

INFLUÊNCIA DA VARIABILIDADE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DA AREIA DE COIMBRA NA SUA PERMEABILIDADE

INFLUENCE OF THE VARIABILITY OF COIMBRA SAND INDEX PROPERTIES ON ITS PERMEABILITY

Araújo Santos, Luis M.; *Inst. Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, Portugal, lmsantos@isec.pt*
Coelho, Paulo A. L. F.; *Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, pac@uc.pt*
Taborda, David M. G.; *Imperial College London, Londres, Reino Unido, d.taborda@imperial.ac.uk*

RESUMO

A areia de Coimbra é um solo de referência nacional no estudo do comportamento de solos granulares tanto em condições drenadas como não drenadas. Os resultados mais recentemente publicados (2014 em diante) incidem sobre uma areia recolhida junto à foz do Rio Mondego, sensivelmente 40 km a jusante do local de recolha original (Quinta da Portela, Coimbra). Estudos de caracterização da areia de Coimbra nos dois locais revelam diferenças na sua composição mineralógica assim como na morfologia das suas partículas constituintes. Nesta comunicação, infere-se acerca da influência das diferenças identificadas consoante o local de recolha na permeabilidade da areia de Coimbra. Adicionalmente, faz-se um resumo das principais expressões semiempíricas usadas na estimativa do coeficiente de permeabilidade, concluindo-se acerca da sua aplicabilidade na previsão deste parâmetro da areia de Coimbra.

ABSTRACT

Coimbra sand is a Portuguese reference soil used in national and international studies on the behaviour of granular soils, both under drained and undrained conditions. The more recent publications (2014 onwards) are based on sand collected at a second soil sampling area, located nearly 40 km downstream from the first pit. Characterisation studies of Coimbra sand collected at both sampling areas reveal several differences in the mineralogical composition, as well as in particle shape. This paper investigates how these differences affect the permeability of Coimbra sand. Furthermore, after a brief summary of the main semi-empirical formulae used to estimate this quantity, some conclusions are presented concerning their ability to predict the permeability of Coimbra sand.

1 - INTRODUÇÃO

O estudo da areia de Coimbra iniciou-se em 2008 com o vasto programa de investigação que juntou a Universidade de Coimbra, o Instituto Superior Técnico e a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto com vista ao estudo de ferramentas para o dimensionamento baseado no desempenho em maciços suscetíveis à liquefação (Santos et al., 2012). Desde então, as principais conclusões dos diversos estudos têm vindo a ser publicados em vários trabalhos académicos, bem como em diversos artigos científicos. Até 2014, todos os estudos publicados incidiram sobre areia de Coimbra obtida de um único local de recolha, a Quinta da Portela em Coimbra. Da referida data em diante, têm vindo a ser publicados resultados de estudos efetuados com areia de Coimbra proveniente de um local de recolha mais a jusante, próximo da foz do Rio Mondego. Contudo, a distinção e a caracterização sistemática da areia de Coimbra proveniente dos dois locais de recolha apenas é abordada por Dias Santos (2015) e Araújo Santos (2015).

Embora os estudos anteriormente citados não tenham como principal objetivo a comparação das características geológicas e geotécnicas da areia de Coimbra resultante do tratamento das areias aluvionares recolhidas nos dois locais de amostragem, são abordados vários aspetos que podem, potencialmente, afetar o comportamento mecânico do solo em apreço. Como uma análise exaustiva de todas as características e seus potenciais efeitos não se enquadra no âmbito da presente comunicação, opta-se por analisar detalhadamente a influência nas propriedades hidráulicas da areia de Coimbra das diferenças mais relevantes observadas. Adicionalmente, é feita uma breve compilação e aplicação de expressões semiempíricas que permitem a determinação expedita do coeficiente de permeabilidade a partir da granulometria da areia de Coimbra ou outras grandezas básicas.

2 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MINERALÓGICA

A areia de Coimbra é uma areia artificial obtida através de um processo de lavagem e peneiração de um solo arenoso encontrado em depósitos aluvionares da era do Quaternário presentes na região de Coimbra e ao longo do Rio Mondego (Cunha, 2010). Como ilustra a Figura 1, estes depósitos aluvionares, que

podem ser encontrados essencialmente a jusante da Portela do Mondego, misturam-se na Figueira da Foz com areia de praia (LNEG, 1976). Segundo as informações constantes das cartas geológicas da região de Coimbra, verifica-se que não só o leito do Rio Mondego é composto unicamente por depósitos aluvionares, como também uma área ainda considerável da cidade de Coimbra, que compreende as áreas urbanas da Solum, da Casa Branca e do Alto de São João (LNEG, 2005). Segundo este organismo, as areias encontradas nestas áreas são denominadas de areias vermelhas do Estádio.

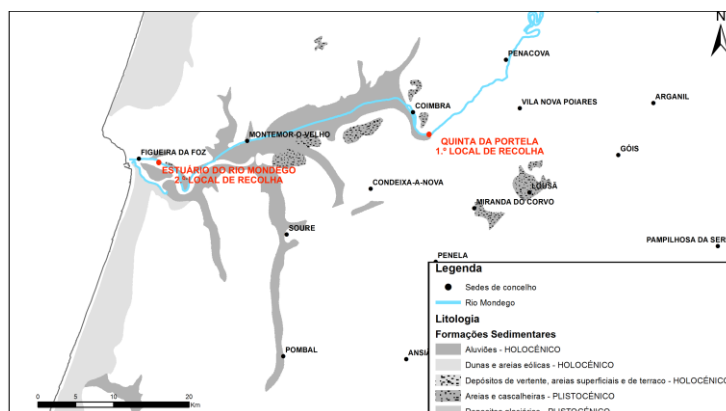


Figura 1 – Extrato da carta litológica de 1982 do Atlas do Ambiente junto ao Rio Mondego (Araújo Santos, 2015)

Na Figura 1 estão também identificadas as duas zonas de recolha das areias aluvionares que, após tratamento dão origem à areia de Coimbra. O primeiro local de recolha situa-se na Quinta da Portela, em Coimbra, enquanto o segundo local de recolha, o mais recente, está localizado perto do estuário do Rio Mondego na Figueira da Foz. Como nomenclatura alternativa, a identificação dos locais de proveniência da areia de Coimbra é doravante designada pelo acrónimo *aC*, sendo complementado pelos índices *m* e *j* para identificar os locais de recolha das areias aluvionares a montante (Quinta da Portela) e jusante (Figueira da Foz), respetivamente. A seleção da fração granulométrica segue a metodologia inicial apresentada por Santos (2009) com a inversão de fases proposta por Araújo Santos (2015) devido a questões de salubridade. Assim, o processo de peneiração, no qual são empregues os peneiros n.º 40 (#0,425 mm) e n.º 100 (#0,150 mm) da série ASTM, apenas ocorre após a lavagem e secagem da areia aluvionar, diminuindo-se a suspensão de finos no ar. A fração granulométrica retida entre os dois peneiros referenciados constitui a areia de Coimbra.

