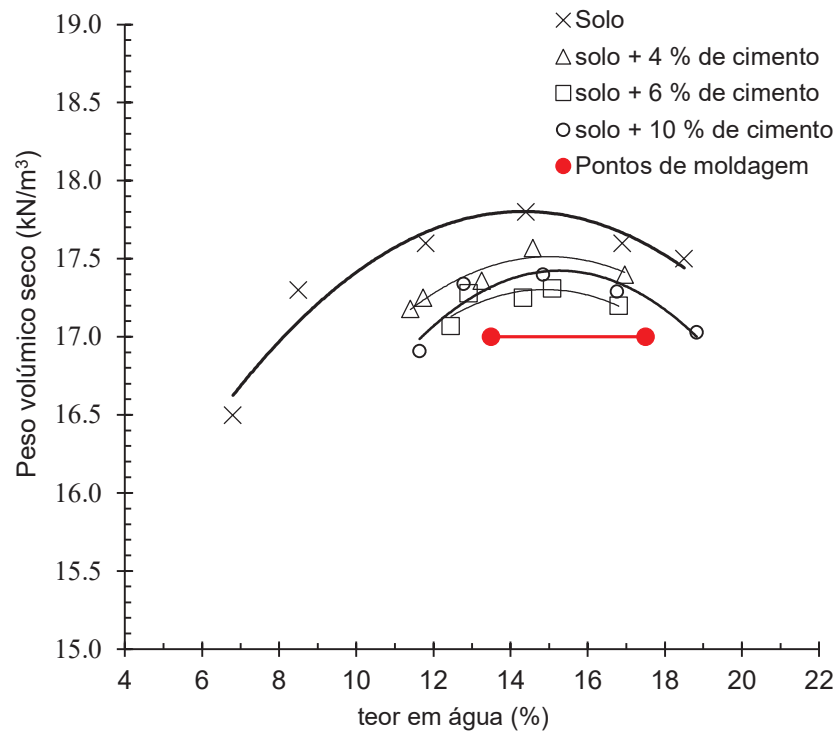


Figura 3 – Curvas Proctor Modificado. Localização dos pontos de moldagem

Quadro 2 – Valores de  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  e de  $w_{opt}$  dos materiais

Material	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w_{opt}$ (%)
Solo	17,8	14,5
Solo+4% cimento	17,5	15,0
Solo+6% cimento	17,3	16,0
Solo+10% cimento	17,4	15,5

Como anteriormente referido, nesta análise pretendeu-se fixar o peso volúmico seco e fazer variar o teor em água. Optou-se por escolher pontos de moldagem entre  $\pm 2\%$  do valor do teor em água ótimo, o que é normalmente preconizado em obra. Em face dos resultados obtidos, considerou-se um teor em água ótimo médio de 15,5% para as três misturas, donde resultam dois pontos de moldagem, um com um teor em água de 13,5% e outro com 17,5%. Em relação ao peso volúmico seco, optou-se por definir aquele que corresponde a cerca de 95% do peso volúmico seco máximo, ou seja  $\gamma_d = 17$  kN/m<sup>3</sup>. Estes pontos estão representados na Figura 3, com os valores respetivos referidos no Quadro 3.

Material	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)
Solo+4% cimento	17,0	13,5
		17,5
Solo+6% cimento	17,0	13,5
		17,5
Solo+10% cimento	17,0	13,5
		17,5

Foram ainda determinados os graus de saturação dos pontos de moldagem: para 13,5% o grau de saturação resultante é de 64,0% e para 17,5% o grau de saturação é de 83,0%.

## 3.2. Compactador Marshall

### 3.2.1. Descrição

Dada a elevada quantidade de ensaios de compactação a efetuar para a moldagem dos provetes, decidiu-se pela utilização do compactador Marshall, existente no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, apresentado na Figura 4.



Figura 4 - Compactador Marshall (esquerda) e respetivo martelo de compactação (direita)

De notar, no entanto, que a compactação com recurso ao compactador Marshall tem um ritmo de aplicação das pancadas diferente, assim como a área que entra em contacto com o solo colocado dentro do molde: no caso da compactação manual, o pilão tem 50 mm de diâmetro e as suas pancadas têm que ser distribuídas pela área total do provete; no caso do compactador Marshall, este é deixado cair e entra em contacto com o solo numa área definida pela quase totalidade da área do provete.

