

AVALIAÇÃO DO GRAU DE COMPACTAÇÃO DE SOLOS COM USO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Assessing the degree of compaction of soil using electrical conductivity

João Marcos Miranda Vaillant*

Laine Aparecida da Silva**

Guilherme Resende Tecianelli***

RESUMO – O estudo foi realizado com o objetivo de avaliar o grau de compactação de aterros rodoviários, contribuindo para dar agilidade na obtenção dos parâmetros de compactação no campo. Utilizou-se a medida de condutividade elétrica para estimativa da densidade seca máxima do solo no campo. Amostras aleatórias de solos finos de diferentes regiões próximas da capital do estado de Minas Gerais, Brasil, foram submetidas a ensaios de compactação em laboratório utilizando-se três diferentes energias. Foram tomadas medidas de corrente contínua a partir de uma tensão de 12V e obtidas assim a condutividade elétrica para cada densidade e umidade estudadas. Seguiu-se uma segunda bateria de ensaios de compactação com novas amostras de solo, para ampliar o horizonte dos dados obtidos e para verificação da repetibilidade dos resultados. As correlações obtidas entre os parâmetros de compactação com a condutividade elétrica apontaram para um padrão de comportamento cujas correlações poderão simplificar as técnicas para controle da compactação do solo no campo.

SYNOPSIS – The study was conducted to evaluate the degree of compaction of road embankments, helping to provide flexibility in obtaining the parameters of field compaction. The measurement of electrical conductivity was used to estimate the maximum dry density of the soil in the field. Five random samples of fine soils from different regions close to the state capital of Minas Gerais, Brazil, were subjected to compression tests in the laboratory using three different energies. DC measurements were taken from a voltage of 12V and thus obtained the electrical conductivity for each density and moisture studied. This was followed by a second round of compression tests with five new samples of soil, for expanding the data horizon and checking the result repeatability. The correlations between compaction parameters with electrical conductivity indicated a pattern of behaviour whose correlations could simplify the techniques for soil compaction in the field.

PALAVRAS CHAVE – Aterros, compactação, condutividade elétrica.

1 – INTRODUÇÃO

A verificação da efetividade da compactação do solo no campo, chamada controle de compactação, é feita a partir do conhecimento da umidade e do peso específico aparente do material (DNIT, 2006). Para essas medidas no campo são utilizados métodos conhecidos como o “speedy” (DNER ME 052/94) para a umidade, e “frasco de areia” (NBR 7185/86) para o peso específico.

* Professor do Departamento de Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. jmvaillant@gmail.com

** Bolsista do Programa de Iniciação Científica Junior do CEFET-MG. lainesilva1995@yahoo.com.br

*** Bolsista do Programa de Iniciação Científica Junior do CEFET-MG. guih.tec@gmail.com

O método speedy para determinação da umidade do solo requer um equipamento específico, de custo relativamente alto além de material de consumo, cápsulas de carbureto, o que eleva ainda mais o custo de utilização. O método do frasco de areia tem a desvantagem de consumir muito tempo na sua realização, o que se traduz também em alto custo operacional e, por vezes, é substituído pelo método do cilindro cortante (NBR 9813/87), que confere um pouco mais de agilidade ao processo.

Na determinação do grau de compactação é também requerida a realização de ensaios prévios de compactação em laboratório com o material de campo. Percebe-se, portanto, que o controle da compactação do solo no campo envolve alto consumo de tempo, pessoal e equipamentos. Assim sendo, a adoção de métodos indiretos, de eficácia comprovada, para obtenção de parâmetros de compactação de solos teria importância vital no contexto geotécnico.

Sabe-se que existem relações entre a condutividade elétrica tanto com a umidade quanto com a densidade dos solos (McCarter e Desmazes, 1997; Girotto e Santos, 2002; Samouëlian *et al.*, 2005; Chic e Islam, 2011). Então, deve ser possível estabelecer uma relação matemática da condutividade com os parâmetros de compactação.

Nesta pesquisa estudou-se a possibilidade de avaliar o grau de compactação do solo por meio de uma medida indireta, no sentido de tornar o processo mais eficaz do ponto de vista do consumo de tempo e gastos financeiros.

2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Cada material ou elemento específico possui uma propriedade ou característica elétrica que o diferencia dos demais. Entre outras, a condutividade elétrica indica a capacidade que o material apresenta de permitir o fluxo de corrente, independentemente das suas dimensões (Girotto e Santos, 2002). Assim, nesse contexto, passa a ter um papel importante na caracterização dos materiais.

Segundo Pacheco (2004), os solos apresentam uma combinação de diversos fenômenos de condução. Pode-se afirmar que se trata basicamente de apenas dois tipos: a condução eletrônica, que ocorre em alguns solos constituídos de minerais condutores, e a condução eletrolítica, que ocorre devido a migração de íons dissolvidos na água intersticial, sendo esta última a que apresenta maior influência no valor da condutividade elétrica. Então, devido às suas características elétricas, os solos obedecem a Lei de Ohm (Eq. 1) e, assim, a determinação da sua condutividade elétrica se torna mais simplificada.

$$V = \frac{R}{I} \quad (1)$$

V – diferença de potencial ou tensão elétrica aplicada, em Volts (V);

R – resistência elétrica do material, em Ohms (Ω);

I – corrente elétrica que flui pelo material, em Amperes (A).

