COMPORTAMENTO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA MEDIANTE VARIAÇÕES NOS PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO DOS SOLOS

BEHAVIOUR OF ELECTRIC CONDUCTIVITY AS FUNCTION OF CHANGES OF SOIL COMPACTION PARAMETERS

Vaillant, João Marcos; *DEC/CEFET-MG, Belo Horizonte, Brasil, jmvaillant@gmail.com*
Cardoso, Rafaela; *CERIS, ICIST, Instituto Superior Técnico IST, Lisboa, Portugal, rafaela@civil.ist.utl.pt*

RESUMO

Vários estudos indicam que a medição da condutividade elétrica pode ser considerada uma ferramenta eficaz e de baixo custo na avaliação de parâmetros físicos dos solos, com a vantagem que pode ser utilizada tanto em laboratório quanto no campo. Neste artigo apresenta-se uma metodologia que propõe averiguar os parâmetros de compactação de solos finos através de variações da sua condutividade elétrica para que este parâmetro, se medido em campo, sirva para controle da compactação de uma maneira rápida e eficaz. Neste estudo realizaram-se ensaios em provetes de Margas da Abadia, compactados com cinco energias diferentes e vários teores em água. Através da medida da condutividade para cada ponto, com dado peso volúmico seco e teor em água, foi possível definir as curvas de igual condutividade. Estas curvas podem ser representadas de forma simplificada por uma função matemática que relaciona os parâmetros da compactação com a condutividade elétrica, com um alto grau de correlação.

ABSTRACT

Several studies show that the measurement electrical conductivity can be considered as an effective and non-expensive tool for the evaluation of physical parameters in soils, with the advantage that it can be used in the laboratory and in the field. In this paper a method is proposed to define the compaction parameters of fine soils through changes in their electrical conductivity so that this parameter, if measured in the field, could be used as fast and effective compaction control. Tests on specimens of Abadia marls compacted with five different efforts and several water contents were performed. The conductivity measured in each point, with a given dry volumetric weight and water content, allowed defining curves of equal conductivity. These curves can be represented in a simplified way by a mathematical function which relates the compaction parameters with electrical conductivity, with a high degree of correlation.

1 - INTRODUÇÃO

A medição da condutividade elétrica pode ser considerada uma ferramenta eficaz e de baixo custo na avaliação de parâmetros físicos dos solos, que pode ser utilizada tanto em laboratório como no campo. A sua aplicação pode ser comprovada em um grande número de trabalhos já publicados com esse tema e a sua grande vantagem advém do fato de se poder usar a corrente contínua na sua determinação. Deste modo, a condutividade elétrica pode ser tratada como uma importante propriedade do solo e, como tal, pode-se determinar as suas correlações com outros índices físicos. Para o caso particular dos solos compactados, estes índices são o peso volúmico seco e o teor em água.

Neste artigo mostra-se uma abordagem simplificada a respeito das variações da condutividade elétrica dos solos em função das variações no seu estado de compactação. Esta abordagem consiste na definição de uma relação gráfica entre as três variáveis - peso volúmico seco, teor em água e condutividade elétrica -, que possa ser representada na curva de compactação, tal como ocorre com as curvas de saturação. Esta relação foi definida para as margas da Abadia, que podem ser tomadas como exemplo porque já foram usadas na construção de aterros rodoviários (Cardoso e Maranha das Neves, 2012).

2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A medição da resistividade elétrica vem a ser usada em diferentes aplicações no campo da engenharia, por exemplo como método de prospeção geofísica e na determinação do teor em água do solo. Em laboratório, a resistividade elétrica já vem sendo utilizada para avaliação e controle de índices físicos dos solos tais como densidade ou peso volúmico seco, teor em água, porosidade e índice de vazios (Cai *et al.*, 2015; Vaillant *et al.*, 2015; Hassan, 2014; Bai *et al.*, 2013; Kibria *et al.*, 2012; Yamazaki, 2012; Aquino, 2010). Também há registo de ser usada para aferir algumas propriedades mecânicas, tais como

resistência à compressão (Fallah-Safari *et al.*, 2013) e resistência à penetração ou CBR (Saarenketo *et al.*, 1995), ou para medição da sucção (Yamazaki, 2012; Dias, 2015).

O interesse por esse método vem crescendo por causa da grande facilidade de medida, do baixo custo dos equipamentos e da sua portabilidade. O método de leitura através de dois elétrodos de placa pode ser um caminho natural para a padronização de um ensaio em solos compactados. A grande vantagem advém do fato de que o ensaio pode ser realizado em conjunto com os ensaios convencionais de compactação em laboratório, ou em corpos de prova com geometria conhecida, compactados ou extraídos do terreno.

Neste estudo utilizou-se o método de dois elétrodos de placa e circuito de corrente contínua (DC). Acredita-se que este método seja o de maior eficácia para essa finalidade pois os resultados são os que apresentam maiores coeficientes de correlação com os índices físicos. Nos exemplos encontrados destacam-se, quase sempre, os índices que formam a curva de compactação dos solos (peso volúmico seco, γ_d, e teor em água, w).

Hassan (2014) menciona vários estudos realizados sobre o uso da condutividade elétrica e suas relações com o teor em água, que entre os vários índices físicos dos solos é aquele que mais afeta a condutividade. Nesse estudo são apresentadas vantagens no uso das diferentes técnicas de leitura e no tipo de corrente elétrica, se direta (DC) ou alternada (AC). A conclusão é que, para medidas em pequena escala e amostras homogêneas, as técnicas de leitura das medidas elétricas não apresentam diferenças consistentes entre uma ou outra. A escolha, portanto, fica condicionada ao objetivo do estudo. Porém, em se tratando de uma medida que caracteriza uma propriedade do solo, como é a resistividade elétrica, os resultados devem ser independentes do método utilizado (Hassan, 2014).