### 3.2.2. Compactação

Como o peso volúmico seco,  $\gamma_d$ , é fixo para todas as misturas, a energia de compactação será variável de modo a obter  $\gamma_d = 17 \text{ kN/m}^3$  para os diferentes teores em água requeridos. Assim, pôde ser utilizado o compactador Marshall pondo-o a funcionar até obter o  $\gamma_d$  desejado.

Para um molde de dimensões conhecidas tem-se o peso total da mistura pretendida a colocar no molde. De modo a distribuir a energia de compactação o mais possível por todo o provete, foram utilizadas para a compactação no interior do molde 5 camadas

com a mesma altura. O procedimento passou por colocar 1/5 do peso de mistura estipulada para cada camada no molde, de 117 mm de altura e 102 mm de diâmetro, levá-lo ao compactador mecânico Marshall e compactar a mistura até que a altura de cada camada fosse de 1/5 da altura, 23,4 mm. Entre camadas, a superfície de cada camada foi ligeiramente escarificada para favorecer a adesão entre camadas. No fim da última camada compactada a superfície estava ao nível da altura do molde

### 3.2.3. Dosagem dos componentes

Conhecidos  $\gamma_d$  e  $w$  pretendidos para cada mistura final, as dosagens dos componentes para moldar cada provete são calculadas do modo descrito a seguir.

Para cada provete, a massa seca da mistura,  $W_s$ , é dada por:

$$W_s = W_{cimento} + W_{solo,seco} = C \times W_{solo,seco} + W_{solo,seco} = W_{solo,seco}(1 + C) \quad [1]$$

em que  $C$  é a percentagem de cimento na mistura (0,04; 0,06 ou 0,1).

Tem-se assim que a massa de solo seco,  $W_{solo,seco}$ , é dada por:

$$W_{solo,seco} = \frac{\gamma_d \times V}{1 + C} \quad [2]$$

em que  $V$  é o volume total do molde e  $\gamma_d$  é o peso volúmico seco da mistura.

A mistura deve conter uma massa de água dada por:

$$W_{água} = \omega \times (W_{solo,seco} + W_{cimento}) \quad [3]$$

em que  $w$  é o teor em água da mistura.

Tendo em conta as dimensões do molde referidas anteriormente, as quantidades de solo, cimento e água são calculadas para cada provete, a partir das expressões anteriores. Os resultados dos cálculos efetuados podem ser consultados em Couto, A. (2018).

### 3.3. Provetes para a caracterização mecânica

No final da compactação referida em 3.2.2, os provetes foram retirados do molde com o auxílio do extrator de provete, um macaco hidráulico. Em seguida, os provetes foram imediatamente colocados em sacos de plástico, para evitar variações significativas do teor em água, selados, identificados e armazenados numa sala com condições térmicas controladas,  $20^\circ \text{C} \pm 2^\circ \text{C}$  e com humidade relativa de 43 %, durante 7 dias.

Ao fim desse período, os provetes foram pesados e medidos com o auxílio de um paquímetro. Foram tiradas 6 medidas do diâmetro e 6 medidas da altura e com a média desses valores foi calculado o novo volume do provete pois, devido à retração durante a cura, existem variações nas dimensões.

## 4. ENSAIOS DE COMPRESSÃO UNIAXIAL

Para os ensaios de compressão uniaxial foi utilizada a prensa Zwick DEC da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. A resistência à compressão

simples do solo ligado com cimento foi determinada em conformidade com a norma NP EN 13286-41 (2011). Os provetes foram retificados e foi utilizada uma velocidade de 3 mm/min. A resistência à compressão,  $R_c$ , deve ser a média dos resultados obtidos em três provetes. Se algum desses valores tiver um desvio superior a 20% em relação ao valor médio, esse valor deve ser ignorado e a resistência à compressão passará a ser a média dos outros dois valores.

Após os provetes terem sido ensaiados à resistência à compressão simples, foram retiradas amostras do provete de forma a determinar o teor em água e calcular os pesos volúnicos secos respetivos, tendo em conta as medições efetuadas antes do ensaio, referidas anteriormente (final da cura). Todos os valores cumpriram os seguintes requisitos: peso volúmico seco,  $\gamma_d \pm 1\%$  e teor em água  $w \pm 0,5\%$ .

## 5. ANÁLISE DE RESULTADOS

### 5.1. Percentagem de cimento

A resistência à compressão de cada mistura,  $R_c$ , em função da percentagem de cimento, é apresentada na Figura 5, em que os pontos com o mesmo teor em água foram ajustados com uma linha de tendência.