A condutividade elétrica dos solos depende, entre outros fatores, da quantidade e qualidade da água intersticial e da densidade aparente do solo (Pacheco, 2004; Abu-Hassanein *et al.*, 1996; Aquino, 2005). Assim, o teor de umidade, grau de saturação e índice de vazios são os principais índices físicos dos solos que influenciam a sua condutividade elétrica.

Assim, as diferentes condições de compactação dos solos resultarão em diferentes medidas da condutividade elétrica. Um solo mais denso, isto é, com menor índice de vazios, apresentará um menor valor da sua condutividade elétrica (Abu-Hassanein *et al.*, 1996). Por outro lado, esses autores também observaram que para cada tipo de solo poderá haver uma relação direta da

condutividade com o grau de saturação e que esta relação é independente da energia de compactação aplicada.

Existe, portanto, uma certa complexidade nas relações da condutividade elétrica com os índices físicos dos solos. Assim, o método a ser utilizado para aquela medida terá uma enorme importância nas análises.

O método mais comum e de mais fácil utilização na medida da condutividade elétrica é conhecido como “método de duas pontas ou de dois elétrodos”. Ele deve ser aplicado para o caso de materiais ôhmicos (puramente resistivos), e quando se conhece com precisão as dimensões do material (Giroto e Santos, 2002). Esse método consiste na medida da corrente elétrica que passa pelo material quando lhe é aplicado uma diferença de potencial (tensão).

A grandeza inversa à condutividade elétrica (σ) é a resistividade (ρ) e, usar uma ou outra é indiferente. No sistema SI, a unidade para a resistividade é o ohm.m ($\Omega.m$) e para a condutividade elétrica é o Siemens/m (S/m), ou ainda, mho/m. Então, a condutividade elétrica de um sólido pode ser expressa conforme a Eq. 2.

$$\sigma = \frac{I.L}{A.V} \quad (2)$$

I – corrente elétrica que flui pelo material, em Amperes (A);

L – altura do corpo de prova, em cm;

A – área da seção transversal do corpo de prova, em cm²;

V – diferença de potencial aplicada (tensão), em volts.

Samouëlian *et al.* (2005) mencionam que em muitos estudos de campo foi constatado que a resistividade do solo diminui drasticamente para aumentos de umidade volumétrica que ocorrem até 15% e, a partir daí, a resistividade não terá alterações significativas, sendo relativamente constante (Fig. 1).

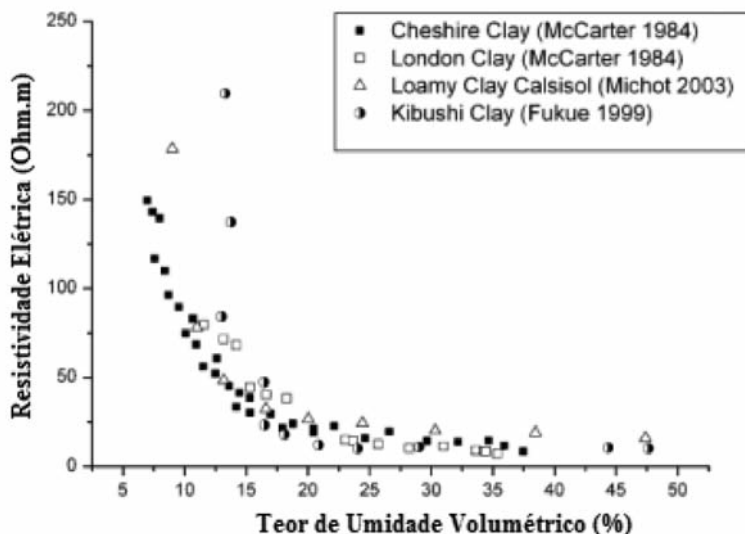


Fig. 1 – Relação da umidade com a resistividade elétrica para diferentes tipos de solos (Samouëlian *et al.*, 2005).

Chic e Islam (2011), estudando os efeitos da compactação dos solos sobre a resistividade elétrica, encontraram o mesmo comportamento desse parâmetro com a umidade gravimétrica (Fig. 2). Neste figura também pode ser observada a influência da densidade seca na condutividade das amostras de solo.