2.1 - Caracterização microscópica

A comparação direta da areia de Coimbra recolhida a montante e jusante do Rio Mondego revela tonalidades diferentes, sendo a areia de jusante mais escura que a de montante. Com recurso a microscopia ótica, conclui-se que as diferentes tonalidades resultam da variação da composição mineralógica dos depósitos aluvionares, e consequentemente da areia de Coimbra, ao longo do Rio Mondego. Observando a Figura 2, verifica-se que a areia de Coimbra recolhida mais a montante – ilustração b) – é essencialmente constituída por quartzo, mineralogia que lhe confere, portanto, uma tonalidade mais clara. Ensaio de difração de raios X confirmam que a composição mineralógica a montante e jusante é de facto diferente, sendo que uma semiquantificação rápida dos constituintes revela que, enquanto a montante 93% da areia de Coimbra é constituída por quartzo, a jusante este mineral representa unicamente 53%. Adicionalmente, este teste revela a presença de micas de moscovite unicamente na areia de Coimbra de jusante (Araújo Santos, 2015). Este autor fornece informações mais detalhadas sobre a constituição mineralógica e química da areia de Coimbra.

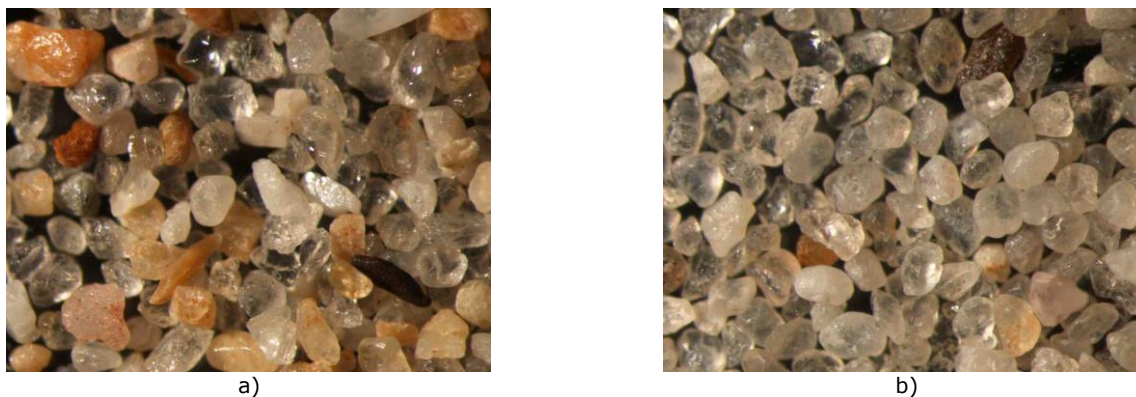


Figura 2 – Fotografias em microscópio ótico da areia de Coimbra recolhida a (Araújo Santos, 2015): a) jusante; b) montante

A caracterização microscópica da areia de Coimbra é complementada com a análise morfológica das partículas que a constituem por microscopia eletrônica de varrimento, tendo sido utilizadas ampliações de 35X, 75X, 150X e 200X. A análise pontual de partículas de areia sugere que as partículas recolhidas a jusante apresentam uma forma mais arredondada, como se pode observar na Figura 3. Esta conclusão é reforçada por um estudo exaustivo de sensivelmente duzentas partículas, recorrendo aos conceitos de esfericidade (*sphericity*) e circularidade (*roundness*). A esfericidade refere-se à forma global da partícula e reflete a similaridade entre o comprimento, a altura e a espessura da partícula, sendo determinada pela expressão [1]. A circularidade descreve a escala das principais características superficiais que são, normalmente, uma ordem de grandeza inferiores ao tamanho da partícula (Cho et al., 2006), sendo avaliada pela aplicação da expressão [2]. Na definição destas duas características é necessária a determinação dos raios mínimo e máximo das circunferências circunscritas ($r_{min-cir}$) e inscritas (r_{max-in}) em cada partícula, respetivamente. Adicionalmente todas as N saliências das partículas são examinadas, estimando-se o raio da circunferência que melhor se ajusta a cada singularidade da partícula (r_i).

$$esfericidade = \frac{r_{max-in}}{r_{min-cir}} \quad [1]$$

$$circularidade = \frac{\sum r_i / N}{r_{max-in}} \quad [2]$$

Desta análise resulta que a morfologia das partículas não difere muito consoante o local de recolha. De facto, as médias dos resultados referentes à esfericidade são idênticas, sendo que as partículas da areia recolhida a jusante apresentam maior circularidade, isto é, são menos angulares que as recolhidas mais a montante (Araújo Santos, 2015). Recorrendo à escala de Powers (1953) as partículas podem ser classificadas como arredondadas e subarredondadas consoante provenham, respetivamente, dos locais de recolha mais a jusante ou mais a montante no Rio Mondego. Note-se que a classificação aqui proposta para as partículas recolhidas na Quinta da Portela, em Coimbra, vem corroborar a classificação proposta por Azeiteiro et al. (2012).

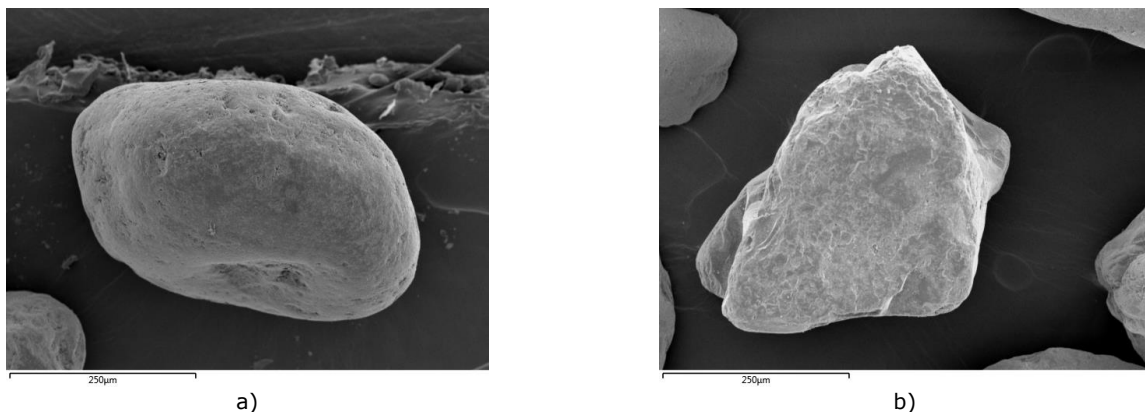


Figura 3 – Fotografias de microscopia eletrônica de grande ampliação (200X) de partículas da areia de Coimbra recolhida a (Araújo Santos, 2015): a) jusante; b) montante

2.2 - Caracterização macroscópica

Antes de caracterizar a fração granulométrica de referência, interessa verificar qual a variabilidade da granulometria dos depósitos aluvionares do leito do Rio Mondego. Da análise da Figura 4a pode concluir-se que, apesar da significativa distância que separa os locais de recolha, a granulometria, cuja obtenção seguiu os procedimentos preconizados na especificação E 196-1966 do LNEC, é essencialmente idêntica, principalmente na zona central das curvas da qual é retirada a fração que constitui a areia de Coimbra. Observando a Figura 4b, onde se ilustram as curvas granulométricas da areia de Coimbra obtida do tratamento do solo obtido nos dois locais de recolha, isto é, a fração de areia retida entre os peneiros n.º 40 (#0,425 mm) e o n.º 100 (#0,150 mm), verifica-se que, apesar das diferenças a nível microscópico anteriormente identificadas, a distribuição percentual em massa das partículas é semelhante. Aliás, as curvas granulométricas sobrepõem-se, sendo difícil distingui-las.