Aquino (2010) estudou relações da condutividade elétrica com algumas propriedades geotécnicas de um solo argiloso compactado. Esse pesquisador utilizou o método de dois elétrodos, com bons resultados (Figura 1). Yamazaki (2012) estudou a influência da salinidade do fluido na avaliação da compactação e da resistividade elétrica de dois solos finos e obteve também boas correlações para cada fluido (ver Figura 2, sendo k o valor da condutividade elétrica). Ainda no trabalho de Yamazaki (2012) foi mencionado o estudo de Hassad *et al.* (2008), cujos resultados para as relações de condutividade com parâmetros de compactação do solo apresentaram excelentes correlações.

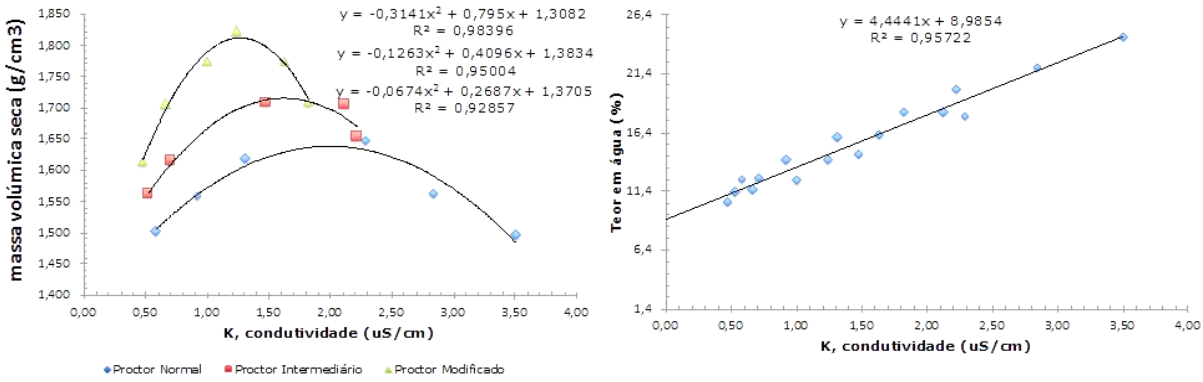


Figura 1 – Correlações entre a resistividade elétrica e os parâmetros compactação do solo: massa volúmica seca e teor em água (adaptado de Aquino, 2010)

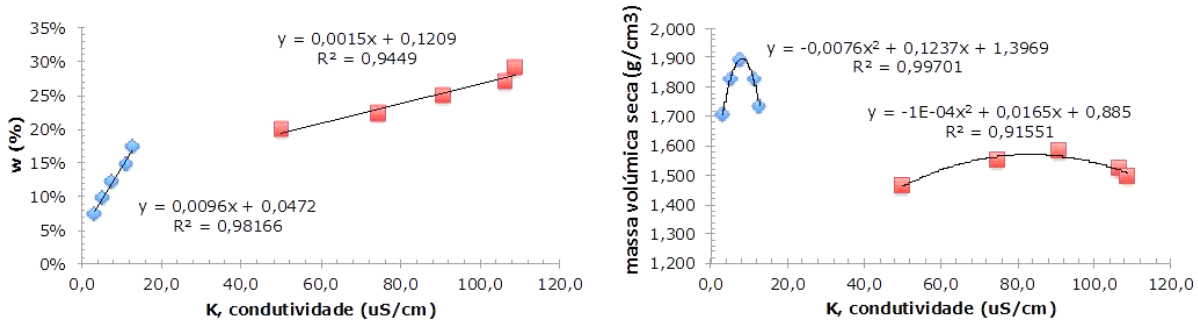


Figura 2 – Relações de condutividade elétrica com o teor em água (w) e a massa volúmica, para duas amostras de solo (adaptado de Yamazaki, 2012)

Bai *et al.* (2013) estudaram as alterações produzidas na resistividade elétrica em função de variações de teor em água e peso volúmico seco. Foi utilizado nesse estudo um equipamento de medida elétrica de

dois elétrodos, conforme o esquema mostrado na Figura 3. Os resultados para as variações da resistividade em função do teor em água são semelhantes aos obtidos por Hammad (2013) para misturas de solo-cimento. No estudo deste autor foi utilizada a corrente contínua de 24V. No estudo de Cai *et al.* (2015) foram utilizados dois elétrodos de placa e tensão alternada com amplitude de 16V e frequência de 50Hz. As amostras de um solo com magnésio radioativo foram compactadas em moldes de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. As correlações obtidas entre dois índices físicos e a condutividade elétrica foram também muito boas para vários níveis de carbonatação da mistura.

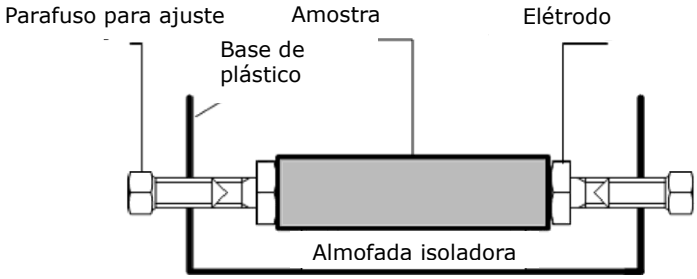


Figura 3 – Esquema de equipamento utilizado para medida de resistividade elétrica em amostra de solo compactado (adaptado de Bai *et al.*, 2013)

Finalmente, Vaillant *et al.* (2015) investigaram a possibilidade de avaliação do grau de compactação de diferentes solos argilosos a partir de medidas de condutividade elétrica. As correlações entre a condutividade e o teor em água na compactação dos solos estudados permitiram obter um coeficiente relacionado com os valores da massa volúmica seca máxima e o teor em água ótimo. As relações gráficas da condutividade obtidas na compactação das dez amostras de solos são apresentadas na Figura 4.

