MÉTODO APLICADO NA OBTENÇÃO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE AMOSTRAS DE SOLO EM LABORATÓRIO

METHOD APPLIED TO OBTAIN ELECTRIC RESISTIVITY FROM SOIL SAMPLES IN LABORATORY

Fernando Rodrigo de Aquino
Bruno Carrilho de Castro
André Luiz Oliveira Arantes

RESUMO

A aplicação de métodos geofísicos na engenharia civil apresenta grande potencial, podendo ser utilizados como ferramenta na determinação de propriedades e parâmetros geotécnicos, fundamentais na elaboração e execução de projetos. A resistividade elétrica, em especial, tem sido utilizada como método de investigação geotécnica, contudo, sua aplicação em larga escala carece de estudos mais aprofundados que permitam relacionar seus resultados com aqueles fornecidos pelos métodos diretos, amplamente empregados. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta a fundamentação teórica relacionada com a resistividade elétrica, com ênfase no comportamento resistivo dos solos, em seguida é apresentado o equipamento desenvolvido para a determinação da resistividade elétrica em corpos de prova moldados em laboratório, bem como a metodologia empregada na realização dos ensaios de resistividade elétrica, a variação da resistividade elétrica em função do líquido intersticial, do contato entre o corpo de prova e os polos de aplicação de corrente elétrica, além da variação dos resultados obtidos em função das características das amostras analisadas: tamanho das partículas, do peso específico e da umidade volumétrica. Como resultados observou-se que a condutividade do líquido intersticial é fundamental no resultado obtido, o contato entre a amostra e o sistema de aplicação de carga deve se dar por meio de gel eletro condutor e a resistividade elétrica varia, principalmente, em função da umidade volumétrica, apresentando relação com o peso específico e o tamanho das partículas.

Palavras Chaves: Resistividade Elétrica, Laboratório, Investigação Geotécnica.

ABSTRACT

The application of geophysical methods in civil engineering has great potential, and can be used as a tool in determining properties and geotechnical parameters, which are fundamental in the design and execution of projects. Electrical resistivity, in particular, has been used as a method of geotechnical investigation, however, its application on a large scale lacks further studies that allow to relate its results with those provided by direct methods, widely used. In this context, the present work presents the theoretical foundation related to electrical resistivity, with emphasis on the resistive behavior of soils, followed by the equipment developed for the determination of electrical resistivity in test specimens molded in the laboratory, as well as the methodology employed when conducting electrical resistivity tests, the variation of electrical resistivity as a function of the interstitial liquid, the contact between the specimen and the poles for applying electric current, in addition to the variation of the results obtained depending on the characteristics of the analyzed samples: size particles, specific weight and volumetric humidity. As results it was observed that the conductivity of the interstitial liquid is fundamental in the obtained result, the contact between the sample and the load application system must take place through electrically

conductive gel and the electrical resistivity varies, mainly, depending on the humidity volumetric, showing relation to the specific weight and the size of the particles.

Keywords: *Electrical Resistivity, Laboratory, Geotechnical Investigation.*

1. Introdução

Nos últimos anos vem crescendo muito o estudo de técnicas modernas de investigação geofísicas, que possibilitem medições de propriedades do solo de maneira indireta. Nestes estudos, em geral, propriedades específicas do solo são medidas e sobre o resultado é feita uma interpretação, objetivando chegar a conclusões sobre o estado do maciço analisado. A medida da resistividade elétrica do solo surge como um bom exemplo de medição indireta. O objetivo é perceber características do perfil geotécnico, medindo-se a resistividade elétrica do meio.

No entanto para uma aplicação correta desta técnica na avaliação de maciços de solo ou até mesmo para processos de controle de compactação, é necessário possuir conhecimento suficiente para poder interpretar os resultados, como por exemplo, a forma como a resistividade elétrica do solo se comporta frente às variações de suas características físicas tais como densidade, umidade e grau de saturação entre outras.

Dentro deste contexto, o presente trabalho apresenta uma técnica e seus procedimentos para medição da eletrorresistividade de solos compactados em laboratório e avalia de forma inicial, o comportamento da resistividade elétrica de um solo argiloso compactado característico do Distrito Federal frente às variações de suas características físicas. Espera-se que esta técnica tal como o entendimento do comportamento da eletrorresistividade, possa subsidiar sua utilização futura em campo como uma alternativa no controle e avaliação de maciços de solo.

2 . Revisão Bibliográfica

Neste item são apresentados os conceitos básicos da resistividade elétrica, os princípios físicos que envolvem o cálculo da mesma, os métodos de aquisição de dados e alguns estudos que a empregam na área de geotecnia.

2.1 Aspectos Gerais da Geofísica

A resistividade elétrica é um método de aquisição de dados inserida no campo da geofísica. A geofísica, por sua vez, é a ciência que se dedica a estudar a Terra por meio da aplicação de princípios da física, realizando medidas na superfície ou próximas a ela, detectando anomalias que se correlacionam com a distribuição interna das propriedades físicas do planeta (Kearey, 2009).

Ainda segundo Kearey (2009), a geofísica apresenta o problema da ambiguidade na interpretação dos dados adquiridos. Isso se dá por não se conhecer exatamente as estruturas internas e as propriedades físicas das camadas que compõem a Terra. Assim, quaisquer medidas realizadas não podem ser interpretadas direta e inequivocamente.

Evidentemente, as técnicas de aquisição de dados procuram minimizar o problema da ambiguidade, contudo, é impossível eliminar todas as incertezas e a resposta para um dado problema geofísico é sempre um conjunto de possibilidades (Kearey, 2009).

Segundo Kearey (2009), o trabalho do geofísico é, em síntese, a aquisição de informações, sua filtragem e a elaboração de um produto que será a ferramenta para a

realização de um dado estudo. As informações adquiridas normalmente são em formas de ondas, que podem ser traduzidas na forma de equações. Cabe ao geofísico distinguir os sinais dos ruídos captados no processo, evitando sua interferência no resultado final.

2.2 Princípios Físicos da Resistividade Elétrica

Segundo Halliday et al. (2009), ao se aplicar uma diferença de potencial entre dois pontos de um dado material é induzida a passagem de corrente elétrica. Nessa corrente, o fluxo de elétrons é prejudicado pela resistência elétrica.

A resistência elétrica depende da área da seção transversal pelo qual o fluxo de corrente irá atravessar, do comprimento percorrido e também da resistividade do material. A resistividade elétrica, por sua vez, é a propriedade utilizada para descrever o quão resistivo é um material, pois ela não depende das dimensões do material (Halliday et al., 2009).

Assim se pode dizer: a corrente elétrica ao atravessar um meio qualquer provoca no mesmo o surgimento de uma resistência denominada resistividade. A resistividade promove um empecilho à passagem da corrente e pode ser representada pela letra “ρ” e é definida, considerando um cilindro condutor de resistência “R”, com comprimento “L” e área de seção transversal “A”, pela Equação 1.

$$\rho = \frac{\mathrm{RA}}{\mathrm{L}} \qquad \text{(Equação 1)}$$

Segundo Halliday et al. (2009), a resistividade é definida pelo Sistema Internacional (S.I) em Ohm.m e seu inverso, a condutividade é definida em Siemens por metro ($S.m^{-1}$). A Figura 1 apresenta um diagrama representativo utilizado na definição física da resistividade.

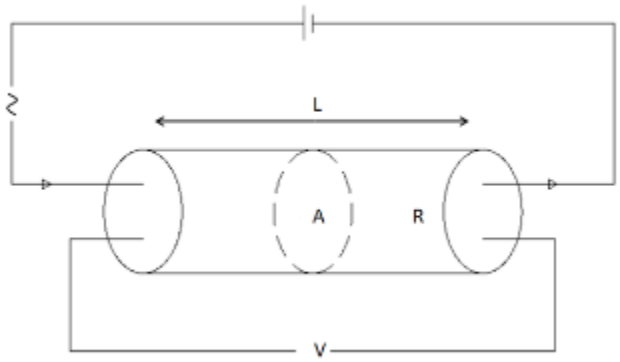


Figura 1 – Diagrama elétrico para auxiliar na definição da resistividade elétrica.

Segundo Mcneill (1980), materiais heterogêneos como o solo apresentam grande variabilidade em relação à resistividade, isso porque essa propriedade depende de vários fatores, como a presença de fratura nas rochas, umidade e presença de moléculas condutoras dissolvidas na água, entre outros. A seguir são listados os principais fatores dos quais depende a resistividade do solo:

- ✓ Porosidade: quantidade, forma e tamanho dos poros, passagens e interconexões;
- ✓ Peso específico;
- ✓ Quantidade dos poros preenchidos por água;
- ✓ Concentração de sólidos dissolvidos na água;
- ✓ Temperatura e estado físico da água nos poros;

- ✓ Composição mineralógica dos cristais e grãos minerais;
- ✓ Concentração e composição dos coloides.