Os valores obtidos em todos os provetes de solo ligado com cimento testados cumprem as recomendações da Estradas de Portugal que estipulam que a resistência à compressão deste tipo de misturas deve ser superior a 1MPa. Verifica-se também que a resistência à compressão é mais elevada nos provetes compactados do lado seco, para todas as percentagens de cimento. Neste caso, verificou-se ainda que os valores de resistência estão um pouco mais afastados da curva, indo ao encontro de Nusit et al. (2017) que afirmam que a força de compressão uniaxial dos provetes moldados no lado seco não é determinada com precisão devido a complexos processos físico-químicos entre a água, o cimento e o solo.

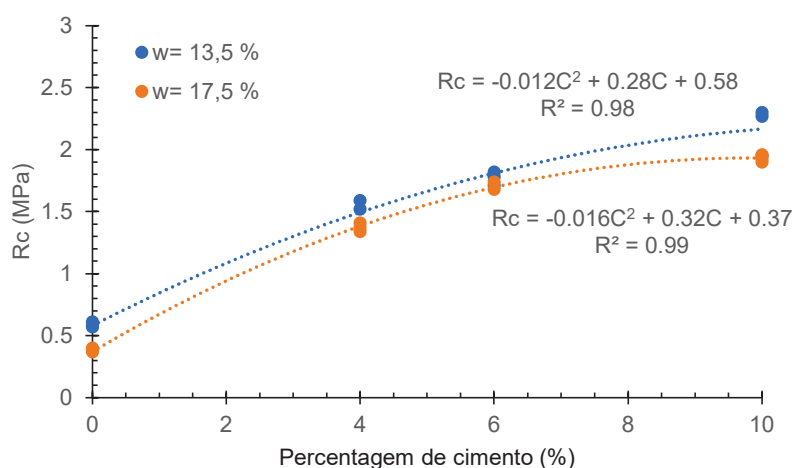


Figura 5 -  $R_c$  em função da percentagem de cimento

O gráfico apresentado permite a obtenção da dosagem de cimento necessária para uma determinada resistência pretendida, mas apenas se as misturas apresentarem no terreno as características de compactação descritas.

### 5.2. Relação entre a porosidade e o índice volumétrico de cimento

O índice volumétrico de cimento,  $C_{iv}$ , (Consoli, 2017; Rios et al, 2013) é definido como a razão entre o volume de cimento e o volume total,  $V_{cimento}/V$ :

$$C_{iv} = \frac{V_{cimento}}{V} = \frac{W_{cimento}}{V \cdot \gamma_c} = \frac{C \cdot W_{solo,seco}}{V \cdot \gamma_c} \quad [4]$$

Substituindo a equação [2] em [4], vem:

$$C_{iv} = \frac{\gamma_d \cdot C}{\gamma_c(1+C)} \quad [5]$$

Por outro lado, a porosidade,  $n$ , é dada por:

$$n = 1 - \frac{\gamma_c}{1+C} \left( \frac{1}{\gamma_s} + \frac{C}{\gamma_c} \right) \quad [6]$$

A relação entre a porosidade e o índice volumétrico do cimento resulta no parâmetro  $n/C_{iv}$ . Este parâmetro foi calculado para todos os provetes de solo ligado com cimento ensaiados, com base nas expressões [5] e [6]. O gráfico da Figura 6 representa a variação da resistência à compressão,  $R_c$ , com o parâmetro  $n/C_{iv}$ . Foi ajustada a curva indicada a todos os valores, obtendo-se para o ajuste um valor de  $R=0,81$ .

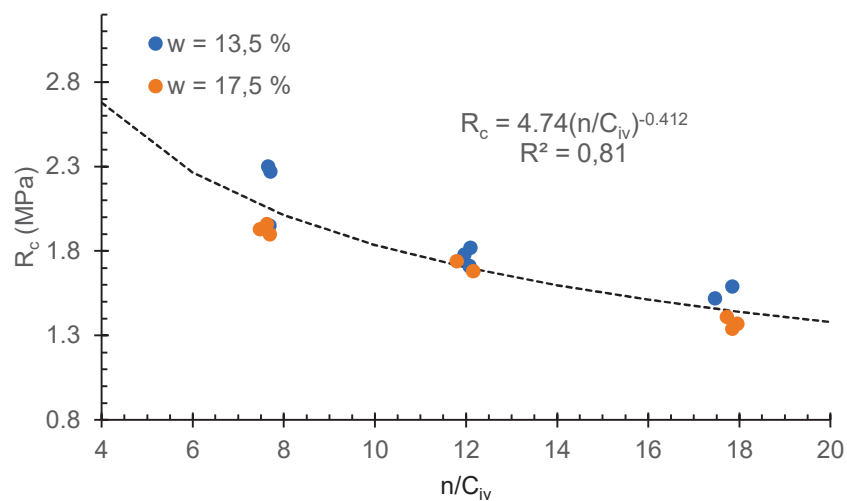


Figura 6 – Efeito do parâmetro  $n/C_{iv}$  na resistência à compressão.