A areia de Coimbra é composta aproximadamente por 70% de partículas passadas no peneiro n.º 40 (#0,425 mm) e 30% de partículas passadas no peneiro 60 (#0,25 mm), como já fora identificado por Araújo Santos et al. (2012). A dimensão média das partículas (D_{50}) é 0,29 mm, valor que corrobora os resultados anteriormente propostos por Santos e Coelho (2010) e Araújo Santos et al. (2014) para a areia proveniente dos dois locais de recolha – montante e jusante, respetivamente. Quando ao diâmetro efetivo (D_{10}), da análise de ambas as curvas granulométricas, resulta um valor de 0,18 mm (Araújo Santos, 2015). Por fim, os coeficientes de uniformidade e de curvatura são, respetivamente, 1,78 e 1, resultados que confirmam a uniformidade da areia em estudo (Araújo Santos, 2015). A distribuição

granulométrica das partículas permite classificar a areia de Coimbra como sendo uma areia média que, segundo a classificação unificada (D 2487 – 06 da ASTM), pode designar-se de areia mal graduada (SP). Segundo a especificação E 240-1970 do LNEC, esta areia classifica-se como pertencendo ao grupo A-3 que agrega materiais como areia fina de praia ou de dunas bem como areias mal graduadas existentes em depósitos fluviais, e portanto, solo suscetível à liquefação.

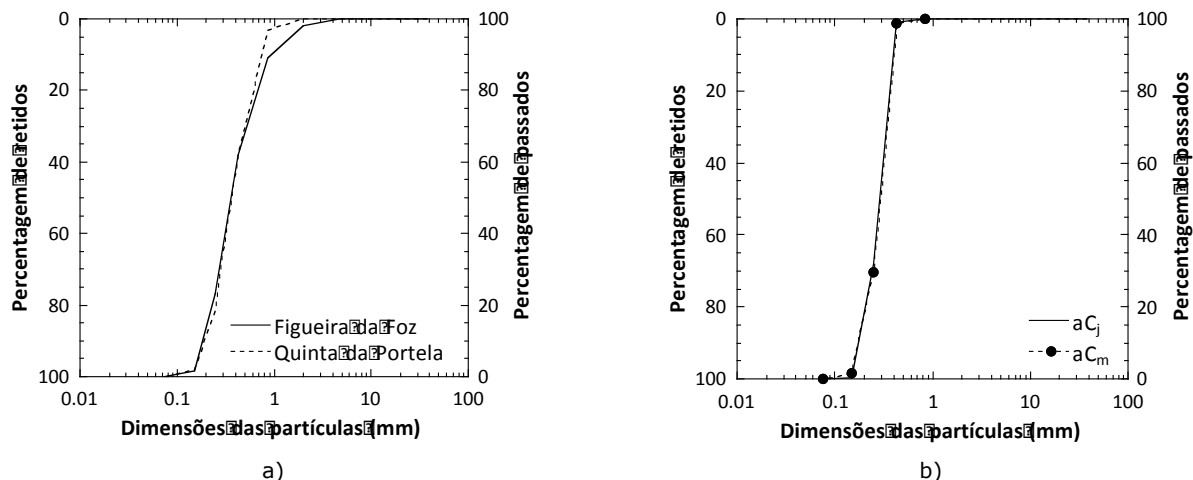


Figura 4 – Comparação de curvas granulométricas (adaptado de Araújo Santos, 2015): a) depósito aluvionar; b) areia de Coimbra

A caracterização física da areia de Coimbra envolveu ainda, logicamente, ensaios para a obtenção da densidade das partículas sólidas e dos índices de vazios de referência. A densidade das partículas sólidas foi determinada seguindo o procedimento postulado na norma NP-83 de 1965 do LNEC. Os resultados são idênticos, tendo sido obtido 2,64 para a areia proveniente do local de recolha mais a jusante (Araújo Santos, 2015) e 2,65 para o local de recolha mais a montante (Santos, 2009). Note-se que este último valor corresponde ao valor de referência da referida norma para areias siliciosas, ou seja, areias cuja composição mineralógica inclui apenas quartzo, muito à semelhança do observado na areia de Coimbra de montante do Rio Mondego.

Não existindo nem especificações nem normas nacionais para a determinação dos índices de vazios mínimo (e_{min}) e máximo (e_{max}), a sua obtenção seguiu procedimentos alternativos baseados nos processos propostos nas normas D 4253 – 00 e D 4254 – 00 da ASTM. A validação destes processos alternativos desenvolvidos pode ser consultada em Araújo Santos (2015). Os índices de vazios de referência obtidos estão resumidos no Quadro 1. A diferença nos resultados é indicativo da influência da composição mineralógica e morfológica na caracterização macroscópica da areia de Coimbra. Contudo, segundo Kramer (1996), seria expectável que partículas mais arredondadas, como as da areia de Coimbra de jusante, densificassem mais. A não verificação deste pressuposto deve-se à diferente composição mineralógica da areia neste local de recolha que possui partículas de mica. Por serem partículas lamelares, a presença de mica pode proporcionar a formação de pontes entre partículas granulares criando deste modo vazios não passíveis de serem preenchidos por outras partículas. Por exemplo, Guimarães (2002) refere que o aumento da percentagem de mica de 0% até 20% provoca um aumento do índice de vazios de 0,65 para 1,10 quando o comprimento das lamelas de mica é superior ao diâmetro dos grão de areia. Idêntica conclusão é apresentada por Bokhtair et al. (2000), em que o aumento do teor em mica de 2,5% para 6% origina um aumento de 20% e 30% dos índices de vazios máximo e mínimo, respetivamente. Outros autores, nomeadamente Harris et al. (1984), referem que existe uma relação linear entre o peso volúmico seco e o teor em micas.

Quadro 1 – Índices de vazios e pesos volúmcicos secos de referência

	e_{min} (-)	e_{max} (-)	$\gamma_{d,min}$ (kN/m ³)	$\gamma_{d,max}$ (kN/m ³)
Areia de Coimbra de jusante (Araújo Santos, 2015)	0,55	0,96	13,21	16,71
Areia de Coimbra de montante (Santos, 2009)	0,48	0,81	14,40	17,58

O conhecimento da densidade das partículas sólidas e dos índices de vazios de referência permite, através da aplicação da expressão [3], o cálculo dos pesos volúmcicos secos máximo ($\gamma_{d,max}$) e mínimo ($\gamma_{d,min}$).

$$\gamma_d = \frac{G \cdot \gamma_w}{1 + e} \quad [3]$$

Considerando para o peso volúmico da água (γ_w) 9,81 kN/m³, obtêm-se os valores representados no Quadro 1. Atendendo às diferenças identificadas anteriormente, os valores acima apresentados são logicamente diferentes. Contudo, interessa referir que os resultados para os pesos volúnicos secos máximo e mínimo da areia recolhida a jusante são, respetivamente, apenas 5% e 9% inferiores aos resultados da areia recolhida a montante. Já no que se refere à densidade relativa, as diferenças nos índices de vazios de referência resultam em diferenças significativas. Por exemplo, um índice de vazios de 0,67 corresponde a densidades relativas de 40% e 70% na areia de Coimbra de montante e jusante, respetivamente. Desta forma, conclui-se que apesar da presença de mica ter um efeito significativo nos índices de vazios de referência e, conseqüentemente na densidade relativa, o mesmo pode não ser tão expressivo noutras grandezas físicas ou mecânicas da areia de Coimbra.