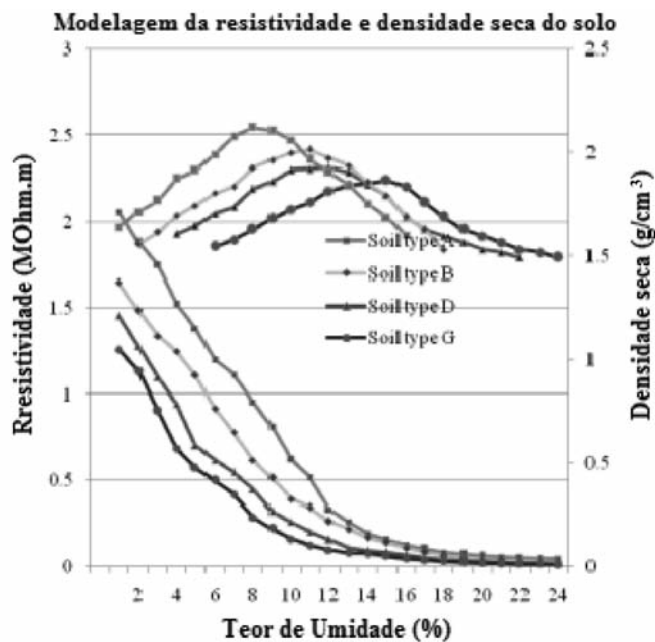


Fig. 2 – Relações da resistividade elétrica com a densidade seca máxima e o teor de umidade para diferentes solos (Chic e Islam, 2011).

As mesmas tendências de comportamento da umidade e densidade em relação à resistividade elétrica foram encontradas nos estudos de Kibria e Hossain (2012) e Bai *et al.* (2013), como atestam as Figs. 3 e 4, respectivamente.

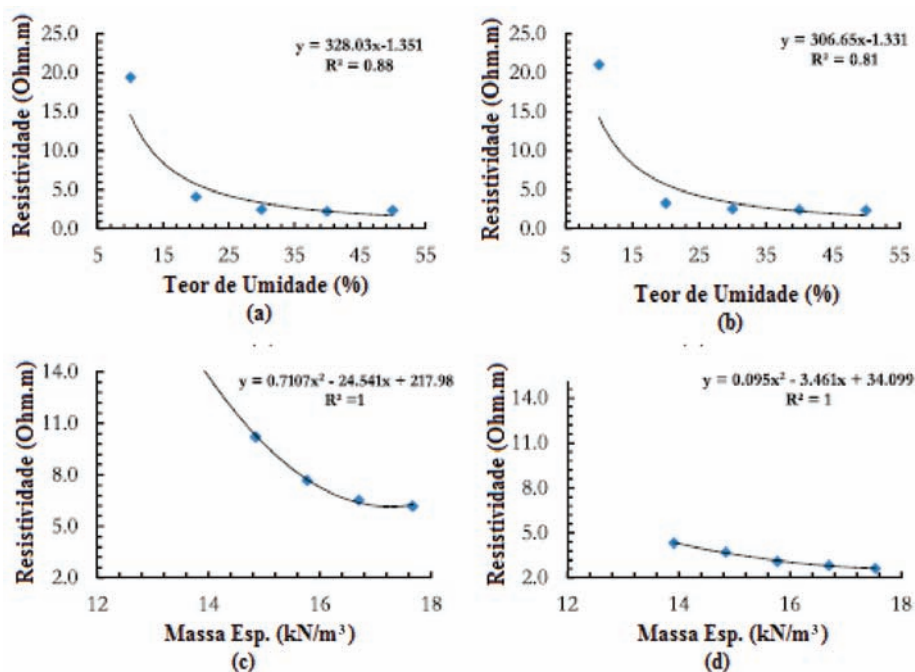


Fig. 3 – Variações da resistividade elétrica com a umidade (a e b) e com a massa específica aparente (c e d) (adaptado de Kibria e Hossain, 2012).

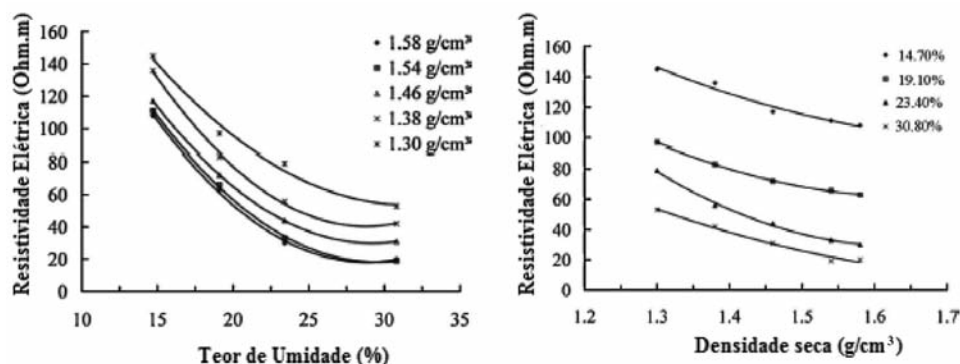


Fig. 4 – Variações do teor de umidade e da densidade seca com a resistividade elétrica (adaptado de Bai *et al.*, 2013).