O parâmetro  $n/C_{iv}$  permite a determinação de diferentes dosagens de cimento, quando se pretende utilizar o solo analisado, se forem observadas determinadas condições de compactação, como descrito a seguir.

Atribuindo valores ao parâmetro  $n/C_{iv}$ , neste caso valores entre 8 e 18, obtém-se por minimização de erro, diferentes combinações do peso volúmico seco e de percentagens de cimento que verificam o valor de  $n/C_{iv}$  introduzido. Obteve-se assim a Figura 7, a partir da qual é possível prever a energia de compactação necessária (peso volúmico seco) para diferentes percentagens de cimento, de modo a obter o valor de resistência à compressão pretendido. Por exemplo, se se pretender uma resistência à compressão



de 1,6 MPa, o valor de  $n/C_{iv}$  correspondente é de 14 (Figura 6). Consultando a Figura 7, verifica-se que, para o valor de  $n/C_{iv}=14$  existem várias combinações de peso volúmico seco e percentagens de cimento que se enquadram no requisito.

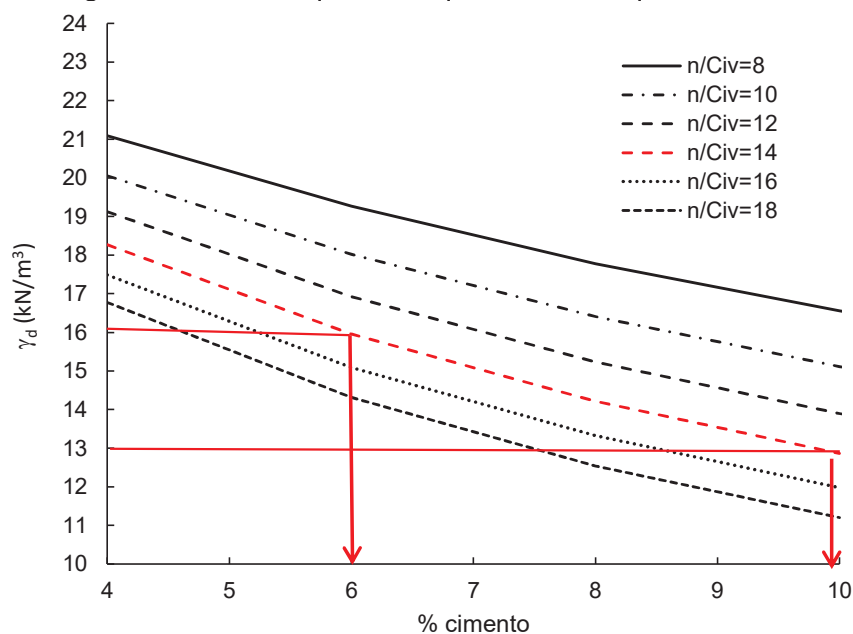


Figura 7 - Estabelecimento de dosagens

Por exemplo, para as dosagens de cimento do presente trabalho, tem-se que, para obter 1,6 MPa de resistência à compressão, teriam que ser utilizadas energias de compactação correspondentes a  $\gamma_d = 18,2 \text{ kN/m}^3$  para 4 % de cimento,  $\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$  para 6 % e  $\gamma_d = 13 \text{ kN/m}^3$  para 10 %. Para obter estes valores deverá ser encontrada a energia de compactação e o teor em água adequados para a compactação do material. Em face dos valores obtidos na curva de compactação para este solo (Figura 3), o valor de  $\gamma_d = 13 \text{ kN/m}^3$ , porque bastante baixo, indica que 10 % é uma dosagem de cimento inadequada para a utilização em obra deste solo ligado com cimento.