A Figura 2 apresenta intervalos de valores de resistividade e condutividade tipicamente atribuídos a diferentes materiais componentes do subsolo.

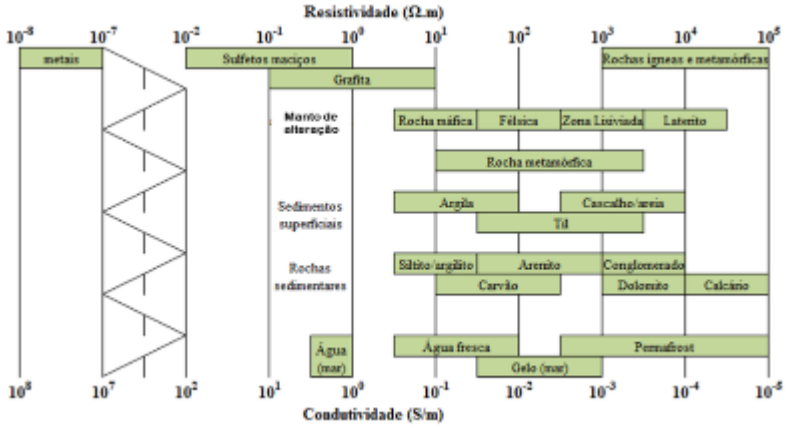


Figura 2 - Intervalos de valores típicos para materiais componentes do subsolo (Telford et al., 1990).

A grande variação da resistividade para um mesmo tipo de material pode ser explicada pelas condições em que esse material se encontra. Como exemplo pode-se citar um granito, que em sua condição íntegra apresenta elevada resistividade, contudo, se fraturado e com as fraturas preenchidas por água, sais ou com alto conteúdo de sólidos totais dissolvidos apresenta resistividade significativamente menor.

Ainda de acordo com Mcneill (1980), a condutividade apresenta uma relação de proporcionalidade exponencial com a umidade volumétrica do solo.

2.3 Métodos de Medida de Resistividade Elétrica de Solos em Laboratório

Na engenharia geotécnica a medida de resistividade elétrica foi motivo de estudo, por muitos anos, com o intuito de estimar a porosidade de solos não coesivos. Os primeiros estudos nesse sentido foram realizados por Kroezen em 1981 (ROBERTSON et al, 1998). Recentemente esse estudo tem sido utilizado para realizar investigações de campo e avaliação do percentual de contaminação de solos. A medida da resistividade elétrica do solo é uma forma de investigação indireta que pode ser correlacionada com diferentes propriedades físicas do solo, tais como a porosidade, condutividade hidráulica e propriedades físico-químicas (LUNNE et al., 1997).

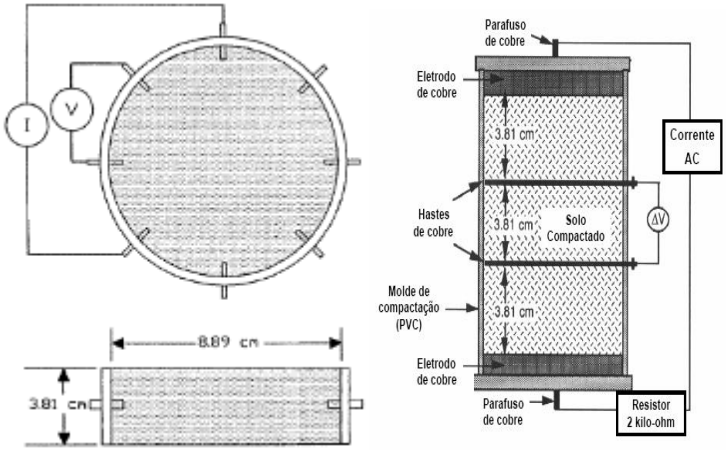
A partir de ensaios de laboratório é possível estudar as relações entre a resistividade elétrica e os fatores que a influenciam, visto que é possível controlar, em laboratório, diversas variáveis encontradas durante as análises dos ensaios de campo. Diversos autores têm apresentado diferentes técnicas para medir a resistividade elétrica de solos em laboratório e para diferentes finalidades.

As técnicas utilizadas em laboratório para a medida da resistividade elétrica são relativamente recentes. Geralmente essas técnicas visam a obtenção de parâmetros resistivos de referência para sua utilização em campo, visando, em sua maioria, o reconhecimento geotécnico ou avaliação do grau de contaminação em terrenos.

Aparatos para a medida da resistividade elétrica em laboratório para amostras compactadas foram desenvolvidos, com o objetivo de avaliar a qualidade da compactação

dos solos. Kalinsky e Kelly (1994) desenvolveram uma célula circular de material isolante, com oito eletrodos, como mostra a Figura 3-a. Desta forma, realizavam-se oito medidas de resistência de modo separado, utilizando-se quatro eletrodos por vez, sendo os dois mais externos utilizados como eletrodos de corrente e os internos como eletrodos potenciais.

Outro aparato desenvolvido constituía-se de um molde em PVC de dimensões semelhantes ao cilindro de compactação tipo Proctor Normal. No aparato desenvolvido por Abu-Hassanein e Benson (1994), o campo elétrico era induzido através de dois discos de cobre posicionados nas extremidades do corpo de prova, enquanto a diferença de potencial era medida entre duas barras, também de cobre, cravadas no corpo de prova (Figura 3-b). Os resultados desses ensaios mostraram que a resistividade de argilas compactadas é influenciada pelo teor de umidade, esforço de compactação e saturação inicial do corpo de prova.



(a) (b)

Figura 3 Aparato de medida de resistividade elétrica em laboratório (KALINSKY E KELLY, 1994) e (ABU-HASSANEIN E BENSON, 1994).

Abu-Hassanein et al. (1996) apresentaram várias relações entre a resistividade e algumas características de diferentes tipos de solos argilosos, utilizando o aparato da Figura 2.3. Os autores apresentaram resultados de medida de resistividade elétrica de um solo ensaiado nas direções vertical e horizontal, a fim de verificar a anisotropia. Eles realizaram os ensaios em um solo compactado, em diferentes teores de umidade, na energia Proctor normal reduzido (utilizando a metade do número de golpes desta energia). Os resultados apresentados pelos autores mostraram que, para umidades abaixo da ótima (ramo seco da curva de compactação), os valores de resistividade medidos na direção horizontal variaram entre 75 e 80 % daqueles medidos na direção vertical. Já no ramo úmido da curva de compactação, o efeito da anisotropia sobre os valores de resistividade horizontais foi menor, com estes variando entre 90 e 95% dos valores de resistividade medidos na direção vertical. Os autores afirmaram que os solos compactados com teores de umidade elevados tornam-se mais homogêneos, uma vez que no ramo seco existe a presença da macroestrutura entre os grãos de argila.

Abu-Hassanein et al. (1996) estudaram, também, a relação da resistividade elétrica com os limites de liquidez e plasticidade, coeficiente de permeabilidade, porcentagem de finos, fração de grossos, fração argilosa e temperatura. Verificou-se uma diminuição da resistividade com o aumento do limite de liquidez, do índice de plasticidade, da porcentagem de finos, da fração argilosa e da temperatura. Entretanto, quando se analisa o coeficiente de permeabilidade, verifica-se que este tende a crescer com o aumento da resistividade. Observou-se ainda que não foi possível obter uma única correlação do

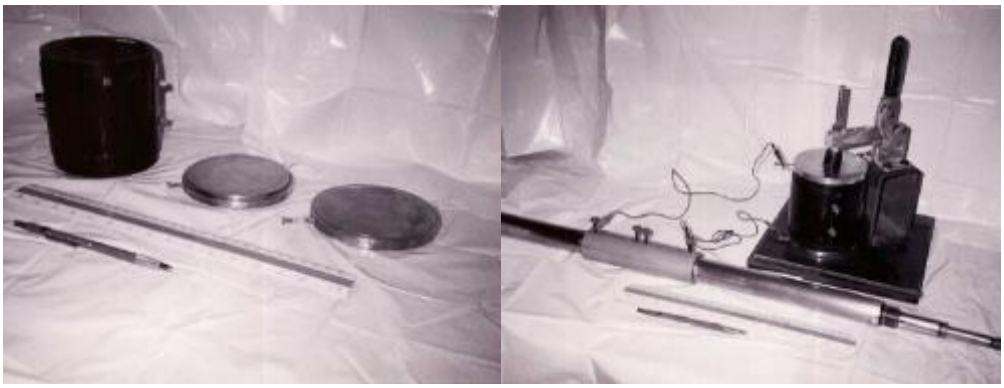
coeficiente de permeabilidade com a resistividade, para grande parte dos solos ensaiados, visto que o coeficiente de permeabilidade depende da saturação inicial do corpo de prova e esta também varia com a resistividade.