3 – METODOLOGIA

Adotou-se um programa experimental que partiu da coleta e caracterização de amostras compreendendo um espectro de solos da região central do estado de Minas Gerais, estudados para fins rodoviários pelo Departamento de Estradas de Rodagem (DER-MG). Os locais de coleta das amostras estão próximos das cidades de Barbacena, Itabira, Ipoema, Juiz de Fora, Nova União, Pedro Leopoldo e Sete Lagoas, conforme indicado no mapa da Fig. 5.

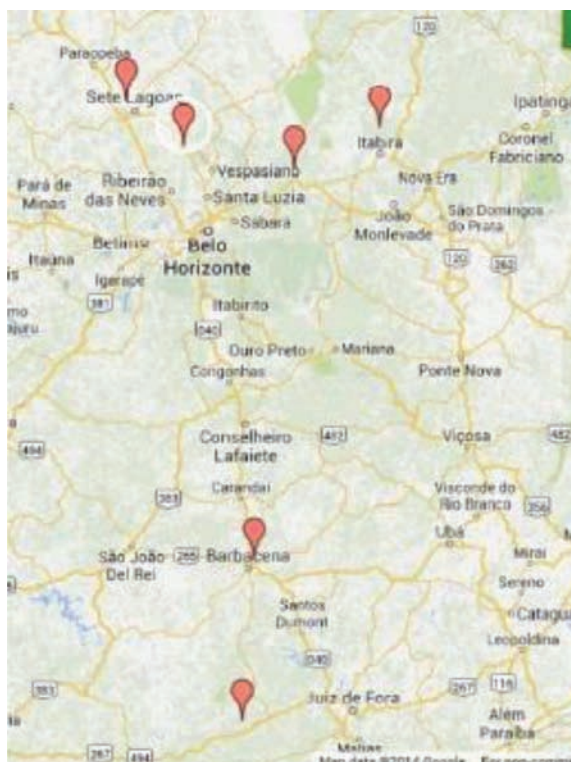


Fig. 5 – Localização das amostras de solo utilizadas no estudo.

Em princípio foram trabalhadas cinco amostras de solo fino fornecidas pelo DER-MG, cuja caracterização consistiu de ensaios de granulometria, densidade do grão, plasticidade e compactação.

A condutividade elétrica do solo foi medida ao final de cada ensaio de compactação (NBR 7182/1986) nas três energias do Proctor (Normal, Intermediário e Modificado) para associar o valor medido com os níveis de umidade e densidade do solo. Essas medidas foram realizadas por meio de equipamento simples consistindo de gerador de tensão contínua de 12V (bateria) e elétrodos de placa de cobre, com 1 mm de espessura, colocados na extremidade das amostras, conforme esquema mostrado na Fig. 6.

A fonte de tensão utilizada foi uma bateria selada para *no break* de 12V, marca Nitro Power, adquirida no mercado (Fig. 7). Os elétrodos foram construídos a partir do corte de duas placas de cobre quadradas, com 10 cm de lado. Os fios e as ponteiros foram adquiridos junto com a bateria no mercado local a custos desprezíveis.

A leitura da corrente foi realizada com um amperímetro analógico de bancada, para medida de corrente contínua (DC), modelo GANZ HDA-2. Sabendo da influência da pressão exercida pelo elétrodo na intensidade da corrente elétrica (Newlands *et al.*, 2008), foi colocado um peso de 1,0 kg, devidamente isolado, sobre a placa do elétrodo de topo no intuito de garantir uma pressão constante sobre as amostras em todas as leituras. A Fig. 7 mostra o esquema de leitura.

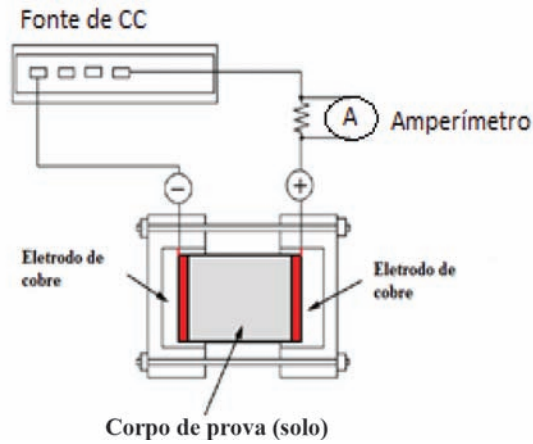


Fig. 6 – Esquema para leitura de resistência elétrica do solo compactado (adaptado de Oh e Jang, 2004).



Fig. 7 – Esquema para a leitura da corrente elétrica do solo compactado.

Assim, a partir da leitura da corrente elétrica (I) obtida no amperímetro, e conhecendo-se a tensão aplicada (V), a altura (L) e a área de contato do eletrodo com a amostra (A), é possível determinar a condutividade elétrica do material utilizando-se a Eq.2.

Desse modo, as variações impostas na umidade e na densidade poderão ser correlacionadas com a condutividade elétrica do solo compactado. As medidas de condutividade elétrica em condições extremas do solo, ou seja, no seu estado de umidade higroscópica e de saturação, não foram possíveis, pois não se consegue compactar o solo nessas condições.