3 - AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE

A percolação de água através de solos é governada pela Lei de Darcy (expressão [4]) em que o coeficiente de permeabilidade, k , é um parâmetro do solo que depende essencialmente das dimensões das partículas de solo e do seu índice de vazios. Em ambiente laboratorial, a quantificação deste parâmetro depende da granulometria do solo, sendo que, para solos mais grossos, os ensaios de permeabilidade são realizados em permeâmetros de carga constante, enquanto em solos mais finos são preferencialmente empregues permeâmetros de carga variável. Qualquer que seja o equipamento utilizado, o caudal de água percolado unidimensionalmente através de uma amostra de solo assim como os gradientes hidráulicos são medidos, permitindo assim, pela aplicação da expressão [4], estimar o coeficiente de permeabilidade do solo em estudo.

$$V = k \cdot i \quad [4]$$

Na expressão [4], V e i representam, respetivamente, a velocidade de percolação e o gradiente hidráulico.

3.1 - Ensaios de permeabilidade

Os ensaios de permeabilidade na areia de Coimbra foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Fundações do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Atendendo à composição granulométrica da areia de Coimbra, foi empregue um permeâmetro de carga constante cujo diâmetro interno é 6,32 cm e a altura máxima de amostra de solo é 14 cm.

Na preparação das amostras, optou-se pela técnica de deposição gravitacional de areia em meio húmido, comumente designada de pluviação húmida. O permeâmetro foi previamente preenchido com água e a areia foi depositada no fundo do permeâmetro com recurso a um funil quase totalmente submerso. A areia, que se encontrava igualmente imersa em água, foi depositada com o recurso a uma colher à entrada do funil, sendo a densidade relativa da amostra controlada pela aplicação de leves pancadas de um maço de borracha na parede do permeâmetro e pela quantidade de areia colocada no seu interior. A escolha desta técnica de preparação de amostras resulta da dificuldade em garantir a saturação da amostra caso esta fosse depositada por via seca no interior do permeâmetro. Esta técnica permite a obtenção de níveis de saturação mais elevados desde que:

- o ar no interior da amostra imersa em água seja retirado. Para tal, o recipiente contendo a amostra submersa, cujo peso seco deve ser previamente anotado para controlar a densidade relativa, é colocado num picnómetro de vácuo ligado a uma bomba de vácuo. Ao ligar a bomba, as bolhas de ar presas no interior do solo são libertadas, saturando-se a amostra por sucção do ar. Dependendo da quantidade de solo, este processo pode decorrer durante algumas horas;
- durante a deposição de areia na entrada do funil, deve assegurar-se que os grãos de areia estão sempre submersos de modo a manter a amostra saturada;
- após a preparação do provete e montagem do permeâmetro, deve ser garantido um fluxo de água constante através da amostra durante mais algumas horas. Note-se que, sendo o sentido de fluxo ascendente, o gradiente hidráulico imposto não deve, em caso algum, ser tal que provoque a fluidificação da amostra.

3.2 - Influência da densidade relativa

Os ensaios de permeabilidade incidiram sobre amostras de areia de Coimbra provenientes dos dois locais de recolha, tendo sido preparadas com diversas densidades relativas variando entre 40% e 80%. A este intervalo de variação correspondem, devido às diferenças identificadas na caracterização micro e macroscópica desta areia, índices de vazios diferentes. Assim, para a areia recolhida a jusante, o índice de vazios varia entre 0,632 e 0,796 enquanto para a areia recolhida a montante, o índice de vazios varia entre 0,546 e 0,678. Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 5.

Qualquer que seja o local de recolha da areia e a densidade relativa (ou índice de vazios), a ordem de grandeza da permeabilidade (10^{-4} m/s) coaduna-se com os resultados típicos de areias médias, podendo esta ser classificada como tendo uma permeabilidade média (Matos Fernandes, 2006). A Figura 5a ilustra claramente o efeito da densidade relativa, verificando-se uma diminuição do coeficiente de permeabilidade (k) com o aumento da densidade relativa (D_R). Esta figura permite também identificar a existência de uma relação aproximadamente linear entre estes dois parâmetros ($R^2 = 0,98$). Segundo Lambe e Whitman (1979), este tipo de relação é tipicamente observada em solos granulares. Ainda segundo estes autores, a representação dos resultados dos ensaios de permeabilidade no plano e - $\log(k)$ fornece também uma relação aproximadamente linear para qualquer tipo de solo (Figura 5b), com coeficientes de determinação (R^2) de 0,95 e 0,98. Para o intervalo de densidades relativas analisado, obtém-se um intervalo de variação do coeficiente de permeabilidade de $5,7 \times 10^{-4}$ m/s a $1,7 \times 10^{-4}$ m/s.

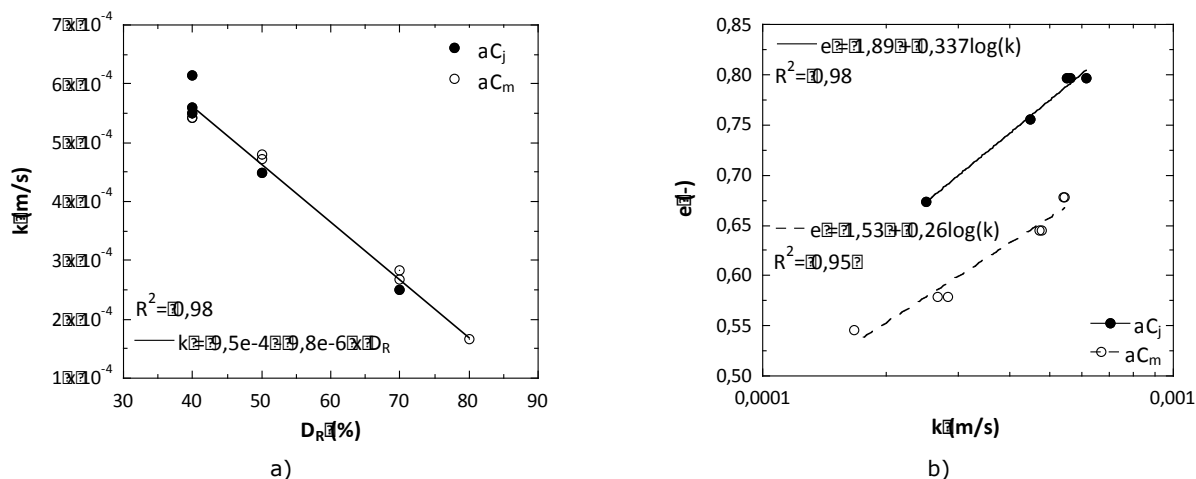


Figura 5 – Efeito da densidade relativa na permeabilidade da areia de Coimbra: a) coeficiente de permeabilidade em função da densidade relativa; b) índice de vazios em função do logaritmo do coeficiente de permeabilidade

3.3 - Influência da mineralogia

Confrontando os resultados obtidos mediante o local de recolha da areia, verifica-se que, para idêntica densidade relativa, existe uma boa concordância entre os valores de coeficiente de permeabilidade. De facto, observando a Figura 5a, as diferenças obtidas são mínimas, podendo ser atribuídas a ligeiras discrepâncias na densidade relativa durante o processo de preparação das amostras. Contudo, a influência da mineralogia, mais precisamente da presença de micas na areia recolhida a jusante, pode justificar os resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade quando estes são comparados em função do índice de vazios, como se representa na Figura 5b. As diferenças nos índices de vazios de referências abordadas na secção 2.2 traduzem-se em coeficientes de permeabilidade distintos para iguais índices de vazios.