Fukue et al. (1999) realizaram ensaios de adensamento com medida de resistividade para verificar a influencia desta com a estrutura de solos argilosos saturados. Eles estudaram duas argilas, uma pouco ativa (Kibushi Clay) e uma bentonita. Os resultados mostraram que a resistividade aumenta com a diminuição dos índices de vazios. Eles também relacionaram a resistividade com o teor de umidade para as mesmas argilas remoldadas a uma carga constante.

Os autores observaram no processo de umedecimento um decréscimo da resistividade quando o teor de umidade se aproximava do limite de plasticidade e relacionaram esta diferença de comportamento com descontinuidade da água existente nos poros no trecho em que os valores de resistividade eram muito elevados, existindo somente água adsorvida pelas partículas. No instante em que as bolhas de água começam a se ligar, a resistividade diminui de forma considerável, tendendo a permanecer num patamar constante até um teor de umidade próximo do limite de liquidez, aumentando um pouco depois deste.

Daniel (1997), em estudos na universidade de British Columbia, acoplou o dispositivo para medida da resistividade de um piezocone (RCPTU) a um molde de ensaio de compactação feito com material isolante (Figura 4), através de dois eletrodos de latão localizados na extremidade da amostra. Esses eletrodos foram conectados aos dois eletrodos externos do piezocone (envio e recebimento de corrente elétrica) e a diferença de potencial era medida diretamente através dos dois eletrodos internos do piezocone.

A proposta do autor buscou a obtenção de valores de resistividade de referência em amostras de solos residuais em laboratório, onde muitas vezes a penetração do piezocone é prejudicada, além de auxiliar no entendimento da influência de fatores como o grau de saturação, porosidade e tipo de fluido existente e entre os grãos de solo.



(a) (b)

Figura 4 Equipamento para medida da resistividade elétrica em laboratório em amostras compactadas (DANIEL, 1997): a) molde de compactação, b) aparato de medida montado.

No Brasil, pode-se destacar os trabalhos de Nacci et al. (2003), Pacheco (2004), Mondelli et al. (2008), Peixoto et al. (2010) e Yamasaki et al. (2010), que realizaram medidas de resistividade elétrica de solos em laboratório, com o objetivo de auxiliar a interpretação dos resultados de ensaios de piezocone resistivo.

Nacci et al. (2003) desenvolveram uma célula cúbica de acrílico, onde o solo era colocado com porosidades diferentes e a condutividade elétrica era medida utilizando-se dois eletrodos de cobre, dispostos em duas faces opostas do cubo (Figura 5).

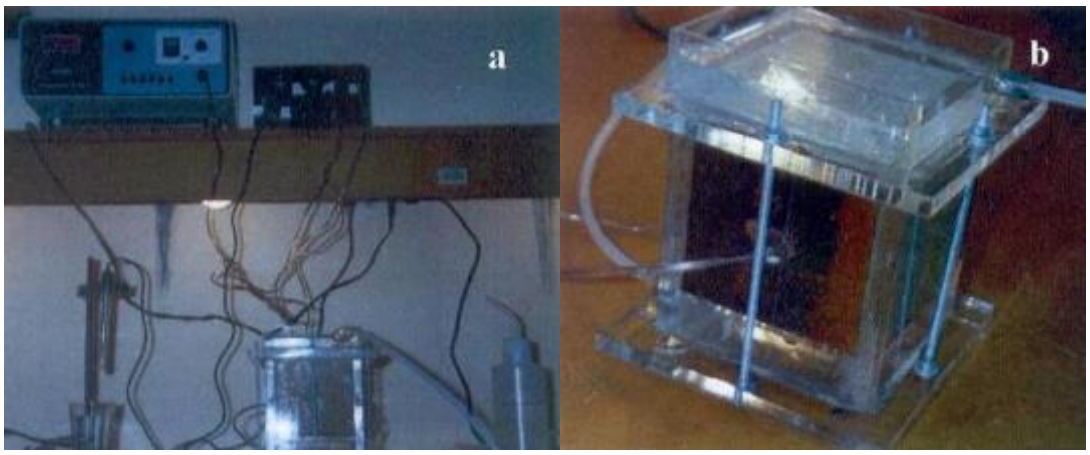


Figura 5 Aparato de medidas de resistividade em laboratório (NACCI et al., 2003): a) aparato de medida montado, b) célula cúbica acrílica.

Pacheco (2004) realizou medidas de resistividade com o piezocone resistivo em laboratório (Figura 6) utilizando areias de praia lavadas, de diferentes granulometrias e forma de grãos, e caulinita, homogeneizada em uma batedeira industrial com diferentes concentrações salinas. Os corpos de prova eram obtidos por pluviação (o material era lançado em um balde utilizando-se um funil, com abertura e altura de lançamento conhecidas), a fim se obter diferentes índices de vazios.

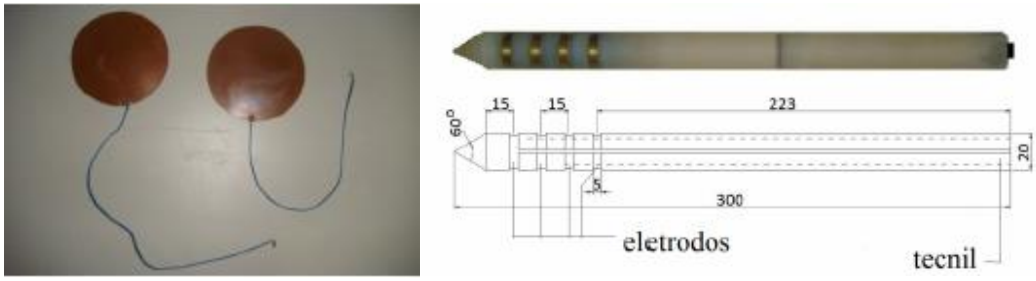
Figura 6 Aparato de medidas de resistividade em laboratório (PACHECO, 2004).

O sistema para testes de resistividade em laboratório desenvolvido por Mondelli et al. (2008) foi baseado na proposta de Daniel (1997). Foram instalados dois eletrodos de aço-inox, um em cada extremidade, e dois no centro do corpo-de-prova, para transferência da corrente elétrica e medida da diferença de potencial, respectivamente (Figura 7). Sendo que, para a aquisição de dados, foi utilizado um eletrorresistivímetro de campo.

Figura 7 Aparato utilizado para medidas de resistividade em laboratório (MONDELLI et al., 2008).

Peixoto et al. (2010) e Yamasaki et al. (2010) realizaram ensaios de laboratório para a avaliação da resistividade elétrica em uma areia argilosa sedimentar, da Formação Marília, proveniente do aterro de resíduos sólidos da cidade de Bauru (SP). Os autores realizaram os ensaios em corpos de prova compactados na energia Proctor normal, com o intuito de avaliar a interferência de fatores tais como teor de umidade, compactação, porosidade e grau de saturação na resistividade elétrica da amostra estudada.

Para tanto, os ensaios de resistividade em laboratório foram realizados de duas maneiras: inicialmente instalando-se duas placas de cobre nas extremidades dos corpos de prova cilíndricos (Figura 8 a e Figura 8 b). Posteriormente, era cravado no mesmo corpo de prova um dispositivo de medida de resistividade elétrica com configuração semelhante a do piezocone de resistividade, mas em dimensões reduzidas (Figura 9).



(a) (b)

Figura 8 Equipamentos utilizados para medidas de resistividade em laboratório (PEIXOTO *et al*., 2010 e YAMASAKI *et al*., 2010): a) placas de cobre, b) dispositivo de medida de resistividade elétrica semelhante ao piezocone de resistividade.

(a) (b)

Figura 9 Configuração do ensaio realizado com as placas de cobre (PEIXOTO *et al*., 2010 e YAMASAKI *et al*., 2010): a) molde de compactação, b) aparato de medida montado.

Por meio deste estudo Peixoto et al. (2010) e Yamasaki et al. (2010) concluíram que, de maneira geral, os resultados obtidos nos ensaios apresentaram o comportamento esperado e encontrado na literatura. Porém, foi observada uma discrepância na repetibilidade dos resultados obtidos no ramo seco da curva de compactação. Os autores destacam que essa mesma dificuldade também foi observada em ensaios de campo realizados com o piezocone de resistividade. Os autores também destacam que a curva, que representa a variação da resistividade elétrica com a variação do teor de umidade, apresenta comportamento descendente com tendência a estabilização após o valor de umidade referente ao teor de umidade ótimo da amostra.