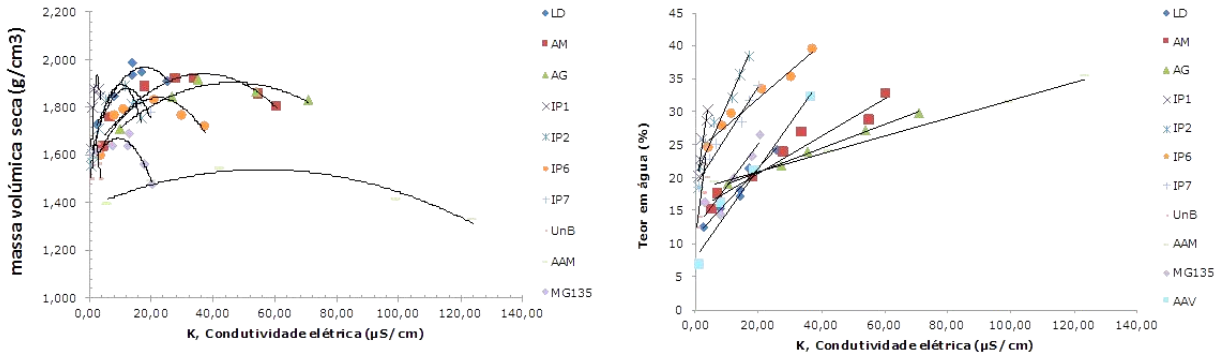


Figura 4 – Relações de condutividade elétrica com parâmetros de compactação para dez diferentes amostras de solos (Vaillant *et al.*, 2015)

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

No estudo que se apresenta neste artigo utilizaram-se as margas da formação Abadia (Jurássico Superior), presentes numa faixa extensa da Sub-Bacia de Arruda dos Vinhos e que foram utilizadas na construção dos aterros da autoestrada A10 (Cardoso e Maranha das Neves, 2012). Da análise mineralógica constatou-se a existência de carbonato de cálcio, quartzo, mica, clorite, gesso e alguns minerais argilosos (essencialmente caulinite e bentonite). *In situ*, o material está praticamente saturado (grau de saturação 77%, correspondente ao teor em água w=17%) e a porosidade é de cerca de 35%. O limite de liquidez é 49% e o índice de plasticidade é 25%, sendo o peso volúmico das partículas sólidas de 27,4kN/m^3.

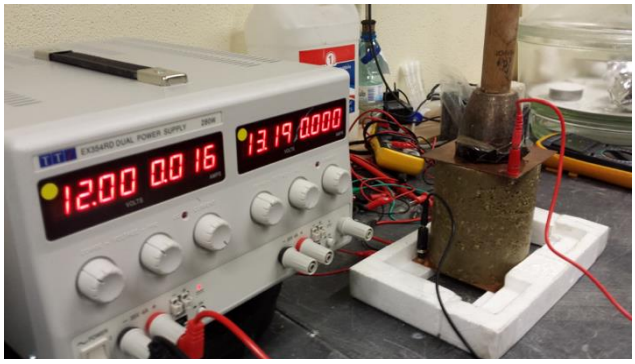
A cor destes materiais varia em função do seu grau de alteração. Tal como se pode ver na Figura 5, o material mais alterado encontra-se à superfície (entre 50 cm e 5 m) e tem cor amarela, enquanto que o material menos alterado tem cor castanha a cinzenta.

As margas amarelas foram escolhidas para este estudo, sendo preparadas e compactadas de acordo com a norma LNEC E-197 (1966), com material com diâmetros inferiores a 4,8 mm. Foram realizados testes adotando cinco energias de compactação diferentes: E1=6,0 kg.cm/cm^3 (compactação leve), E2=7,5 kg.cm/cm^3, E3=8,5 kg.cm/cm^3, E4=16,1 kg.cm/cm^3 e E5= 21,5 kg.cm/cm^3. A compactação foi efetuada com água destilada, com condutividade entre 2 a 4 µS/cm.

Figura 5 – Vista geral e sondagem das margas da Abadia onde se pode ver a alteração do material à superfície

Para cada ensaio de compactação realizado, isto é, para cada ponto com um dado peso volúmico seco e teor em água, fez-se uma medida da condutividade elétrica. Essa medida foi obtida a partir de um sistema de montagem simples que se apresenta na Figura 6. Utilizaram-se dois elétrodos de placas de cobre, com 1 mm de espessura, e uma fonte de tensão contínua de 12 V. Durante a leitura foi colocado um peso de aproximadamente 1 kg sobre a placa de topo para permitir melhor contato desta com a amostra. O peso estava revestido com um plástico isolador elétrico. As leituras da corrente elétrica foram realizadas imediatamente após o circuito ser ligado. A resistência elétrica R foi obtida por meio da conhecida lei de Ohm e a condutividade elétrica K é obtida em função da resistência através da Equação 1, onde L é a distância entre os elétrodos e A é a área de seção do provete:

$$K = \frac{L}{RA} \qquad [1]$$



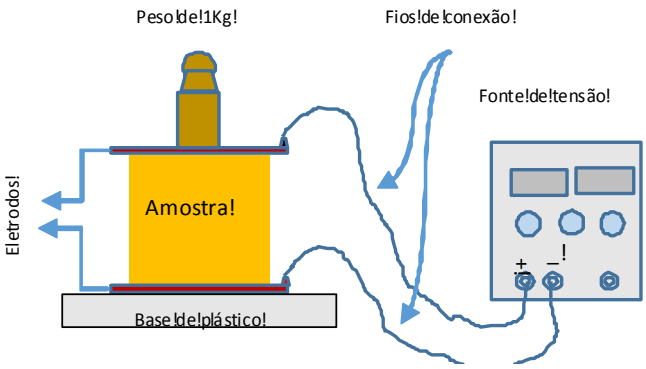


Figura 6 – Sistema para obtenção da condutividade elétrica do solo compactado

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas de compactação obtidas para cada uma das energias aplicadas apresentam-se na Figura 7. Observa-se um comportamento típico dos solos argilosos, exibindo curvas bem definidas em que se nota o aumento esperado do peso volúmico seco e a redução do teor em água ótimo com o aumento da energia de compactação.

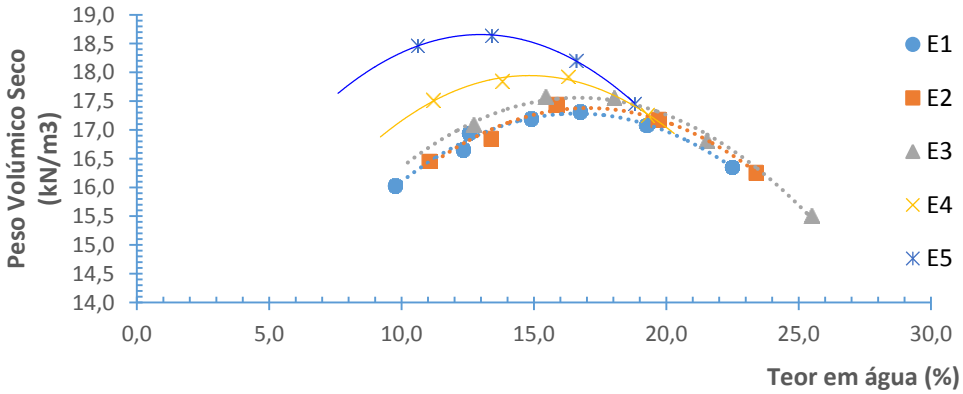
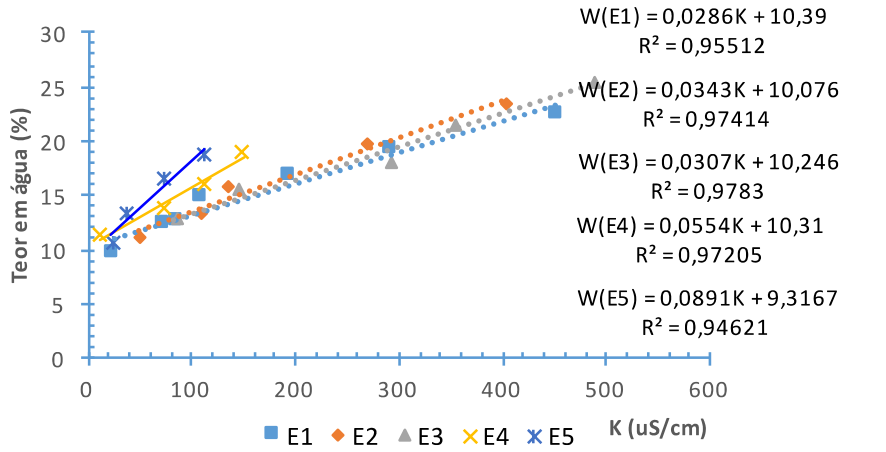
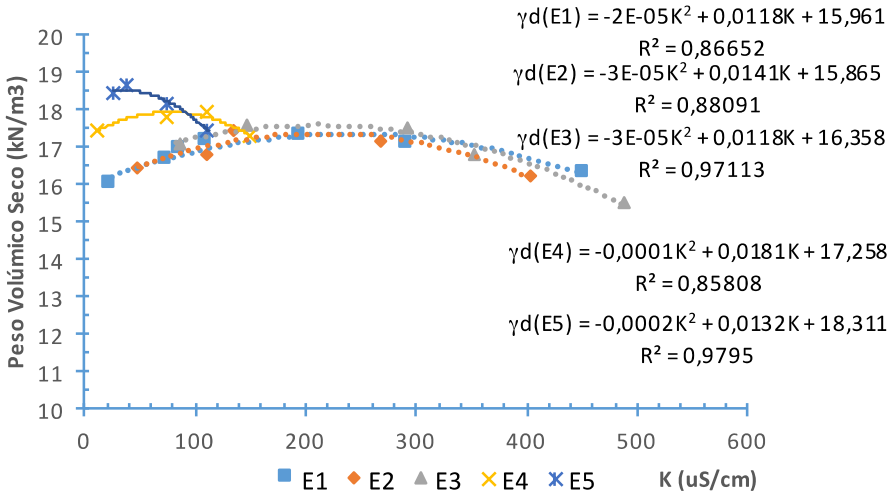


Figura 7 – Curvas de compactação para as cinco energias estudadas

As medidas de condutividade elétrica (K) das amostras, obtidas imediatamente após a moldagem, forneceram as relações que se apresentam na Figura 8 (Fig. 8a com o teor em água e Fig. 8b com o peso volúmico). Neste caso já se pode notar a sensibilidade da condutividade elétrica diante das alterações promovidas no estado de compactação da amostra.



a)



b)

Figura 8 – Relações da condutividade elétrica K com: a) teor em água; b) peso volúmico seco

As regressões apresentadas na Figura 8a confirmam que as relações de teor em água e condutividade podem ser bem ajustadas por relações lineares. Da mesma forma, o peso volúmico seco (Fig. 8b) foi melhor correlacionado com a condutividade por uma função polinomial.