4 - ESTIMATIVAS ATRAVÉS DE EXPRESSÕES SEMIEMPÍRICAS

A primeira referência de que a permeabilidade deveria ser relacionada com um diâmetro característico é, segundo Chapuis (2004), atribuída a Seelheim (1880). Deste então, foram propostas várias formulações semiempíricas para a estimativa do coeficiente de permeabilidade de solos tanto granulares como coesivos. Apesar da variabilidade destas soluções, todas elas relacionam a permeabilidade de solos com a granulometria do solo, em particular com o diâmetro das partículas que constituem a fração mais fina do solo, nomeadamente o diâmetro efetivo (D_{10}). A revisão e a descrição exaustivas de todas as soluções disponíveis não se enquadra no âmbito do presente artigo, optando-se, apenas, por salientar as propostas mais comumente aceites ou que, por serem mais recentes ou devido a alguma particularidade, se destaquem das restantes.

As formulações apresentadas podem ser agrupadas em dois conjuntos. No primeiro grupo reúnem-se algumas formulações que dependem unicamente da granulometria (diâmetro efetivo ou diâmetro médio das partículas) ou de propriedades da curva granulométrica (coeficiente de uniformidade). Neste grupo constam as formulações de: Hazen (1892, 1911), Gustafson (1983, 1986) e Alyamani e Sen (1993). No segundo grupo englobam-se as expressões que, para além de serem função da granulometria, dependem também do estado inicial da areia, isto é, do índice de vazios (atual ou máximo) e/ou porosidade. O segundo grupo é composto pelas soluções de: Terzaghi (1925), Kozeny-Carman (1927; 1938, 1956) e Chapuis (2004).

4.1 - Revisão das principais propostas

4.1.1 - Hazen (1892, 1911)

A solução de Hazen, expressa na equação [5], é indubitavelmente a expressão semiempírica mais divulgada, na qual o coeficiente de permeabilidade (k em cm/s) é uma função direta do quadrado do diâmetro efetivo (D_{10} em cm) por intermédio de uma constante (C_H), para a qual se assume frequentemente 100 (Carrier, 2003). Contudo, como é mencionado por este autor, podem ser encontradas inúmeras referências à formulação de Hazen nas quais a constante de proporcionalidade varia entre 1 e 1000. De igual modo, Shepherd (1989) refere que o expoente afeto ao diâmetro efetivo pode variar entre 1,11 e 2,05.

$$k = C_H \cdot (D_{10})^2 \quad [5]$$

Esta solução, cujo campo de aplicação abrange areias limpas e cascalhos, requer a verificação de três condições (Chapuis, 2004):

- 1) um estado inicial solto, isto é, com a porosidade (n) ou o índice de vazios (e) próximos dos seus valores máximos;
- 2) um coeficiente de uniformidade (C_U) inferior a 5;
- 3) o diâmetro efetivo deve variar entre 0,10 mm e 3,0 mm.

Note-se também que a formulação de Hazen foi proposta tendo como referência uma temperatura de 10°C para a água (Carrier, 2003). Assim, segundo este autor, como em condições laboratoriais, para as quais os resultados são usualmente referentes a uma temperatura de 20°C, a viscosidade da água é 30% inferior, dever-se-ia majorar a constante de proporcionalidade por 1,3.

Chapuis (2004) propõe uma extensão da solução de Hazen que permite alargar o campo de aplicação desta formulação a solos cujo estado inicial apresente uma densidade (ou índice de vazios) inferior ao seu máximo. Assim, para uma temperatura de referência de 20°C, o coeficiente de permeabilidade (k em cm/s) pode ser obtido em função do seu índice de vazios atual (e), o índice de vazios máximo (e_{max}) e do diâmetro efetivo (D_{10} em mm) através da aplicação da expressão [6]. Esta extensão da formulação de Hazen enquadra-se no segundo grupo de soluções descrita nesta publicação.

$$k = 1,50 \cdot (D_{10})^2 \cdot \frac{e^3 \cdot (1 + e_{max})}{(e_{max})^3 \cdot (1 + e)} \quad [6]$$

4.1.2 - Gustafson (1983, 1986)

A formulação de Gustafson é, segundo Kitterød (2008) mais genérica que outras formulações existentes e mais adequada para depósitos glaciares/fluviais. Smith e Wheatcraft (1992) consideram, por exemplo, que as formulações de Hazen e Kozeny-Carman são casos particulares da expressão de Gustafson. Esta solução relaciona, através da expressão [7] o coeficiente de permeabilidade (k em m/s) com o diâmetro efetivo (D_{10} em mm) e de uma constante $E(C_U)$ que depende unicamente do coeficiente de uniformidade (C_U) e cuja valorização é feita pela aplicação das expressões [8], [9] e [10].

$$k = E(C_U) \cdot \left(\frac{D_{10}}{1000} \right)^2 \quad [7]$$

$$E(C_U) = 10,2 \times 10^6 \cdot \frac{E^3}{1 + E} \cdot \frac{1}{g(C_U)^2} \quad [8]$$

$$E = 0,8 \cdot \frac{1}{2 \cdot \ln(C_U)} - \frac{1}{C_U^2 - 1} \quad [9]$$

$$g(C_U) = \frac{1,3}{\log(C_U)} \cdot \frac{C_U^2 - 1}{C_U^{1,8}} \quad [10]$$

4.1.3 - Alyamani e Sen (1993)

Tendo por base a composição granulométrica e resultados de ensaios de permeabilidade de trinta e duas amostras de areia, a formulação de Alyamani e Sen relaciona o coeficiente de permeabilidade (k em cm/s) com o diâmetro efetivo (D_{10} em mm) e o diâmetro médio (D_{50} em mm). Alyamani e Sen (1993) concluem que, representando a curva granulométrica numa escala natural de diâmetros, é possível aproximar a distribuição percentual do tamanho das partículas por uma reta e cuja caracterização está a montante desta solução.