Realizando uma comparação entre os valores de resistividade elétrica medidos pelas duas técnicas apresentadas, Yamasaki et al. (2010) observaram que, para as umidades correspondentes ao ramo úmido da curva de compactação, os valores de resistividade elétrica, para ambos os equipamentos, são da mesma ordem de grandeza, sendo os obtidos pelo dispositivo cônico superiores àqueles medidos pelas placas de cobre. Já no ramo seco da curva de compactação, ou seja, na condição não saturada, os valores sofrem grande variação, sendo destacada pelos autores a necessidade de ser melhor estudada a aplicabilidade dos ensaios de resistividade elétrica nessas condições de compactação.

Recentemente, outras formas de medida da resistividade elétrica em laboratório têm surgido, como, por exemplo, as mini-sondas apresentadas por Screedeep et al. (2004). Estes autores obtiveram relações empíricas entre a resistividade e o grau de saturação para um solo siltoso e uma argila branca comercial da Índia. Os autores realizaram a medida de resistividade em laboratório de duas formas: uma caixa cúbica constituída de 3 eletrodos de latão parafusados em cada face, chamada de electrical resistivity box – ERB, e uma mini-sonda constituída de 4 anéis de cobre inseridos numa haste de ebonite, chamada de electrical resistivity probe –ERP.

Os autores observaram que existe uma zona de transição (40 % ≤ Sr ≤ 60 %), acima da qual, os valores de resistividade permanecem praticamente constantes, e abaixo a resistividade entre os vazios preenchidos com ar (muito elevada) tem grande influência sobre a resistividade integral do solo.

Boszczowski e Silva (2006) compararam medidas de resistividade em amostras deformadas e indeformadas para diferentes solos de um perfil de intemperismo. Os resultados mostraram que a estrutura dos solos apresentou-se como uma ponte para a

passagem de corrente elétrica, ou seja, o solo estruturado conduz mais eletricidade que o solo desestruturado; principalmente para teores de umidade abaixo de 30%. Observou-se também que os valores de resistividade aumentaram com o grau de intemperismo dos diferentes solos estudados, com exceção da camada de solo mais superficial.

3 Materiais e Métodos

Neste item são apresentados os materiais e os métodos empregados na aquisição e caracterização das amostras, na construção do equipamento de resistividade elétrica de laboratório e na realização dos ensaios.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL UTILIZADO

O solo aqui utilizado foi coletado na região da construção das obras de urbanização do Setor Noroeste – Brasília, DF nas coordenadas X = 187.582 e Y = 8.257, zona 23 (Figura 10).

Foram realizados ensaios de caracterização física, onde se determinaram, de acordo com ABNT, o peso específico dos sólidos, os limites de liquidez e plasticidade, o índice de atividade, a curva granulométrica e os pesos específicos máximos, juntamente com as umidades ótimas para as energias Proctor normal, intermediária e modificada.

Realizaram-se ensaios de caracterização química e mineralógica, onde pôde-se determinar os teores dos principais elementos químicos, bem como a ocorrência dos principais minerais e argilominerais contidos na amostra.

(a) (b) (c)

Figura 10 Coleta da amostra em campo: a) perfil do solo coletado, b) coleta do solo, c) amostra seca em laboratório.

3.4 Medidas De Resistividade Elétrica

As medidas de resistividade elétrica dos corpos de prova foram efetuadas utilizando-se a técnica de duas pontas ou de dois terminais. A Figura 11 esboça o arranjo experimental para este tipo de medida. Esta técnica consiste em medir a corrente elétrica que flui por um sólido quando a ele é imposta uma diferença de potencial (ddp). Assim,

conhecendo-se com precisão as dimensões do corpo de prova, pode-se calcular por meio da Equação 2 o valor da resistividade elétrica, medindo-se a corrente elétrica que flui através da amostra quando aplicada a essa uma diferença de potencial pré-estabelecida (GIROTTO E SANTOS, 2002).

$$\rho = \frac{V \cdot A}{i \cdot L} \qquad \text{(Equação 2)}$$

Onde:

ρ = resistividade elétrica;

V = diferença de potencial (ddp);

A = área da seção transversal do sólido;

L = comprimento do sólido;

i = corrente elétrica.

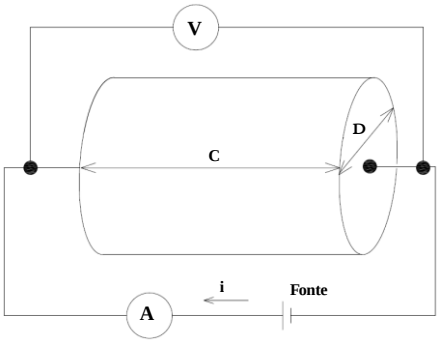


Figura 11 Arranjo experimental para o método de duas pontas (GIROTO E SANTOS, 2002 – modificado).

Para possibilitar a utilização deste método na aferição da resistividade elétrica dos corpos de prova compactados, foram confeccionados dois capacetes metálicos em cobre com o mesmo diâmetro dos corpos-de-prova (6”, 152 mm). Para a aplicação da diferença de potencial foi utilizada uma fonte de alimentação regulável com capacidade de fornecer de 0 a 30 volts com resolução de 0,1 volts. As leituras de corrente foram realizadas por meio de um amperímetro digital com capacidade de medida de 0 a 10 ampéres com resolução 0,1 micro ampére. A Figura 12 apresenta os equipamentos utilizados.

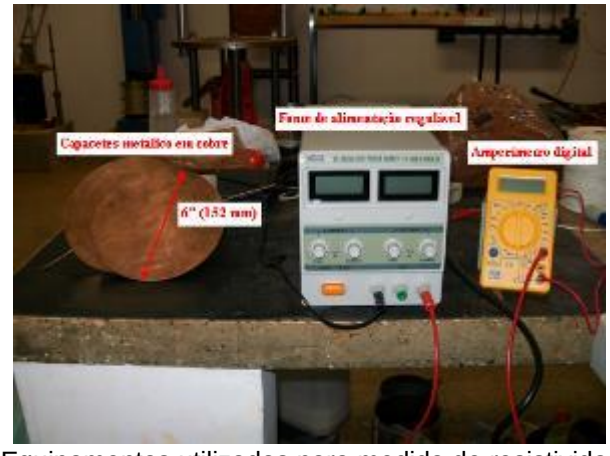


Figura 12 Equipamentos utilizados para medida de resistividade elétrica.

Para a realização das medidas, os corpos de prova compactados foram sacados dos cilindros de compactação e colocados em contato com os capacetes metálicos. Devido a possíveis irregularidades presentes nas faces dos corpos de prova, foi utilizada entre os capacetes e as faces dos corpos de prova uma camada de aproximadamente 2 mm de espessura de um gel de alta condutividade elétrica (Figura 13), com viscosidade suficiente para não penetrar nos vazios da amostra; garantindo, assim, um perfeito contado entre o capacete metálico e as faces superior e inferior dos corpos de prova (Figura 14). O gel utilizado, da marca Mercur, é o mesmo utilizado em procedimentos médicos, tais como, desfibrilação e eletrocardiograma.

(a) (b)

Figura 13 Gel condutor: a) embalagem, b) aplicação no capacete metálico.

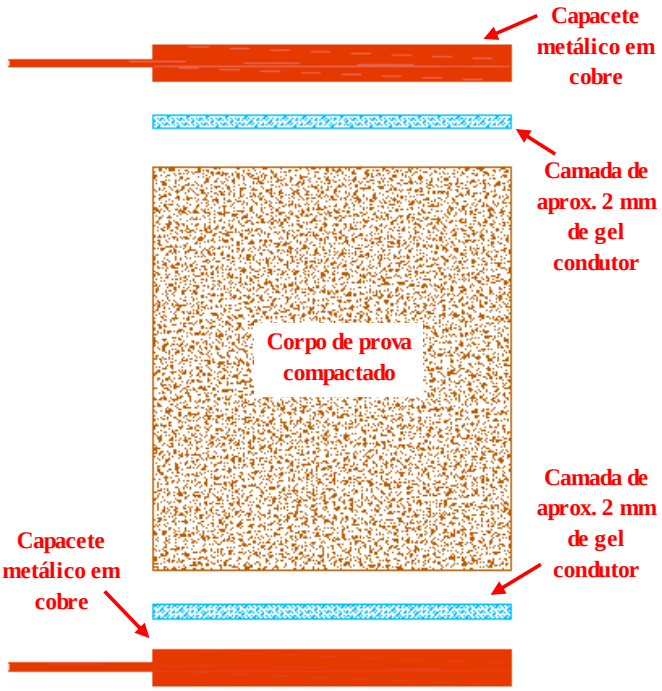
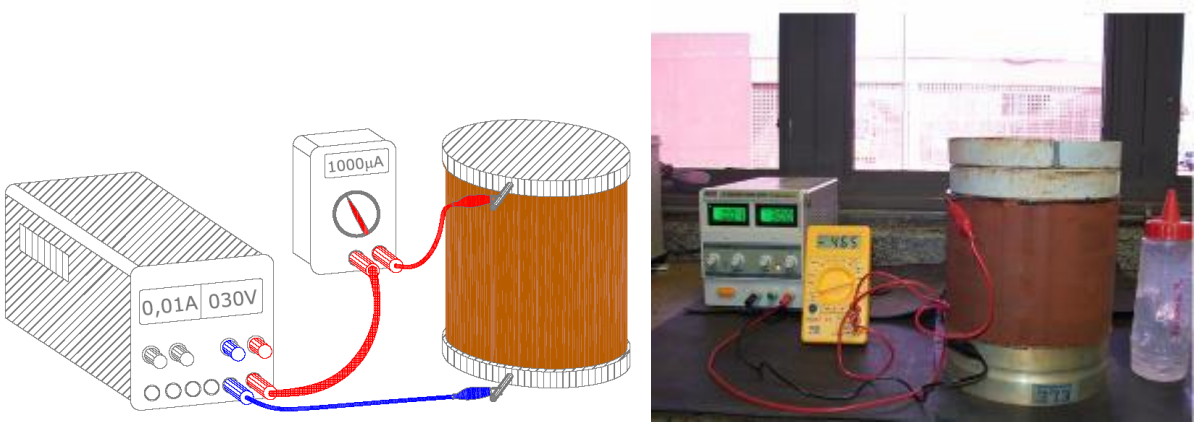