Com os valores medidos para a condutividade elétrica foi possível definir a carta de condutividade, que é composta por linhas unindo os pontos com igual condutividade elétrica, obtidas por interpolação dos pontos experimentais. Esta carta apresenta-se na Figura 9.

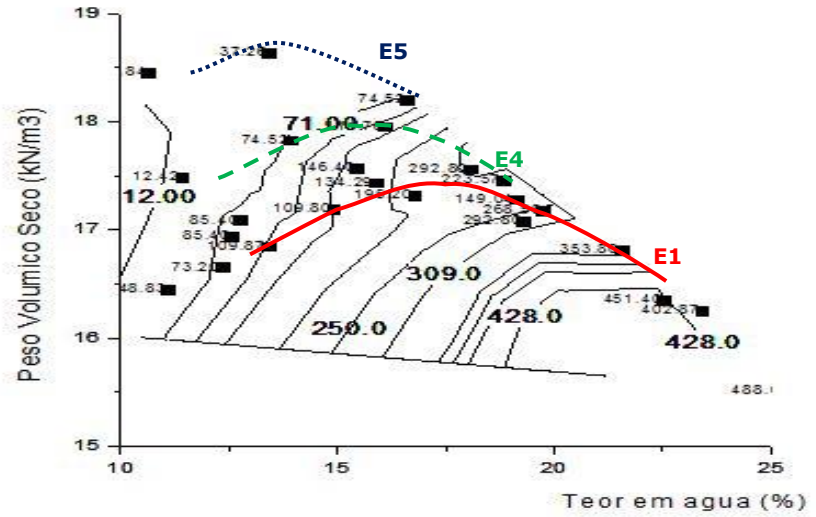


Figura 9 – Cartas de condutividade obtidas para as Margas Amarelas

Vale ressaltar que a condutividade elétrica depende da energia de compactação aplicada, conforme se referiu anteriormente e que foi também observado por outros autores. Este resultado é esperado porque haverá mudanças nos pares de valores peso volúmico seco (porosidade) e teor em água (grau de saturação). Estes dois parâmetros físicos influenciam a condutividade elétrica de solos (Archie, 1942). Assim, para uma mesma condutividade podem ser encontrados vários pares de valores do peso volúmico seco e teor em água, que variam ligeiramente com as diferentes energias de compactação.

Apesar da escala adotada para os eixos da Figura 9, de uma forma geral pode-se observar que as linhas que unem os pontos de igual condutividade são quase retas. Considerando que a condutividade elétrica é influenciada simultaneamente pelos dois parâmetros de compactação do solo, pensou-se em obter uma relação única da condutividade com ambos. Assim, definiu-se um coeficiente obtido pela razão entre a densidade e o teor em água, designado por RDW.

Na Figura 10 apresentam-se as relações entre a condutividade K e o coeficiente RDW, obtidas para as energias de compactação estudadas. As curvas são conhecidas a partir de cada ponto de peso volúmico seco e teor em água correspondente a um determinado valor de condutividade elétrica. A função polinomial foi utilizada para a correlação entre a condutividade elétrica e o coeficiente RDW, que, na maioria das vezes, oferece um melhor ajuste. Destaca-se nesta figura as diferentes relações para os pontos compactados com as energias E1, E2 e E3, de comportamento semelhante, e para as maiores energias, E4 e E5.

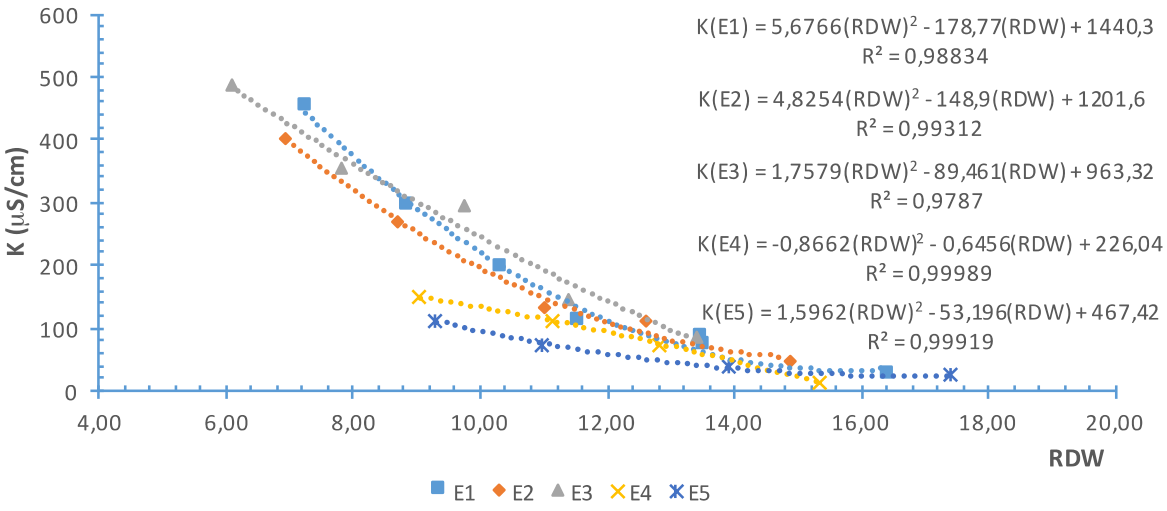


Figura 10 – Relações da condutividade elétrica com o coeficiente RDW

A partir das relações da condutividade elétrica com o coeficiente RDW que se apresentam na Figura 10, fixando o valor da condutividade e para cada peso volúmico seco, é possível obter o valor do teor em água correspondente. Com estes pares de valores teor em água; peso volúmico seco definem-se

analiticamente as equações para cada uma das linhas de igual condutividade no gráfico de compactação. Como exemplo calcularam-se as linhas próximas do ponto de inflexão da curva de compactação leve (Energia E1) por serem as mais relevantes do ponto de vista prático de controlo da compactação. Estas linhas apresentam-se na Figura 11.