O declive desta reta ($0,025 \cdot (D_{50} - D_{10})$), que à semelhança do coeficiente de uniformidade, fornece uma indicação da taxa de variação do tamanho das partículas é inversamente proporcional à permeabilidade. De facto, quando mais inclinada esta for, mais fino é o solo e, logicamente, menos permeável é o solo. No que concerne à ordenada na origem, Alyamani e Sen (1993) optam por definir a interceção da reta com o eixo da abcissas (diâmetro das partículas), sendo este ponto designado por I_0 (em mm). Este ponto, que assume valores próximos de zero ou do diâmetro efetivo, fornece também indicações sobre o quão fino é o solo. Valores mais elevados de I_0 traduzem-se num solo mais grosso e, logicamente, mais permeável. Face ao exposto, os autores anteriores concluem que a permeabilidade pode ser avaliada pela aplicação da expressão [11].

$$k = 1,505 \cdot (I_0 + 0,025 \cdot (D_{50} - D_{10}))^2 \quad [11]$$

Analisando as curvas granulométricas das areias analisadas, conclui-se que estas apresentam uma granulometria uniforme, podendo ser classificadas como areias finas a médias. Adicionalmente, as curvas delimitam um fuso granulométrico no qual se insere a curva granulométrica da areia de Coimbra.

4.1.4 - Terzaghi (1925)

A formulação de Terzaghi resulta das considerações adotadas por este autor relativamente às perdas de cargas hidráulicas que ocorrem nos canais de capilaridade mais pequenos. Em solos arenosos, Terzaghi (1925) compara a percolação de água nos seus vazios com a percolação de água através de uma série de peneiros: a resistência à percolação está confinada à malha dos peneiros, enquanto nos vazios, a resistência é negligenciável. Considerando o diâmetro efetivo das partículas (D_{10} em mm), a porosidade da areia (n) e os coeficientes de viscosidade da água a 10°C e à temperatura t (μ_{10} e μ_t , respetivamente), a permeabilidade do solo (k em cm/s) pode ser determinada pela aplicação da expressão [12].

$$k = C_0 \cdot \frac{\mu_{10}}{\mu_t} \cdot \left(\frac{n - 0,13}{\sqrt[3]{1 - n}} \right)^2 \cdot (D_{10})^2 \quad [12]$$

A constante C_0 depende da forma das partículas, variando entre 4,6 para partículas irregulares e 8 para partículas redondas e lisas, condição que mais se assemelha à morfologia das partículas de areia de Coimbra. Para uma temperatura de referência e 20°C , o quociente das viscosidades é 1,30 (Chapuis, 2004). Segundo Terzaghi (1925), a constante C_0 é muito mais influenciada pela qualidade das partículas do que pela uniformidade da areia. Aliás, idêntica conclusão é posteriormente apresentada por Kenney et al. (1984) quando referem que a uniformidade das partículas, para valores de coeficientes de uniformidade entre 1,04 e 12,0, tem pouca influência quando comparada com a influência na permeabilidade das partículas mais finas.

Finalmente, importa referir que a validade da aplicação desta formulação foi demonstrada por Terzaghi (1925) para um intervalo de índice de vazios entre 0,352 e 0,905 (ou porosidades variando entre 26,0% e 47,6%).

4.1.5 - Kozeny-Carman (1927; 1938, 1956)

A formulação original desta solução, que foi proposta por Kozeny (1927) e Carman (1938, 1956) difere das formulações anteriores por não depender do diâmetro das partículas mas sim da sua superfície específica. Apesar desta expressão ser tida como mais adequada que a fórmula de Hazen apresentada na secção 4.1.1, ela não é amplamente divulgada (Carrier, 2003). Segundo este autor, dois fatores contribuem para tal: i) a superfície específica das partículas não ser uma característica frequentemente determinada e ii) raramente ser abordado o facto da superfície específica poder ser simplesmente determinada a partir da granulometria do solo.

Caso se considere o solo como sendo constituído por esferas não uniformes, a expressão inicial de Kozeny-Carman pode ser simplificada, obtendo-se a expressão [13] que fornece o coeficiente de permeabilidade (k em cm/s):

$$k = 1,99 \times 10^4 \cdot \left(\frac{100}{\left(\sum \left(\frac{f_i}{D_{l,i}^{0,404} \cdot D_{s,i}^{0,595}} \right) \right)^2} \right) \cdot \frac{1}{SF^2} \cdot \frac{e^3}{1 + e} \quad [13]$$

em que:

- f_i – fração de partículas retida entre dois peneiros consecutivos (%);
- $D_{l,i}$ – abertura da malha do peneiro maior (mm);
- $D_{s,i}$ – abertura da malha do peneiro menor (mm);

SF – fator de forma;
 e – índice de vazios.

O fator de forma SF depende da angularidade das partículas. No caso específico da areia de Coimbra, em que as partículas classificam-se como arredondadas ou subarredondadas consoante a sua origem, o fator de forma pode assumir o valor de 6,4 – partículas desgastadas segundo a nomenclatura de Fair e Hatch (1933) – ou o valor de 6,6, caso se opte por considerar as partículas como sendo arredondadas segundo a escala proposta por Loudon (1952).

Segundo Carrier (2003), esta expressão apresenta algumas limitações, nomeadamente quanto à forma das partículas. Como esta expressão assume que as partículas estão relativamente compactas, ela pode não ser adequada para solos que contenham partículas achatadas, tais como micas. Assim, interessa verificar qual a variabilidade dos resultados desta expressão para a areia de Coimbra em função do seu local de recolha devido à presença de micas a jusante.

4.1.6 - Chapuis (2004)

A solução de Chapuis resulta da observação que a qualidade das estimativas efetuadas pela solução de Hazen e as fornecidas pela aplicação do ábaco de NAVFAC (Navfac, 1986), cuja solução analítica é também deduzida e apresentada por Chapuis (2004), era muito aleatória. Tendo por base que o coeficiente de permeabilidade (k em cm/s) depende da relação do índice de vazios $e^3/(1+e)$ e do diâmetro efetivo (D_{10} em mm) o autor anterior conclui que existe uma relação experimental entre a permeabilidade e o parâmetro $(D_{10})^2 \cdot e^3/(1+e)$, obtendo a expressão [14].

$$k = 2,4622 \cdot \left((D_{10})^2 \cdot \frac{e^3}{1+e} \right)^{0,7825} \quad [14]$$

Na validação desta expressão, Chapuis (2004) recorre a resultados publicados por vários autores, cujos resultados foram obtidos em diferentes areias que apresentam as seguintes características: i) diâmetros efetivos entre 0,16 mm e 1,98 mm; ii) coeficientes de uniformidade inferiores a 1,8 até 6,0 e iii) índices de vazios a variarem entre 0,348 e 0,824. Adicionalmente, esta solução fornece resultados muito satisfatórios em areias siltsas com diâmetros efetivos e índices de vazios com intervalos de variação de, respetivamente, 0,0032 mm – 0,062 mm e 0,44 – 0,82.

4.2 - Aplicabilidade das soluções semiempíricas à areia de Coimbra

A validação da aplicabilidade das expressões anteriormente descritas baseia-se na comparação direta das estimativas por estas fornecidas com os resultados dos ensaios de permeabilidade. Nesta comparação, opta-se por apenas considerar os resultados laboratoriais obtidos para as amostras preparadas com densidades relativas de 40% e 70%. Estes resultados, assim como as respetivas estimativas, encontram-se resumidos no Quadro 2. Por razões de coerência de unidades, os resultados para o coeficiente de permeabilidade estão apresentados em unidades SI, ou seja, em m/s.