Figura 14 Desenho esquemático da preparação do corpo de prova para a medida de resistividade elétrica.

O procedimento de aferição da resistividade elétrica se deu conectando-se aos capacetes metálicos cabos elétricos por meio de terminais tipo jacaré, que permitiram a aplicação da diferença de potencial com o auxílio da fonte de alimentação. A medida da corrente elétrica foi realizada com o auxílio do amperímetro digital, sendo este ligado em série com a fonte de alimentação (Figura 15). Sobre o capacete metálico superior colocou-se sobrecargas garantindo o espalhamento adequado do gel em toda a superfície

do corpo de prova. Manteve-se em todos os corpos de prova uma sobrecarga padrão de 4.540 gramas.



(a) (b)

Figura 15 Sistema para medidas da resistividade elétrica: a) desenho esquemático da montagem, b) imagem da realização das medidas.

Visando avaliar o comportamento da resistência elétrica (relação entre diferença de potencial e corrente elétrica), as medidas de resistividade elétrica dos corpos de prova foram realizadas aplicando a eles diferentes valores de ddp. Com isso foi possível avaliar, se para o material em estudo, a relação tensão - corrente elétrica apresentava um comportamento linear, ou seja, se o material obedeceria ao modelo de comportamento proposto pela Lei de Ohm. Foram aplicados, então, em cada corpo de prova os seguintes valores de ddp: 1, 2, 4, 8, 12, 16, 20, 25 e 30 volts. Cabe destacar que as medidas foram realizadas em uma sala climatizada com temperatura controlada a 25 °C.

4 RESULTADOS

Este item apresenta os resultados obtidos a partir do emprego dos materiais e métodos apresentados. Destacam-se a as curvas e parâmetros de compactação da amostra e os valores de resistividade obtidos.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA AMOSTRA

A Figura 16 apresenta a malha de pontos (pares peso específico aparente seco - umidade) referentes aos 20 corpos de prova compactados em cilindro de 6” (152 mm) de diâmetro nas energias Proctor normal, intermediária e modificada e suas respectivas curvas de compactação. Tais pontos foram numerados sequencialmente de acordo com sua umidade e energia de compactação, sendo as letra N, I e M representativa das energias de compactação Proctor normal, intermediária e modificada, respectivamente.

Na Figura 16 também estão representadas as linhas de iso-índice de vazios que identificam os corpos de prova que possuem mesmo índice de vazios e diferentes umidades, além das curvas de iso-grau de saturação que dão um indicativo da variação do grau de saturação dos pontos presentes na malha.

Verifica-se na Figura 16que os pontos de compactação estão bem distribuídos no espaço peso específico aparente seco x teor de umidade, o que consequentemente

promove uma boa variação dos graus de saturação dos corpos de prova, sendo que esses variam de 45 a 90%, aproximadamente, o que auxiliará nas análises a serem realizadas.

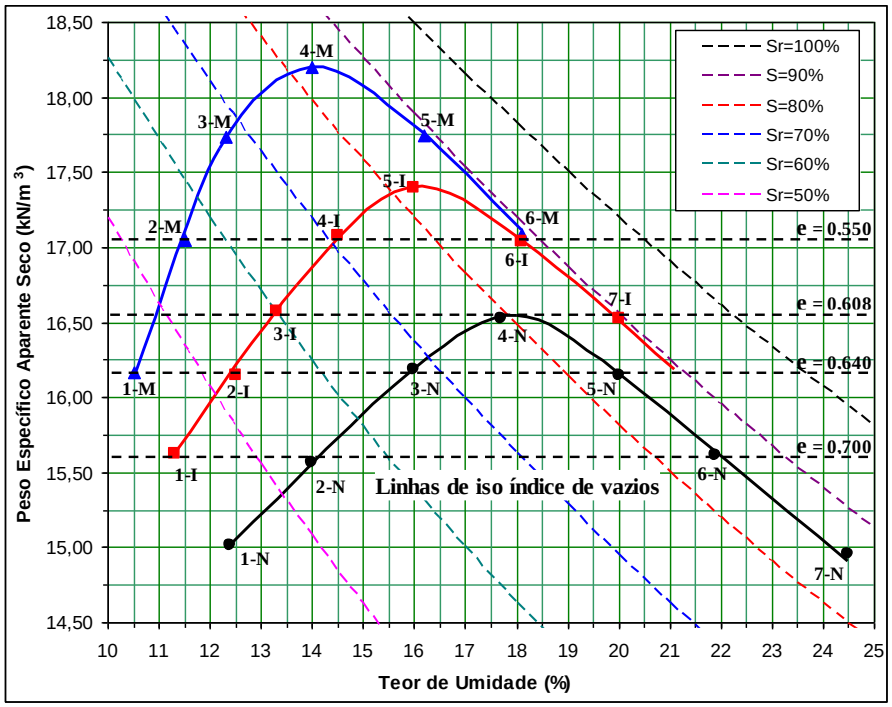


Figura 15 Curvas de compactação – energias Proctor normal, intermediária e modificada.

A Tabela 1 apresenta os valores de peso específico aparente seco, umidade, grau de saturação e índice de vazios obtidos em cada um dos corpos de prova compactados.

Tabela 1 Valores de peso específico aparente seco, umidade, grau de saturação e índice de vazios dos corpos de prova compactados nas diferentes condições de compactação.

Energia	Nome / Ponto	γ_d (kN/m³)	w (%)	θ_W (%)	Sr (%)	Índice de vazios
Proctor normal	1N	15,01	12,4	19,0	44,0	0,764
	2N	15,57	14,0	22,2	53,8	0,700
	3N	16,18	16,0	26,4	68,1	0,637
	4N	16,47	17,7	29,7	78,6	0,608
	5N	16,20	20,0	33,0	85,0	0,635
	6N	15,61	21,9	34,9	85,0	0,696
	7N	14,96	24,5	37,4	85,9	0,770
Proctor intermediária	1I	15,62	11,3	18,0	44,1	0,695
	2I	16,14	12,5	20,6	52,8	0,641
	3I	16,57	13,3	23,4	60,1	0,598
	4I	17,07	14,5	25,2	71,3	0,551
	5I	17,40	16,0	28,2	82,7	0,522
	6I	17,04	18,1	31,5	88,2	0,554
	7I	16,53	20,0	33,7	89,7	0,602
Proctor modificada	1M	16,15	10,5	17,0	44,5	0,639
	2M	17,05	11,5	20,0	56,1	0,553
	3M	17,74	12,3	22,3	67,3	0,493
	4M	18,21	14,0	25,4	83,1	0,454
	5M	17,74	16,2	29,3	88,9	0,493
	6M	17,09	18,1	31,5	89,0	0,550

Legenda:

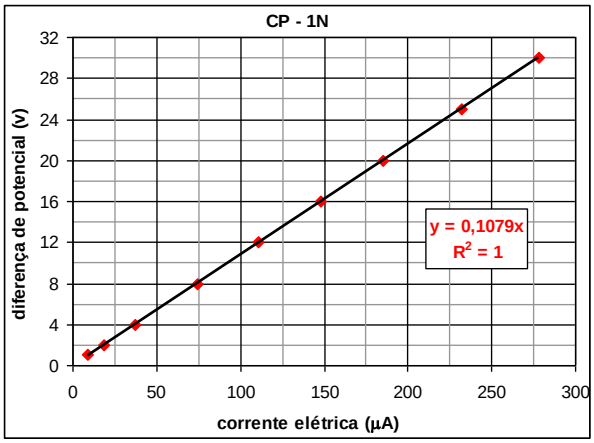
S_r: Grau de saturação — w: Teor de umidade gravimétrica