Através das equações das linhas de condutividade da Figura 11, apesar de pequenos erros, constata-se que partem da origem dos eixos, no gráfico teor em água versus peso volúmico seco. É possível antever que a linha de condutividade nula tende a ser vertical e a linha de condutividade máxima tende a ser horizontal, coincidentes com os respetivos eixos.

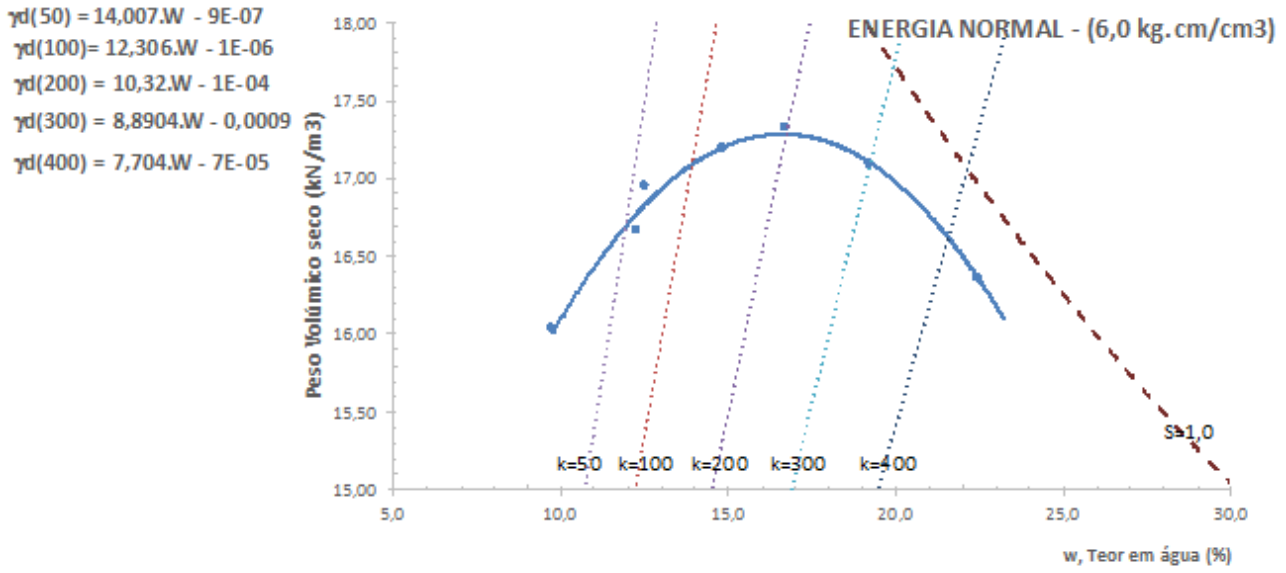


Figura 11 –Linhas de condutividade, para a Marga Amarela compactada na energia normal

Este procedimento repetiu-se para as restantes energias estudadas. Considerando as inclinações das retas que passam na origem e no ponto de cada curva onde a condutividade foi medida, constata-se que há uma variação na inclinação que é maior quanto maior for a condutividade. Esta relação mostra-se na Figura 12. Como referido antes, há contraste diferente para as inclinações para as várias energias, sendo os valores muito próximos para os pontos compactados com as energias E1, E2 e E3, mas diferentes entre si nas maiores energias, E4 e E5.

Sabendo que a condutividade aumenta com o teor em água da compactação, e que nos pontos ótimos obteve-se valores de k próximos de 190 μS/cm para as energias E1, E2 e E3, e de cerca de 77 e de 24 μS/cm para as energias E4 e E5, respetivamente, verifica-se pelo gráfico da Figura 12 que as inclinações medidas nos pontos do lado seco são muito próximas e independentes da energia de compactação. Este resultado indica haver uma maior influência da energia de compactação na condutividade elétrica no ramo húmido.

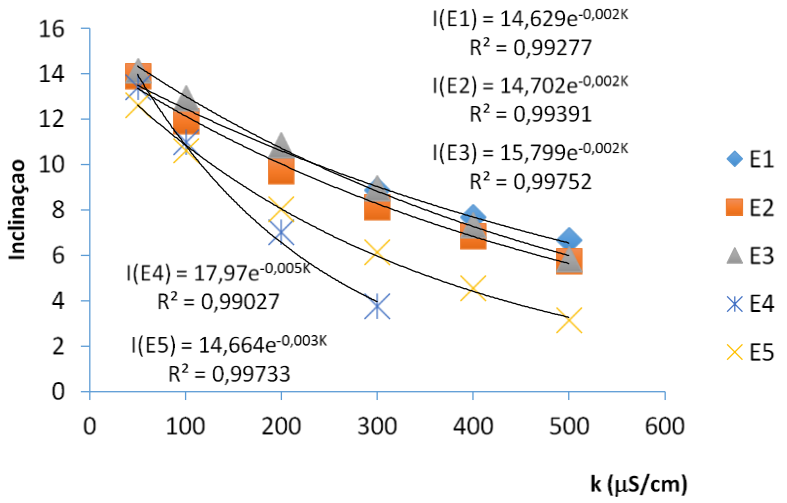


Figura 12 – Relação característica da inclinação das linhas de condutividade

Observa-se que as variações na inclinação das linhas de igual condutividade são proporcionais à condutividade. No limite, a inclinação será máxima para uma condutividade nula e, será mínima (zero) para uma condutividade infinita (teoricamente). Esta observação é concordante com as inclinações das curvas de igual condutividade da carta de condutividades apresentada na Figura 9.