Quadro 2 – Verificação da aplicabilidade de algumas soluções semiempíricas à areia de Coimbra

		Local de Recolha da areia de Coimbra				
		Jusante		Montante		
		D_R (%) e (-)	40%	70%	40%	70%
			0,796	0,673	0,678	0,579
k (m/s)		Ensaio laboratoriais	$5,7 \times 10^{-4}$	$2,5 \times 10^{-4}$	$5,4 \times 10^{-4}$	$2,7 \times 10^{-4}$
	Grupo I	Hazen			$4,2 \times 10^{-4}$	
		Gustafson			$2,1 \times 10^{-4}$	
		Alyamani e Sen			$3,6 \times 10^{-4}$	
		Hazen (extensão)	$3,0 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-4}$	$3,1 \times 10^{-4}$	$2,6 \times 10^{-4}$
	Grupo II	Terzaghi	$4,9 \times 10^{-4}$	$3,5 \times 10^{-4}$	$3,6 \times 10^{-4}$	$2,6 \times 10^{-4}$
		Kozeny-Carman	$8,8 \times 10^{-4}$	$5,7 \times 10^{-4}$	$5,7 \times 10^{-4}$	$3,8 \times 10^{-4}$
		Chapuis	$6,2 \times 10^{-4}$	$4,4 \times 10^{-4}$	$4,5 \times 10^{-4}$	$3,3 \times 10^{-4}$

Da análise do Quadro 2 conclui-se que todas as formulações semiempíricas utilizadas fornecem resultados para o coeficiente de permeabilidade com uma ordem de grandeza igual aos resultados de permeabilidade realizados, isto é, 10^{-4} m/s. Contudo verifica-se alguma divergência nas estimativas efetuadas, nomeadamente as referentes ao estado mais solto, sendo esta tendência mais significativa na areia de Coimbra recolhida a jusante. De facto, tanto se obtêm estimativas por defeito como por excesso, sendo o intervalo de variação limitado por valores cuja relação é de 1 para 4.

Como era expectável, os resultados referentes às formulações do primeiro grupo, que apenas dependem da granulometria do solo, não exprimem a influência do estado inicial do solo, isto é, a sua densidade relativa ou índice de vazios inicial. As formulações do segundo grupo, apesar das suas estimativas

refletirem o estado inicial do solo, não conseguem reproduzir coerentemente a variação com a densidade relativa da permeabilidade da areia de Coimbra. A variação da grandeza dos erros das formulações em função do estado inicial, informação que se resume no Quadro 3, é esclarecedora quanto à dissonância dos resultados obtidos. A informação recolhida permite apenas concluir acerca da tendência geral de avaliação do coeficiente de permeabilidade da areia de Coimbra. Este tende a ser sobreavaliado pelas fórmulas tanto de Kozeny-Carman como de Chapuis e subavaliado pela extensão da fórmula de Hazen. Quanto às formulações do Grupo I, por não refletirem o estado inicial, não é possível apresentar nenhuma tendência. Note-se unicamente que a consideração do coeficiente de uniformidade não aparenta traduzir-se em nenhuma melhoria das estimativas. Aliás, a pior estimativa advém da aplicação da formulação de Gustafson.

Quadro 3 – Erros relativos na previsão do coeficiente de permeabilidade

		Local de Recolha da areia de Coimbra				
		Jusante		Montante		
		D_R (%)	40%	70%	40%	70%
		e (-)	0,796	0,673	0,678	0,579
		$k_{\text{laboratorial}}$ (m/s)	$5,7 \times 10^{-4}$	$2,5 \times 10^{-4}$	$5,4 \times 10^{-4}$	$2,7 \times 10^{-4}$
Erro (%)	Grupo I	Hazen	-35	+41	-28	+36
		Gustafson	-171	-17	-154	-27
		Alyamani e Sen	-58	+30	-49	+25
	Grupo II	Hazen (extensão)	-88	-27	-75	-32
		Terzaghi	-17	+28	-51	-5
		Kozeny-Carman	+35	+56	+7	+29
		Chapuis	+8	+43	-19	+17

Legenda: "+" – previsão com erro por excesso; "-" – previsão com erro por defeito

Os resultados expostos no Quadro 3 permitem no entanto, apesar da qualidade das estimativas não ser a mais adequada, concluir acerca da presença de micas na areia. De facto, confrontando os erros dos dois locais de recolha, parece existir na maioria das formulações um decréscimo da qualidade da estimativa com o aumento da percentagem de micas. Esta observação parece indiciar que na aplicação ou na proposta de fórmulas semiempíricas deve ser tido em conta não só a granulometria mas também aspetos mineralógicos.

5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A areia de Coimbra designa uma areia artificial obtida da peneiração de depósitos aluvionares que podem ser recolhidos ao longo do leito do Rio Mondego entre Coimbra e a Figueira da Foz. A composição mineralógica assim como a morfologia das partículas depende do local de recolha. De facto, a jusante, as partículas são mais arredondadas que a montante em consequência do processo de abrasão que as partículas sofrem durante o seu transporte (Charlton, 2008). A jusante, a areia de Coimbra é também constituída por mica, mineral que não é encontrado na composição da areia recolhida mais a montante. Esta diferença deve-se às diferentes velocidades de deposição dos constituintes, pois, segundo Garzanti et al. (2008), apesar de terem uma densidade superior a dos grãos de quartzo, as partículas de micas mantêm-se mais tempo em suspensão no rio devido à sua forma mais lamelar, tendendo a acumular-se mais a jusante.

Os resultados dos ensaios de permeabilidade em permeâmetros de carga constante forneceram coeficientes de permeabilidade da ordem de 10^{-4} m/s, valor típico de areias médias. Os ensaios permitem também identificar uma clara influência do índice de vazios na permeabilidade da areia de Coimbra, tendo-se verificado existir uma relação linear entre o coeficiente de permeabilidade e a densidade relativa e entre o coeficiente de permeabilidade e o índice de vazios. Já no que se refere à influência da constituição mineralógica, as diferenças apenas são visíveis quando a permeabilidade é representada em função do índice de vazios, sendo que, para uma dada permeabilidade, o índice de vazios é superior na areia de Coimbra de jusante. Quando expresso em função da densidade relativa, os resultados para o coeficiente de permeabilidade são idênticos, podendo atribuir-se as diferenças a ligeiras discrepâncias no controlo da densidade relativa aquando da preparação das amostras.

Finalmente, a aplicação de expressões semiempíricas para a estimativa do coeficiente de permeabilidade revela que nenhuma das formulações consideradas consegue fornecer estimativas perfeitas dos resultados laboratoriais. Adicionalmente, nenhuma é também capaz de reproduzir de forma coerente a variação do coeficiente de permeabilidade da areia de Coimbra com a densidade relativa. Os erros obtidos aparentam ser tanto maiores quanto maior for a percentagem de mica na areia de Coimbra.