γ_d: Peso específico aparente seco — θ_W: Teor de umidade volumétrica

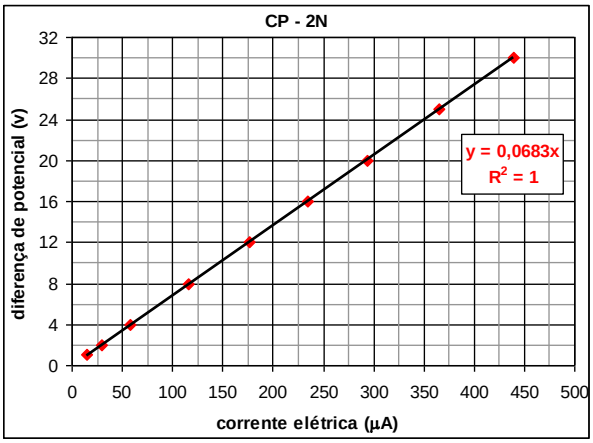
4.2 MEDIDAS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA

As Figuras 16 (a - g), 17 (a - g) e 18 (a – f) apresentam apresentam, de forma a exemplificar os resultados, a relação entre a diferença de potencial aplicada ao corpo de prova e a corrente elétrica medida no mesmo, para os corpos de prova de número 1 das energias de compactação Proctor normal, intermediária e modificada, respectivamente.

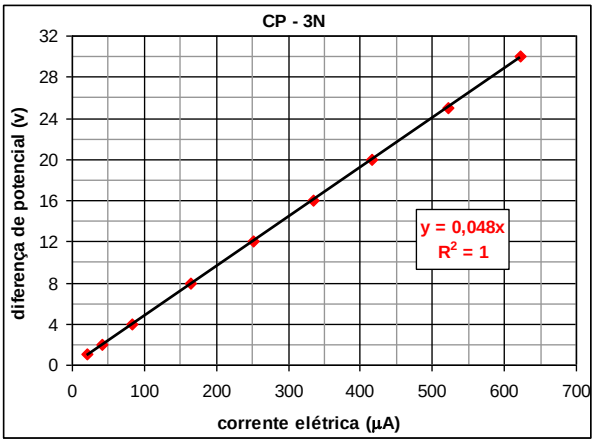
Em todas as figuras observa-se que a relação entre a diferença de potencial e a corrente elétrica é linear e se ajustam muito bem à reta de regressão. Esse ajuste é expresso, nos gráficos, pelo coeficiente de determinação R^2 bem próximo de 1. Este fato indica que apesar de o solo compactado ser um meio heterogêneo particulado formado por três materiais – solo, água e ar, este apresenta para, os níveis de ddp aplicados, um comportamento eletroresistivo condizente com o modelo proposto pela Lei de Ohm.



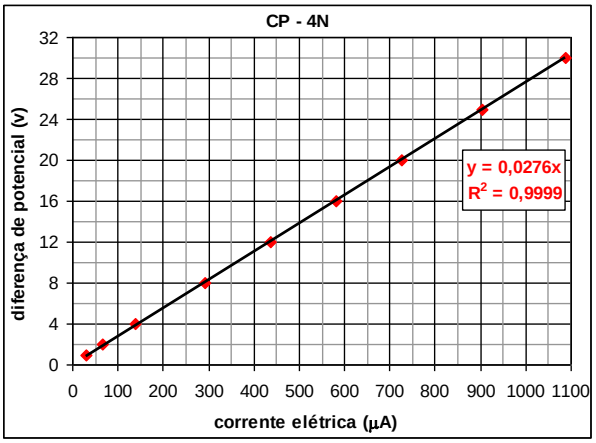
(a)



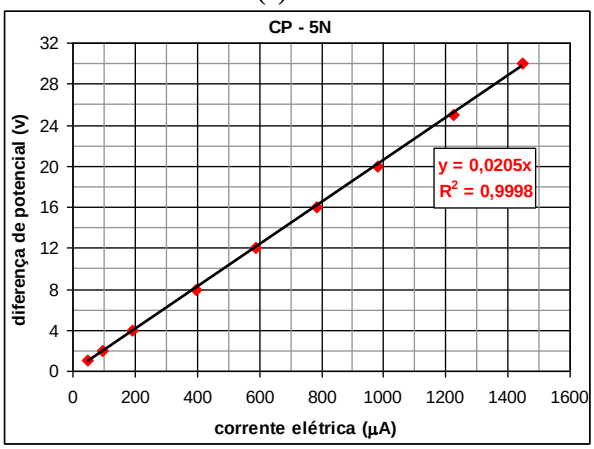
(b)



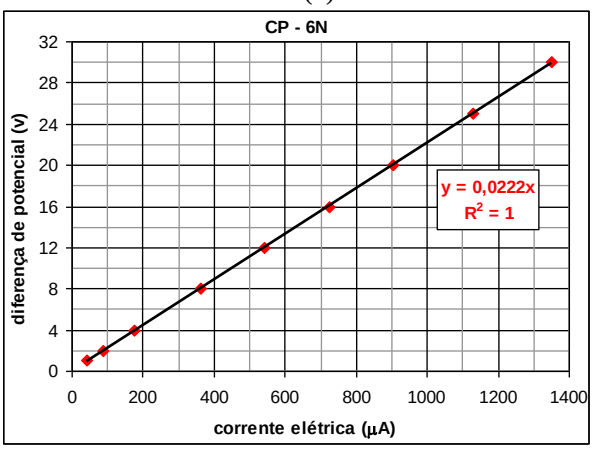
(c)



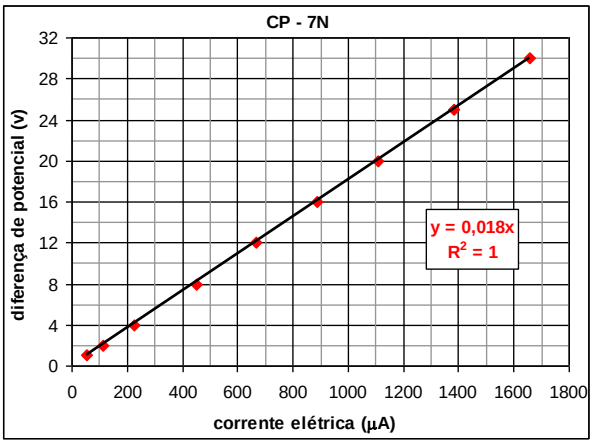
(d)



(e)

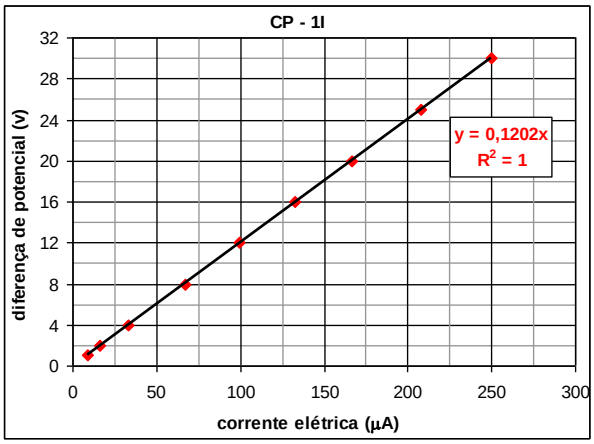


(f)

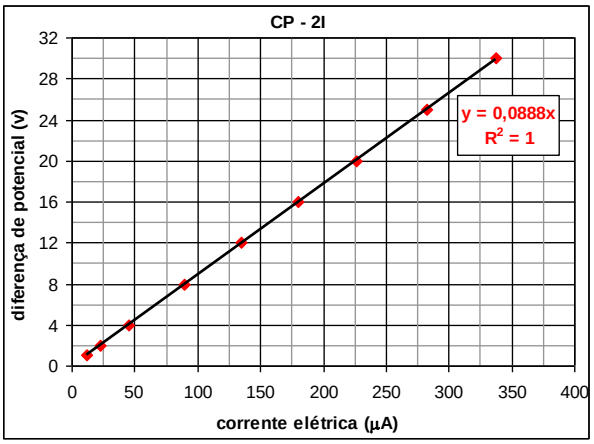


(g)

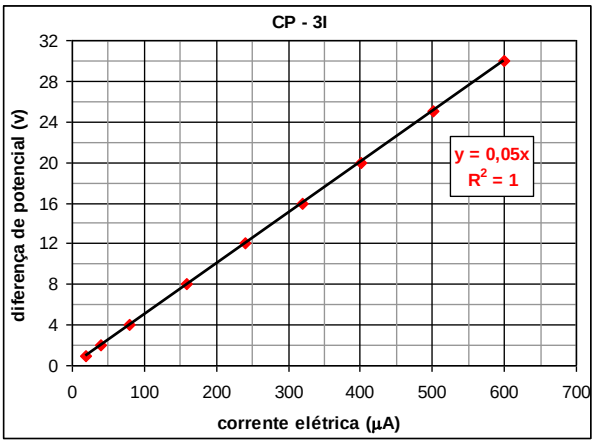
Figura 16 Relação ddp / corrente – corpos de prova energia Proctor normal: a) CP 1N, b) CP 2N, c) CP 3N, d) CP 4N, e) CP 5N, f) CP 6N, g) CP 7N.