Em uma segunda etapa, foram ensaiadas outras seis amostras de localidades diferentes para verificação da repetibilidade dos resultados e para ampliar o horizonte dos dados obtidos. Essas amostras foram compactadas apenas na energia do Proctor Normal.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios de compactação estão representados no Quadro 1 para todas as amostras estudadas, indicando o valor da condutividade elétrica para aquela condição.

A partir dos ensaios realizados com as amostras na primeira etapa, observou-se uma correlação entre a massa específica seca máxima ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e umidade ótima ($W_{\acute{o}t}$), independente da energia de compactação. Doravante o termo densidade será usado no lugar da massa específica, para simplificar a escrita.

Quadro 1 – Valores característicos dos parâmetros de compactação (energia normal) e da condutividade elétrica ($\mu S/cm$).

#	Solos	ENERGIA NORMAL			ENERGIA INTERMEDIÁRIA			ENERGIA MODIFICADA		
		$W_{\acute{o}t}$ (%)	γ_d (g/cm^3)	K ($\mu S/cm$)	$W_{\acute{o}t}$ (%)	γ_d (g/cm^3)	K ($\mu S/cm$)	$W_{\acute{o}t}$ (%)	γ_d (g/cm^3)	K ($\mu S/cm$)
1	AG	24,0	1,54	37	-	-	-	-	-	-
2	AM	23,6	1,63	36	-	-	-	-	-	-
3	IP1	25,6	1,38	38	-	-	-	-	-	-
4	IP2	29,0	1,36	63	-	-	-	-	-	-
5	IP6	26,0	1,40	28	-	-	-	-	-	-
6	IP7	25,6	1,32	54	-	-	-	-	-	-
7	AAM	25,0	1,56	55	20	1,62	70	19	1,64	28
8	AVM	19,0	1,64	17	12	1,78	8	15	1,81	6
9	LD	24,0	1,52	25	21	1,62	24	18	1,68	12
10	D135	16,0	1,66	11	15	1,76	20	13	1,80	19
11	SAV	20,0	1,55	8	16	1,64	16	14	1,76	6

Esta correlação é linear e está representada no gráfico da Fig. 8, onde está delimitada pelas faixas de erro de 5%. Os dados do gráfico referem-se a 21 resultados obtidos a partir das 11 amostras de solo estudadas, sendo cinco delas compactadas nas três energias de compactação e as outras seis amostras compactadas apenas na energia normal.

Nesta relação existem reduções proporcionais na densidade seca máxima para aumentos da umidade ótima do solo. Portanto, caso seja confirmado em futuras pesquisas, esse fato pode ser importante na previsão do grau de compactação de aterros, pois seria, junto com a condutividade elétrica, uma relação a mais para aferição. Assim, a determinação da densidade seca no campo seria obtida de forma indireta e mais rápida, portanto.

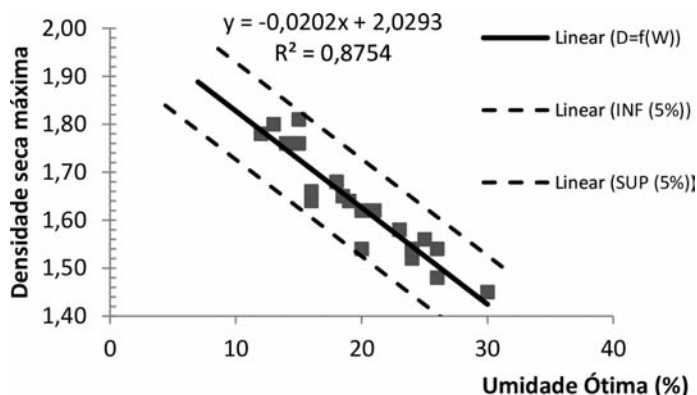


Fig. 8 – Relação entre densidade seca máxima e teor de umidade ótimo das amostras estudadas.

As medidas de condutividade elétrica, por outro lado, quando relacionadas aos parâmetros de compactação dos solos mostram, igualmente, padrões de comportamento que permitem correlacionar as variáveis por meio de uma função matemática. As Figs. 9 e 10 mostram as correlações de condutividade obtidas respectivamente com a densidade seca máxima (polinomial) e a umidade ótima (linear). Neste conjunto de dados acrescentou-se os valores obtidos no estudo de Aquino (2005) no sentido de aferir seu comportamento, mesmo sendo utilizada uma metodologia diferente na obtenção desses dados.