REFERÊNCIAS

- Alyamani, M. S. e Sen, Z. (1993). Determination of hydraulic conductivity from complete grain-size distribution curves. *Ground Water*, Vol. 31, No. 4, pp. 551-555.
- Araújo Santos, L. M. (2015). *Caracterização do comportamento mecânico da areia de Coimbra sob ações generalizadas*. Dissertação de Doutorado, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Araújo Santos, L. M., Coelho, P. A. L. F. e Taborda, D. M. G. (2012). Uso do Hollow Cylinder Apparatus na caracterização do fenómeno de liquefação na areia de Coimbra. *Atas de 13.º Congresso Nacional de Geotecnia e 6.º Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia*. Lisboa
- Araújo Santos, L. M., Coelho, P. A. L. F. e Taborda, D. M. G. (2014). Validação do uso do hollow cylinder apparatus no estudo do comportamento de solos arenosos. *Atas de IV Jornadas Luso-Espanholas de Geotecnia e XIV Congresso Nacional de Geotecnia*. Covilhã
- ASTM (2000a). *Standard test methods. Minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density* D 4254 American Society for Testing and Materials, USA.
- ASTM (2000b). *Standard test methods. Maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table* D 4253 American Society for Testing and Materials, USA.
- ASTM (2006). *Standard practice. Classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)* D 2487 American Society for Testing and Materials, USA.
- Azeiteiro, R. J. N., Marques, V. D. e Coelho, P. A. L. F. (2012). Effect of singular peaks in uniform cyclic loading on the liquefaction resistance of a sand. *Atas de 2nd International Conference on Performance Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering*. Taormina. pp. 813-826.
- Bokhtair, M., Muqtadir, A. e Ali, M. H. (2000). Effect of mica content on stress-deformation behaviour of micaceous sand. *Journal of Civil Engineering*, Vol. CE 28, No. 2, pp. 155-167.
- Carman, P. C. (1938). The determination of the specific surface of powders. *Transactions, Journal of the Society of Chemical Industries*, Vol. 57, pp. 225-234.
- Carman, P. C. (1956). *Flow of gases through porous media*, Butterworths Scientific Publications, London
- Carrier, W. D. (2003). Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 129, No. 11, pp. 1054-1056.
- Chapuis, R. P. (2004). Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 41, No. 5, pp. 787-795.
- Charlton, R. (2008). *Fundamentals of Fluvial Geomorphology*, 1.ª edição, Routledge - Taylor & Francis Group, Abington, Oxfordshire, 275 p.
- Cho, G.-C., Dodds, J. e Santamarina, J. C. (2006). Particle shape effects on packing density, stiffness and strength: natural and crushed sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 132, No. 5, pp. 591-602.
- Cunha, M. I. A. B. A. d. (2010). *Caracterização laboratorial do comportamento de uma areia de Coimbra sob carregamento cíclico*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Dias Santos, P. A. (2015). *Caracterização da rigidez inicial de areias utilizando Bender Elements*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Fair, G. M. e Hatch, L. P. (1933). Fundamental factors governing the stream-line flow of water through sand. *Journal of American Water Works Association*, Vol. 25, pp. 1551-1565.
- Garzanti, E., Andò, S. e Vezzoli, G. (2008). Settling equivalence of detrital minerals and grain-size dependence of sediment composition. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 273, pp. 138-151.
- Guimarães, M. (2002). *Crushed stone fines and ion removal from clay slurries - fundamental studies*. Dissertação de Doutorado, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- Gustafson, G. (1983). *Brunnsystem för värmelagring och värmeutvinning i akvifere*. R39:1983. Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm.
- Gustafson, G. (1986). One-hole pumping tests in Swedish glaciofluvial aquifers - prediction of transmissivity and storage coefficient. *Atas de Nordic Hydrological Conference*. Reykjavik

- Harris, W. G., Parker, J. C. e Zelazny, L. W. (1984). Effects of mica content on engineering properties of sand. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 48, No. 3, pp. 501-505.
- Hazen, A. (1892). *Some physical properties of sands and gravels, with special reference to their use in filtration*. 24th Annual Report. Massachusetts State Board of Health, Boston.
- Hazen, A. (1911). Discussion of 'Dams on sand foundations' by A. C. Koenig. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 73, pp. 199-203.
- Kenney, T. C., Lau, D. e Ofoegbu, G. I. (1984). Permeability of compacted granular materials. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 21, No. 4, pp. 726-729.
- Kitterød, N.-O. (2008). Focused flow in the unsaturated zone after surface ponding of snowmelt. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 53, No. 1, pp. 42-55.
- Kozeny, J. (1927). Über kapillare Leitung des Wassers im Boden. *Sitzungsber Akademie der Wissenschaften*, Vol. 136, No. 2a, pp. 271-306.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*, 1.^a edição, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 653 p.
- Lambe, T. W. e Whitman, R. V. (1979). *Soil Mechanics*, 1.^a edição, John Wiley and Sons, Singapore, 533 p.
- LNEC (1965). *Solos. Determinação da densidade das partículas* NP-83 Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.
- LNEC (1966). *Solos. Análise granulométrica* E 196 Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.
- LNEC (1970). *Solos. Classificação para fins rodoviários* E 240 Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.
- LNEG (1976). *Carta geológica de Portugal. Figueira da Foz* Folha 19-C Laboratório Nacional de Energia e Geologia, Portugal.
- LNEG (2005). *Carta geológica de Portugal. Coimbra - Lousã* Folha 19-D Laboratório Nacional de Energia e Geologia, Portugal.
- Loudon, A. G. (1952). The computation of permeability from simple soil tests. *Géotechnique*, Vol. 3, No. 4, pp. 165-183.
- Matos Fernandes, M. d. (2006). *Mecânica dos Solos. Conceitos e Princípios Fundamentais*, FEUP edições, Porto, 451 p.
- NAVFAC (1986). *DM-7.01 Soil Mechanics*, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C, 389 p.
- Powers, M. C. (1953). A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 23, No. 2, pp. 117-119.
- Santamarina, J. C. e Cho, G. C. (2004). Soil behaviour: the role of particle shape. *Atas de Advances in geotechnical engineering: The Skempton conference*, Vol. 1. London. pp. 604-617.
- Santos, J. A., Gomes, R. C., Lourenço, J. C., Marques, F., Coelho, P., Azeiteiro, R., Araújo Santos, L. M., Marques, V., Viana da Fonseca, A., Soares, M., Abreu, É. e Taborda, D. M. G. (2012). Coimbra sand - round robin tests to evaluate liquefaction resistance. *Atas de 15th World Conference on Earthquake Engineering*. Lisboa
- Santos, L. N. L. (2009). *Comportamento da areia de Coimbra sob carregamento monotónico*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Santos, L. N. L. e Coelho, P. A. L. F. (2010). Comportamento da areia de Coimbra sujeita a compressão triaxial. *Atas de 12.º Congresso Nacional de Geotecnia*. Guimarães. pp. 457-468.
- Seelheim, F. (1880). Methoden zur Bestimmung der Durchlässigkeit des Bodens. *Zeitschrift für analytische Chemie*, Vol. 19, pp. 387-402.
- Shepherd, R. G. (1989). Correlations of permeability and grain size. *Ground Water*, Vol. 27, No. 5, pp. 633-638.
- Smith, L. e Wheatcraft, S. W. (1992). Groundwater flow. *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill. pp. 6.1-6.58.
- Terzaghi, K. (1925). Principles of soil mechanics: III - Determination of permeability of clay. *Engineering News-Record*, Vol. 95, No. 21, pp. 832-836.