Observa-se ainda que, no ponto ótimo (inflexão) das curvas de compactação, o valor da condutividade é bem distinto para cada energia. A Figura 13 apresenta graficamente as variações da condutividade elétrica nesse ponto ótimo (K_{ot}), com destaque para as três energias de compactação distintas E1, E4 e E5.

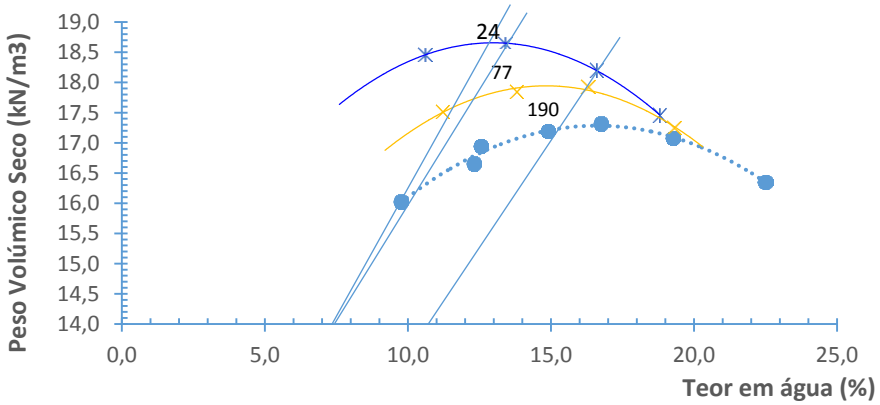


Figura 13 – Linhas de condutividade ótima, no ponto de inflexão das curvas de compactação

Se se considerarem os valores de condutividade medidos nos pontos ótimos de cada uma das curvas de compactação é possível obter uma relação linear para estas condutividades, tal como se apresenta na Figura 14.

Este resultado sugere que existirá uma única linha de condutividade a passar pelo ponto ótimo de cada curva de compactação. Se, com o aumento da energia de compactação, a curva de compactação move-se para cima e para a esquerda, espera-se que a inclinação da linha de condutividade ótima também aumente. Ou seja, quanto maior a energia de compactação, maior será a inclinação da linha de condutividade ótima e menor será a condutividade nesse ponto.

Acredita-se que o valor da "condutividade ótima" possa servir como referência para o controle em condições de campo desde que o teor em água seja conhecido. Foi realizado um último exercício ilustrativo para testar este método. Fixando a curva de compactação para a energia normal, admitiu-se o intervalo de compactação definido com grau de compactação entre 95% e 100% e os teores em água ótimo mais 2% e ótimo menos 2%. Esta área está identificada na Figura 15. Ainda nesta figura apresentam-se as linhas de igual condutividade que passam no ponto ótimo e nos limites superiores da área de interesse. O declive destas linhas foi definido a partir da primeira equação da Figura 10, para K(E1). Nesta figura incluíram-se também as curvas da carta de condutividades para mostrar que a sua sobreposição é aceitável.

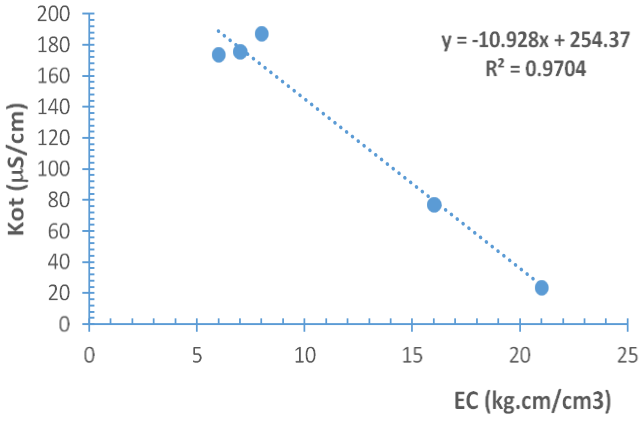


Figura 14 – Variação da condutividade ótima com a energia de compactação

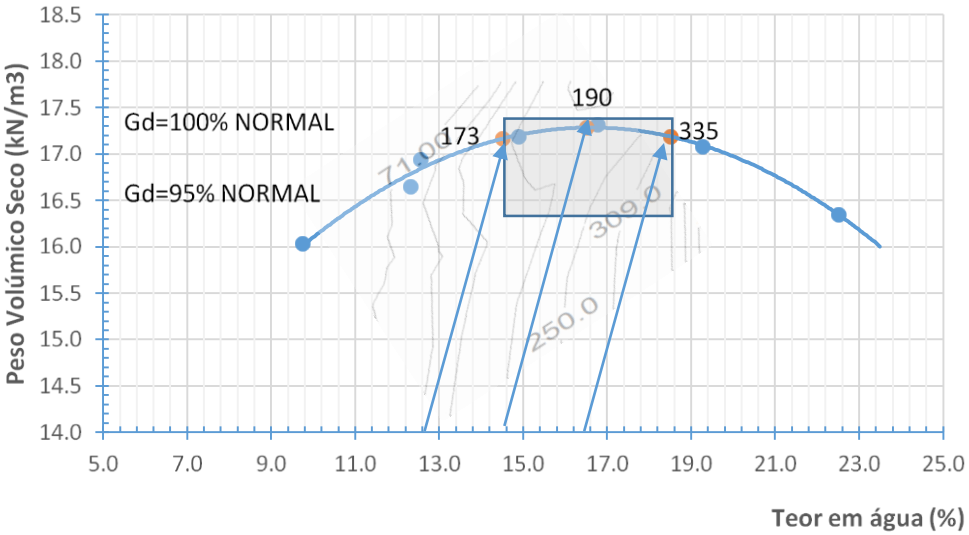


Figura 15 – Linhas de condutividade que delimitam uma área de interesse, em compactação com energia normal