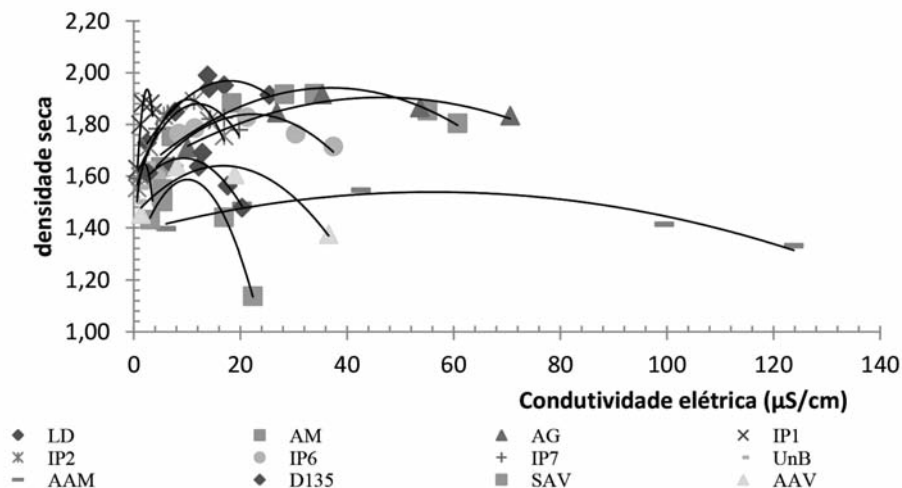


Fig. 9 – Relações da condutividade elétrica com a densidade seca.

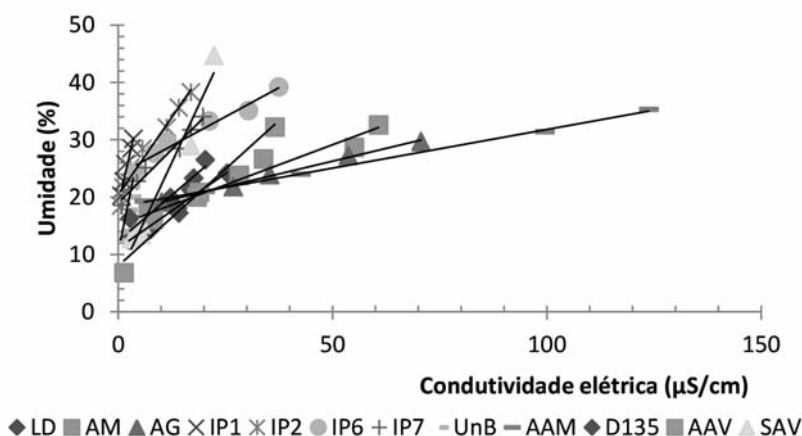


Fig. 10 – Relações da condutividade elétrica com a umidade ótima.

Consequentemente, a partir dessas relações pode-se obter a condutividade elétrica associada aos parâmetros de compactação (densidade seca máxima e umidade ótima). Essas relações, no entanto, apresentaram-se dispersas para o conjunto dos dados obtidos. Apenas o conjunto das cinco amostras com maior teor de finos ($\geq 60\%$) indicou haver alguma correlação, conforme pode ser visto no gráfico da Fig. 11.

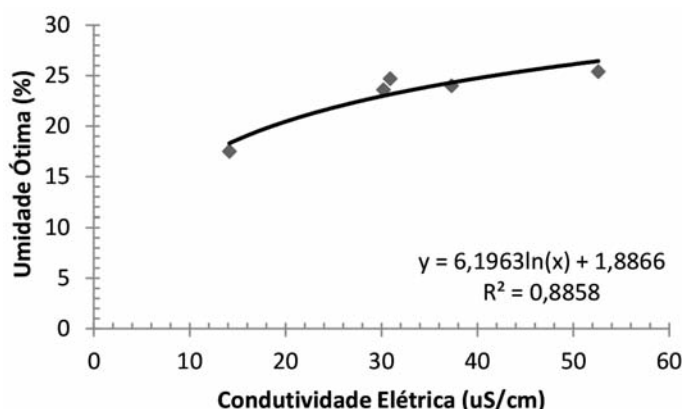


Fig. 11 – Relação da condutividade elétrica com a umidade ótima para solos finos.

No entanto, a reta de regressão da umidade *versus* condutividade, que doravante será chamada de “reta de condutividade”, denota uma relação mais consistente. Observou-se que existe uma relação entre os coeficientes da equação da reta com os parâmetros de compactação de cada um deles. Para o coeficiente linear (B) da reta de condutividade os resultados mostraram-se mais promissores, como pode ser visto nos gráficos das Figs. 12 e 13. Esse coeficiente doravante será chamado de “coeficiente de condutividade”.

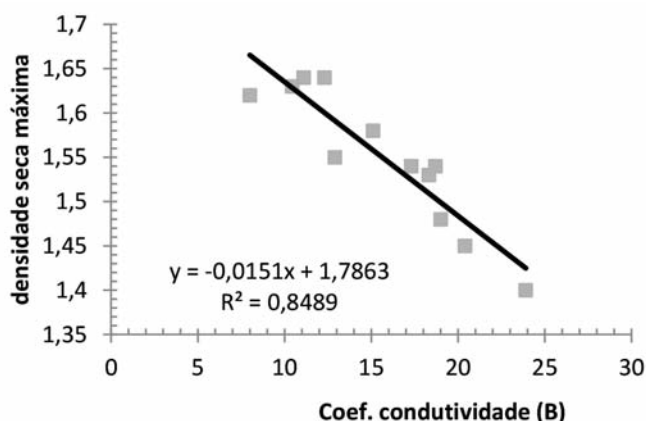


Fig. 12 – Relações do coeficiente de condutividade com a densidade seca máxima.