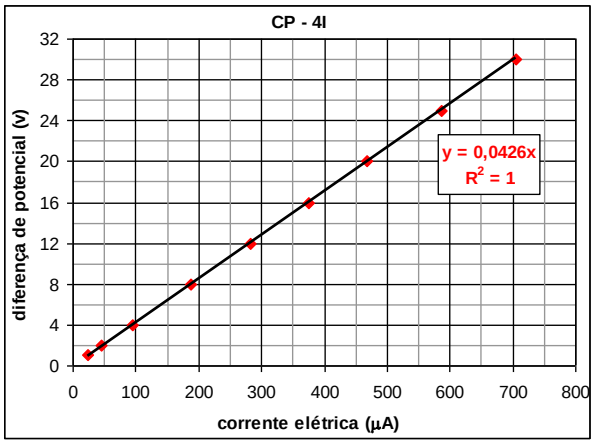
(a)



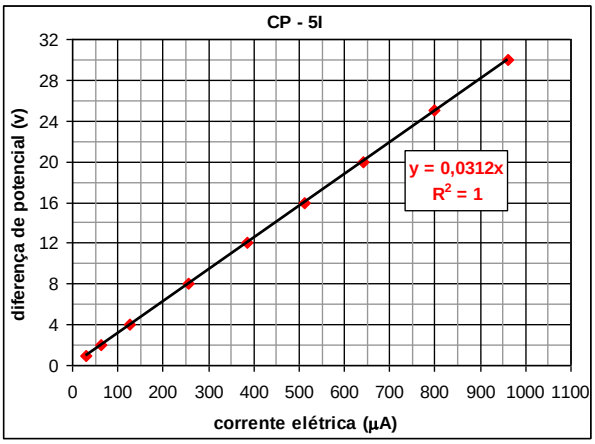
(b)



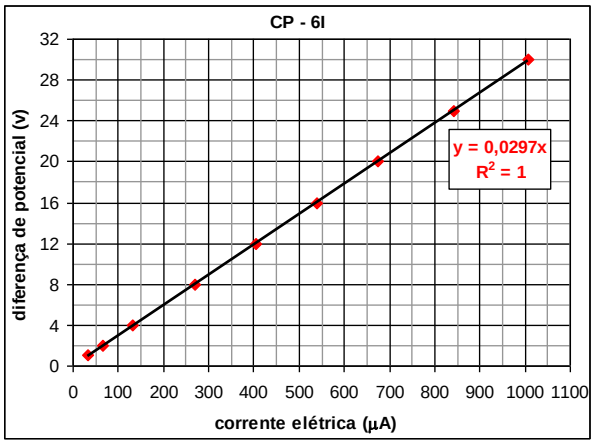
(c)



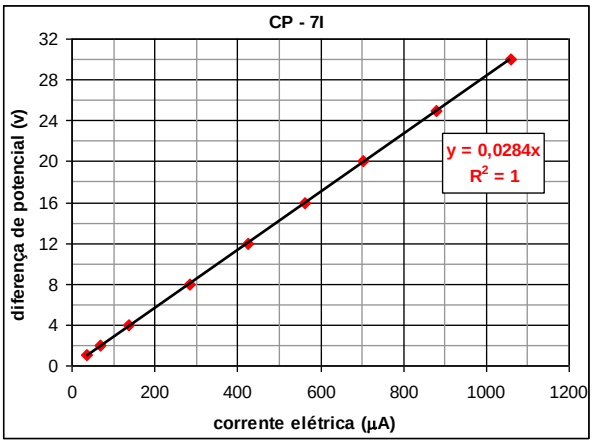
(d)



(e)

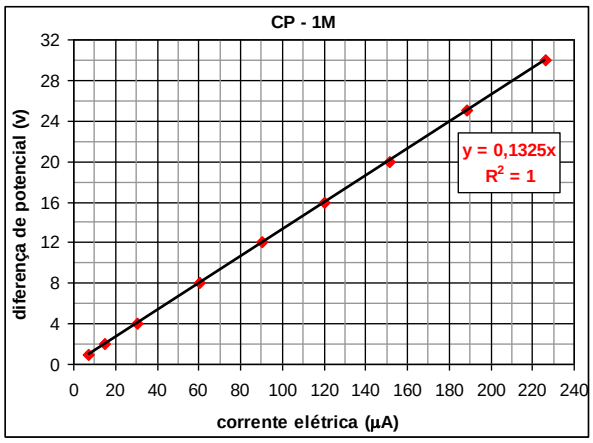


(f)

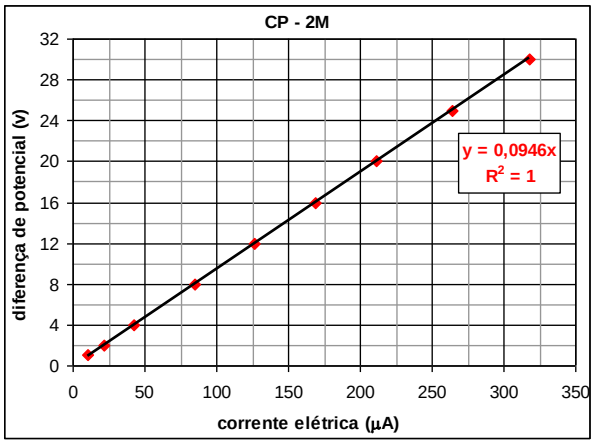


(g)

Figura 17 Relação ddp / corrente – corpos de prova energia Proctor intermediária: a) CP 1I, b) CP 2I, c) CP 3I, d) CP 4I, e) CP 5I, f) CP 6I, g) CP 7I.



(a)



(b)