Conclui-se, portanto, que este método para ser usado no campo, tem que se conhecer o valor da condutividade elétrica e o teor em água, que são medidos no local. Com estes valores obtém-se um ponto único numa das linhas de igual condutividade e com isso obtém-se o peso volúmico seco. Este ponto deverá estar no intervalo de compactação definido. De acordo com a Figura 15, se se medir uma condutividade de 190 μS/cm e teor em água de 16,5%, deve obter-se um peso volúmico seco de 17,29 KN/m^3. Este valor corresponde ao ponto ótimo e, neste caso, ao grau de compactação de 100%.

Diante das evidências, acredita-se que a metodologia usada para obtenção das linhas de condutividade para as Margas Amarelas, terá um nível de confiança satisfatório para as aplicações práticas.

5 - CONCLUSÃO

Os resultados da compactação dos solos em laboratório, obtidos pela medida de condutividade elétrica pelo método de dois elétrodos de placa, indicaram haver um alto grau de correlação entre a condutividade elétrica e os parâmetros de compactação (peso volúmico seco e teor em água). Com esta informação foi possível estabelecer linhas de igual condutividade em função das variações desses parâmetros. Tem-se apenas uma linha que passa pelo ponto ótimo do solo.

As linhas de igual condutividade foram obtidas por interpolação dos valores experimentais (cartas de resistividade) e deduzidas por ajuste numérico dos dados experimentais. As linhas de condutividade obtidas numericamente foram definidas como funções lineares partindo da origem do plano onde se definem as curvas de compactação. Verificou-se uma semelhança aceitável entre estes dois tipos de linhas.

Para usar a condutividade elétrica para controlo da compactação em campo é necessário conhecer o teor em água. Os dados experimentais indicam que é possível utilizar esta informação pois a este par de valores corresponde apenas um único peso volúmico seco. Este método, quando comparado com os mais tradicionais, tem a vantagem de permitir inúmeras determinações devido a maior rapidez com que pode ser realizado. Isso pode facilitar o controle permitindo uma verificação durante a compactação e estabelecendo os ajustes necessários para maior eficácia do processo.

AGRADECIMENTO

Este estudo foi financiado pela agência de fomento CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil.

REFERÊNCIAS

Aquino, F.R. (2010). Estudo Comparativo entre a Resistividade Elétrica e Características Geotécnicas de um Solo Argiloso Compactado. Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. 117p.

Archie, G.E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Petroleum Transactions of AIME, Vol. 146 (1), pp. 54-62.

Bai, W., Kong, L., e Guo, A. (2013). Effects of physical properties on electrical conductivity of compacted lateritic soil. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 5, pp. 406-411.

Cai, G. e Singh, D.N. (2015). Physical properties, electrical resistivity and strength characteristics of carbonated silty soil admixed with reactive magnesia. Canadian Geotechnical Journal, NPR Research Press Canada. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/279195826_Physical_properties_electrical_resistivity_and_strenght_characteristics_of_carbonated_soil_admixed_with_reactive_magnesia>. Acesso em 26 de outubro de 2015.

Cardoso, R. e Maranha das Neves, E. (2012). Hydro-mechanical characterization of lime-treated and untreated marls used in a motorway embankment. Engineering Geology, 133-134, pp. 76-84.

Dias, S. (2015). Electrical resistivity of compacted kaolin and its relation with suction. Tese de mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.

Especificação LNEC E-197 (1966). Solos. Ensaio de Compactação. LNEC.

Fallah-Safari, M. Hafizi, M.K., e Ghalandarzadeh, A. (2013). The relationship between clay geotechnical data and clay electrical resistivity. Bollettino de Geofisica Teorica ed Applicata, 54, pp. 23-38.

Hammad, A.H. (2013). Evaluation of soil-cement properties with electrical resistivity. Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia. Faculty of Graduate Studies Online Theses. Available at: https://dalspace.library.dal.ca/handle/10222/21920. Acesso em 01 de Agosto de 2015.

Hassan, A.A. (2014). Electrical resistivity method for water content characterisation of unsaturated clay soil. Durham Theses, Durham University. Available at Durham E-Theses on line: http://etheses.dur.ac.uk/10806/. Acesso em 01 de Agosto de 2015.

Kibria G., e Hossain, M.S. (2012). Investigation of geotechnical parameters affecting electrical resistivity of compacted clays. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 138, pp. 1520-1529.

Saarenketo, T., e Scullion, T. (1995). Using electrical properties to classify the strength properties of base course aggregates. Research Report 1341-2, Texas Transportation Institute and Texas A&M University.

Vaillant, J.M.M., Silva, L.A., e Tecianelli, G.R. (2015). Avaliação do grau de compactação do solo com uso da condutividade elétrica. Geotecnia, 134 – julho/2015, pp. 147-160.

Yamazaki, M.T. (2012). Influência da salinidade do fluído na avaliação da compactação e da resistividade elétrica de dois solos. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru. 141p.