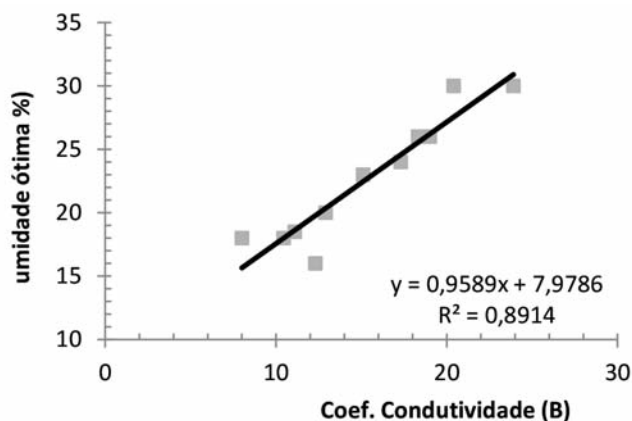


Fig. 13 – Relações do coeficiente de condutividade com a umidade ótima.

O Quadro 2 apresenta um comparativo entre os resultados experimentais e aqueles calculados a partir das relações matemáticas da condutividade, para as amostras estudadas. Ressalta-se que os valores da densidade seca máxima assim obtidos, são perfeitamente aferidos a partir da reta de regressão da Fig. 8.

Acredita-se, portanto, que a partir dos modelos matemáticos representados nas Figs. 12 e 13 seja possível uma estimativa consistente dos parâmetros de compactação do solo utilizando apenas a medida da condutividade elétrica do solo compactado. Essa medida pode, naturalmente, ser realizada em campo sobre uma amostra indeformada.

É preciso ressaltar que as curvas de referência apresentadas aqui foram determinadas apenas para onze amostras aleatórias de solos compactados na energia do Proctor Normal. Trata-se, portanto, de uma pesquisa piloto em que foi encontrada uma forte tendência de correlação, mas, no entanto, será necessário um maior número de resultados para aferir mais adequadamente as correlações demonstradas. Portanto, o estudo está apenas na fase inicial da elaboração de um grande banco de dados dos solos do estado de Minas Gerais.

Quadro 2 – Comparativo entre os valores experimentais e previstos pelas relações matemáticas observadas.

Amostras	Coef. linear	Valores experimentais		Valores previstos	
	(B)	W _{ót}	γ _d	W _{ót}	γ _d
AM	15,10	23,0	1,58	22,5	1,558
AG	17,30	24,0	1,54	24,6	1,535
LD	11,10	18,5	1,64	18,6	1,618
IP1	18,70	26,0	1,54	25,9	1,504
IP2	20,40	30,0	1,45	27,6	1,478
IP6	23,90	30,0	1,40	30,9	1,435
IP7	19,00	26,0	1,48	26,2	1,499
UnB	10,44	18,0	1,63	18,0	1,628
AAM	18,32	26,0	1,53	25,6	1,509
MG135	11,80	16,0	1,64	19,8	1,600
AAV	8,0	18,0	1,63	15,7	1,665
SAV	12,9	20,0	1,55	20,4	1,591

Então, a densidade seca do solo poderá ser obtida no campo a partir da extração de uma amostra indeformada e, com a medida da condutividade elétrica conforme ilustrado na Fig. 7. Este valor da condutividade elétrica, juntamente com a umidade determinada, fornecerão o coeficiente de condutividade (B) que, por sua vez, será usado para a estimativa dos parâmetros de compactação do solo. Estes valores, densidade seca máxima e teor de umidade ótimo, ainda poderão ser aferidos pela equação que os relaciona (Fig. 8). Assim, obtendo-se a relação entre a densidade seca máxima de laboratório e a densidade seca obtida no campo, estabelece-se o grau de compactação apresentado pelo solo, conforme a Equação 3.

$$GC (\%) = \frac{\gamma_{d\text{campo}}}{\gamma_{d\text{laboratório}}} \quad (3)$$

Vale ressaltar que a umidade da amostra extraída em campo poderia ser estimada a partir da sua reta de condutividade (Fig. 10). Porém, a determinação da umidade no campo é tarefa fácil e pode auxiliar na melhor precisão da estimativa, ou seja, minimiza o erro embutido nas regressões.

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados dos testes sinalizam para a existência de um padrão de comportamento nas relações entre os parâmetros de compactação do solo e a sua condutividade elétrica. Desse modo, acredita-se que é possível obter em campo uma estimativa indireta e rápida dos parâmetros de compactação do solo e, também, do grau de compactação de aterros de estradas, barragens, edificações, etc.. Para o grau de compactação seria suficiente a retirada de uma amostra indeformada do solo compactado a partir de equipamentos existentes para essa finalidade.