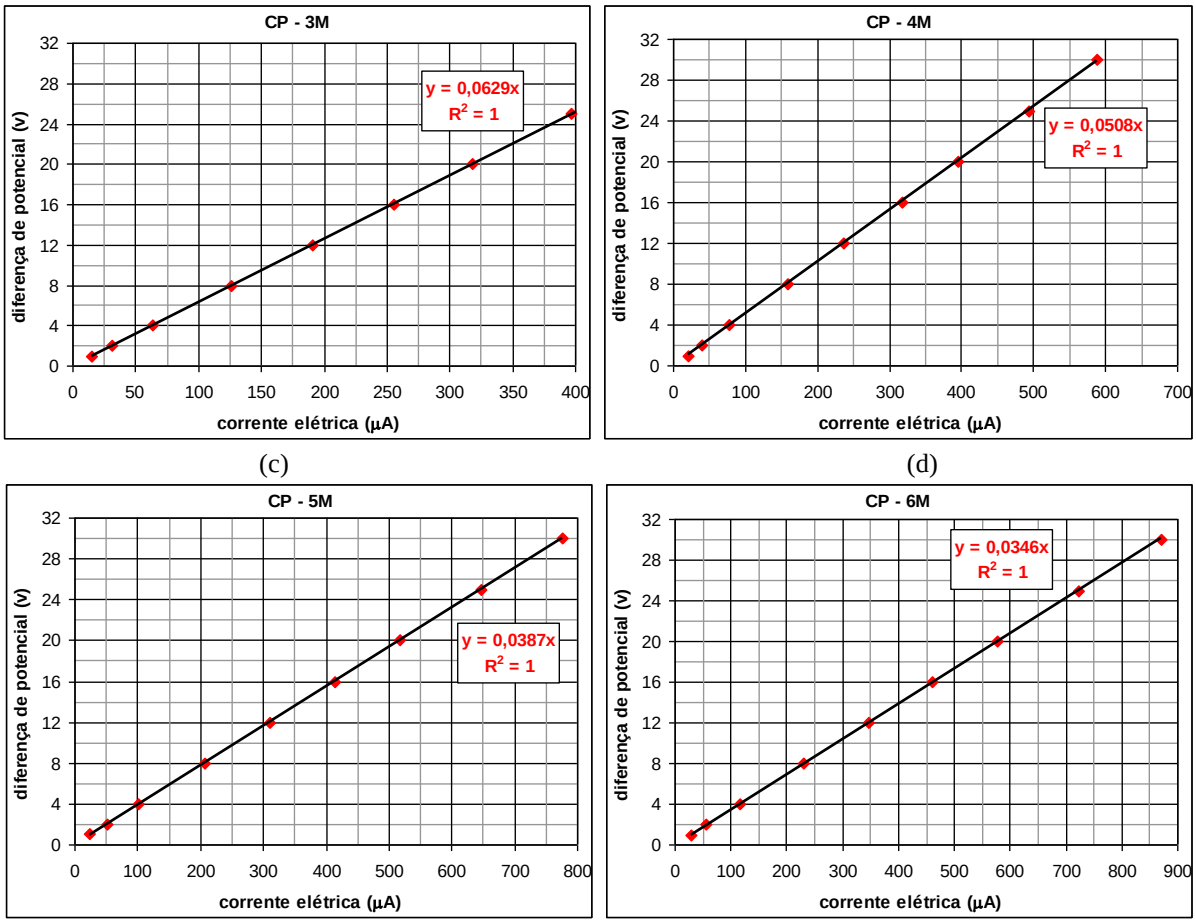


Figura 18 Relação ddp / corrente – corpos de prova energia Proctor modificada: a) CP 1M, b) CP 2M, c) CP 3M, d) CP 4M, e) CP 5M, f) CP 6M.

Nas figuras expostas acima, o coeficiente linear das equações nos gráficos expressa em MΩ a resistência elétrica apresentada pelos corpos de prova em cada uma das condições de compactação. Na Tabela 2 são apresentados os valores de resistividade elétrica calculados por meio da Equação 3, utilizando-se os valores de resistência elétrica e as dimensões dos corpos de prova.

$$\rho = 10^6 . R . \frac{A}{L}$$ (Equação 3)

Onde:

ρ = resistividade elétrica (Ω.m);

A = área da seção transversal do corpo de prova (m²), igual a 0,01815 m²;

L = comprimento do corpo de prova (m), igual a 0,1146 m;

R = resistência elétrica (MΩ), sendo esta igual a $\frac{V}{i}$, com;

i = corrente elétrica (A);

V = diferença de potencial (V);

Tabela 2 Valores de resistência e resistividade elétrica dos corpos de prova compactados nas diferentes condições de compactação.

Energia	Nome / Ponto	Resistência elétrica (Ω)	Resistividade elétrica (Ω.m)
Proctor normal	1N	107900	17095
	2N	68300	10821
	3N	48000	7605
	4N	27600	4373
	5N	20500	3248
	6N	22200	3517
	7N	18000	2852
Proctor intermediária	1I	120200	19044
	2I	88800	14069
	3I	50000	7922
	4I	42600	6749
	5I	31200	4943
	6I	29700	4705
	7I	28400	4500
Proctor modificada	1M	132500	20992
	2M	94600	14988
	3M	62900	9965
	4M	50800	8048
	5M	38700	6131
	6M	34600	5482

Destaca-se que os valores de resistividade elétrica obtidos nesta pesquisa (de 2800 a 20900 Ωm) são superiores aos comumente apresentados na literatura. Segundo a norma DNER – ME 040/95 – Prospecção geofísica pelo método da eletroresistividade, a resistividade elétrica de solos argilosos geralmente se situa entre 100 e 500 Ωm.

No entanto, é importante salientar que apesar da amostra estudada neste trabalho possuir características argilosas, sua porcentagem de areia, mesmo na análise com defloculante, é bastante relevante. Esse fato associado à presença de quartzo (resistividade elétrica igual a 1012 Ωm, segundo a DNER – ME 040/95), indicada na análise mineralógica, pode ser o motivo de o solo estudado apresentar valores de resistividade elétrica elevados.

Outro fato, também relevante para o aumento da resistividade elétrica da amostra estudada, foi a utilização da água de abastecimento no processo de compactação, tendo em vista que esta água possui salinidade praticamente nula, aproximadamente 0,1 ppm (segundo os critérios estabelecidos pela resolução CONAMA 357/2005 a salinidade da água para o abastecimento e consumo humano deve ser menor que 0,5 ‰), o que afeta diretamente seu potencial de condutividade elétrica.

5. CONCLUSÕES

No estudo realizado verificou-se que a relação entre a diferença de potencial (ddp) e a corrente elétrica é linear, indicando que apesar de a amostra compactada ser um meio heterogêneo particulado formado por três materiais - solo água e ar, esta apresenta para, os níveis de ddp aplicados, um comportamento eletroresistivo condizente com o modelo proposto pela Lei de Ohm. Este fato, evidencia a técnica utilizada como satisfatória, para obtenção de parâmetros eletroresistivos de amostras de solo em laboratório.

Os valores de resistividade elétrica obtidos foram superiores aos comumente apresentados na literatura, podendo este fato estar associado à porcentagem de areia

presente na amostra. Outro fato, também relevante para o aumento da resistividade elétrica, foi a utilização da água de abastecimento no processo de compactação, tendo em vista que esta possui salinidade praticamente nula afetando diretamente seu potencial de condutividade elétrica.

REFERÊNCIAS

ABU-HASSANEIN, Z.S.; BENSON, C.H. **Using Electrical Resistivity for Compaction Control of Compacted Soil Liners**. Proceedings of the First International Conference on Tailings & Mine Waste'94, 1994, pp. 177-188.

BOSZCZOWSKI, R.B., SILVA, J.M. **Avaliação da Resistividade Elétrica de um Perfil de Solo Residual em Função do Intemperismo e Teor de Umidade**. XIII COBRAMSEG - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Curitiba-PR, 2006.

CONAMA 357/2005 – **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências**, Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente, 23 p.

DANIEL, C. **An Investigation of the Factors Affecting Bulk Soil Electrical Resistivity**. Bachelor Thesis, Department of Civil Engineering The University of British Columbia, Vancouver, BC, 1997.

DNER- ME 040/95 – **Prospecção geofísica pelo método de eletrorresistividade**, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 17 p.

FUKUE, M.; MINATO, T.; HORIBE, H. & TAYA, N. **The Micro-structures of Clay Given by Resistivity Measurements**. Engineering Geology 54, 1999, pp. 43-53.

GIROTTO, E.M.; SANTOS, I.A. **Medidas de Resistividade Elétrica DC em Sólidos: Como Efetuá-las Corretamente**, Química Nova, Vol. 25, nº 4, 2002, 639-647p.

HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. (2009). **Fundamentos de Física - Eletromagnetismo**. 9ª edição. Rio de Janeiro, RJ. LTC, 355p.

KALINSKY, R.J. & KELLY, W.E. **Electrical-Resistivity Measurements for Evaluating Compacted-Soil Liners**. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, Nº 2, 1994, pp. 451-457.

KEAREY, P., Brooks, M., Hill, I. (2009)**. Geofísica da Exploração**. Oficina de textos, São Paulo, 422 p.

LUNNE, T. ROBERTSON, P.K. & POWELL, J. **Cone Penetration Test in Geotechnical Practice, Blackie Academic & Professional**, London, 1997, 311p.

McNEILL, J.D. (1980). **Eletromagnetics Terrain Condutivity Measurement at Low Induction Numbers**. Tech. Note TN-6, Geonics Ltd, Mississauga, Ont,. Canadá, 13p.

NACCI, D.; GAMBIM, R.L.; SCHNAID, F. **Propriedades Elétricas de Solos Contaminados**. IV Simpósio Brasileiro de Geossintéticos e V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, PUC, Porto Alegre – RS, 2003.

PACHECO, A.O. **Aplicação do cone resistivo em solos saturados**. Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004, 150p.

PEIXOTO, A.S.P.; PREGNOLATO, M.C.; SILVA, A.C.C.L.; YAMASAKI, M.T.; CONTE JUNIOR, F. **Development of an electrical resistivity measure for geotechnical and geoenvironmental characterization**. CPT'10 – 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, California, USA, 2010.

ROBERTSON, P.K., LUNNE, T.; POWELL, J.J.M. **Geo-Environmental Applications of Penetration Testing. Invited Theme Lecture**, ISC '98, Atlanta, Georgia, April 1998.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. (1990). **Applied Geophysics**. SecondEdition, Cambridge University Press, United Kingdom, 770p.

YAMASAKI, M.T.; PEIXOTO, A.S.P.; ULSON, J.A.C. **Ensaio de Laboratório para Avaliação da Resistividade Elétrica em um Solo Tropical Arenoso**. XV COBRAMSEG – Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos Engenharia Geotécnica, Gramado, RS, 2010.