No entanto, como ficou comprovado neste trabalho, os valores de resistência à compressão são diferentes para um mesmo peso volúmico seco, consoante o teor em água de compactação. Assim, reforça-se a necessidade do estudo da compactação do solo utilizado e da dosagem de cimento selecionada, com a realização de ensaios para se poder adotar o teor em água de compactação adequado ao desempenho da obra, ou seja, selecionar o lado seco ou o lado húmido na curva de compactação.

## 6. CONCLUSÕES

O estudo da viabilidade do índice volumétrico de cimento proposto por outros autores foi analisado neste trabalho, para misturas de solo ligado com cimento com o mesmo peso volúmico seco, mas com diferentes teores em água iniciais, um situado no lado seco da curva de compactação e outro situado no lado húmido. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples de provetes ensaiados aos 7 dias de cura mostraram que a resistência à compressão é mais elevada nos provetes compactados do lado seco, tendo sido possível correlacionar a resistência à compressão com o parâmetro  $n/C_{iv}$ . No entanto, os resultados obtidos dependem do tipo de solo utilizado, não sendo aplicável a outros tipos de solos.

Foram analisados métodos de dosagens, tendo sido sugerido um gráfico que complementa a forma de dosagem utilizando o parâmetro  $n/C_{iv}$  de modo a facilitar a leitura e determinação das quantidades de cimento necessárias a determinados requisitos de resistência à compressão. O gráfico permite obter diferentes combinações de pesos volúmicos secos e de dosagens de cimento, tendo em conta as especificidades de cada obra e dos equipamentos disponíveis. Após a seleção das grandezas anteriores é necessário realizar um ensaio de compactação com a mistura da obra de modo a obter o teor em água de compactação.

## AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao técnico de laboratório Jorge Silvério e ao técnico superior Vítor Silva toda a colaboração na parte experimental deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- Baldovino, J., Moreira, E., Carazzai, É., Rocha, E., Izzo, R., Mazer, W. e Rose, J. (2021). Equations Controlling the Strength of Sedimentary Silty Soil–Cement Blends: Influence of Voids/Cement Ratio and Types of Cement. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15, 359–372, doi:10.1080/19386362.2019.1612134.
- Consoli, N., Quiñónez, R., González, L. e López, R. (2017). Influence of Molding Moisture Content and Porosity/Cement Index on Stiffness, Strength, and Failure Envelopes of Artificially Cemented Fine-Grained Soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 134, 703-712. ISSN: 0899-1561, 1943-5533. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001819.
- Couto, A. (2018). Propriedades mecânicas de misturas de solo ligado com com diferentes teores em água. *Tese de mestrado*. FCT, Universidade NOVA de Lisboa.
- Foppa, D. (2005). Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados. *PhD Thesis*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Gonçalves, J. (2016). Estudo do teor em água e porosidade como parâmetros de controlo da resistência de misturas solo cimento. *Tese de Mestrado*. FCT, Universidade NOVA de Lisboa.
- Ikhlef, N.-S., Ghembaza M. e Dadouch, M. (2015). Effect of Treatment with Cement on the Mechanical Characteristics of Silt from Telagh Region of Sidi Belabes, Algeria. *Geotechnical and Geological Engineering* 33.4, pp. 1067–1079. ISSN: 0960-3182, 1573-1529. doi: 10.1007/s10706-015-9888-2.
- Matos, T. (2017). Estudo da influência do peso volúmico seco nas propriedades mecânicas de misturas de solo cimento compactadas com o mesmo teor em água. *Tese de Mestrado*. FCT, Universidade NOVA de Lisboa.
- NP EN 13286-41 (2011) Métodos de ensaio para a determinação da resistência à compressão de misturas tratadas com ligantes hidráulicos, *IPQ*.
- NP EN 14227-10 (2013) Misturas tratadas com ligantes hidráulicos. Parte 10: Solo tratado com cimento, *IPQ*.
- Nusit, K., P. Jitsangiam, J. Kodikara, H. H. Bui e G. L. M. Leung (2017). Advanced Characteristics of Cement-Treated Materials with respect to Strength Performance and Damage Evolution. *Journal of Materials in Civil Engineering* 29.4, p. 04016255. ISSN: 0899-1561, 1943-5533. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001772.
- Rios, S., A. Viana da Fonseca, Consoli, N., Floss, M. e Cristelo, N. (2013). "Influence of grain size and mineralogy on the porosity/cement ratio. *Géotechnique Letters* 3.3, pp. 130–136 ISSN: 2045-2543. doi: 10.1680/geolett.13.00003.