Esse método traz uma redução substancial no tempo gasto para determinação do grau de compactação do solo no campo, pois elimina o processo do frasco de areia para obtenção da densidade seca. Além disso, a determinação da umidade em campo pelos métodos expeditos convencionais deverá ser utilizada para melhor aferir o valor da densidade seca obtido na curva de referência.

Na medida em que novos estudos sejam realizados com novas amostras de solo, os resultados poderão confirmar as tendências e conferir maior confiabilidade às correlações encontradas nesse estudo, além de maior precisão. Desse modo vislumbra-se com certo otimismo a possibilidade de obtenção dos parâmetros de compactação contando apenas com dois pontos de umidade de compactação.

A Fig. 14 apresenta a chave para esta obtenção a partir da reta experimental de condutividade do solo e das retas modeladas a partir do coeficiente de condutividade B.

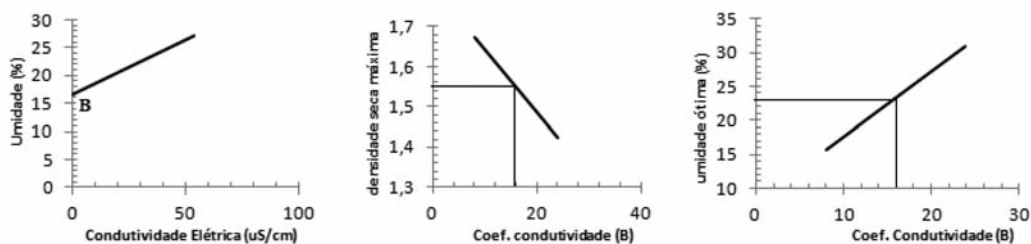


Fig. 14 – Relações do coeficiente de condutividade com a umidade ótima.

6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DER-MG) e à Cerâmica Jacarandá pelo fornecimento das amostras dos solos utilizados na pesquisa. Agradecimentos especiais são dirigidos à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo fomento às pesquisas de iniciação científica júnior realizadas no CEFET-MG.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abu-Hassanein, Z.S.; Benson, C.H.; Blotz, L.R. (1996). *Electrical resistivity of compacted clays*. Journal of Geotechnical Engineering, v. 122, nº 5, pp. 397-406.
- Aquino, F.R. (2005). *Estudo comparativo entre a resistividade elétrica e características geotécnicas de um solo argiloso compactado*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 117 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 7182 (1986). *Solo – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 7185 (1986). *Solo – Determinação da massa específica aparente, “in situ”, com emprego do frasco de areia*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 9813 (1987). *Solo – Determinação da massa específica aparente in situ, com emprego do cilindro de cravação*. Método de ensaio. Rio de Janeiro.

- Bai, W.; Kong, L.; Guo, A. (2013). *Effects of physical properties on electrical conductivity of compacted lateritic soil*. J. Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, v.5, pp. 406-411.
- Chic, Z.; Islam, T. (2011). *Study of chemical effects on soil compaction characterizations through electrical conductivity*. International Journal of Electrochemical Science. v. 6, pp. 6733-6740.
- DNIT (2006). Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisas. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. *Manual de Pavimentação*. 3ª ed., Rio de Janeiro.
- DNER ME 052/94 (2004). *Solos e agregados miúdos – determinação da umidade com emprego do “Speedy”*. Norma Rodoviária. Método de Ensaio, pp.01-04.
- Giroto, E.M., Santos, I.A. (2002). *Medidas de resistividade elétrica DC em sólidos: como efetuarlas corretamente*. Quim. Nova, Vol. 25, No. 4, pp. 639-647.
- Kibria, G.; Hossain, M.S. (2012). *Investigation of geotechnical parameters affecting electrical resistivity of compacted clays*, J. Geotech. Geoenviron. Eng., 138(12), 1520-1529.
- McCarter, W.J.; Desmazes, P. (1997). *Soil characterization using electrical measurements*. Géotechnique, v. 47, N° 1, pp. 179-183.
- Newlands, M.D.; Jones, M.R.; Kandasami, S.; Harrison, T.A. (2008). *Sensitivity of electrode contact solutions and contact pressure in assessing electrical resistivity of concrete*. Materials and Structures. v. 41. pp. 621-632.
- Oh, B.H.; Jang, S.Y. (2004). *Prediction of diffusivity of concrete based on simple analytic equations*. Cement and Concrete Research. v. 34, pp. 463-480.
- Pacheco, A.O. (2004). *Aplicação do cone resistivo em solos saturados*. Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 150p.
- Samouëlian, A.; Cousin, I.; Tabbagh, A.; Bruand, A.; Richard, G. (2005). *Electrical resistivity survey in soil science: a review*. Soil & Tillage Research, v. 83, pp. 173-193.