

ANÁLISE MÉTODOLÓGICA DA MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM AMOSTRAS DE SOLO COMPACTADO

METHODOLOGICAL ANALYSIS OF ELECTRICAL RESISTIVITY MEASUREMENT IN COMPACTED SOIL SAMPLES

Lizandra Maria Ferreira Gurgel¹
Francisco Felinto de Lima Neto²
Adriano Costa de Oliveira³

RESUMO:

Este trabalho investiga a caracterização elétrica de amostras de um solo compactado por meio da medição de resistividade, utilizando o método de quatro pontas. Foram confeccionados corpos de prova cilíndricos e submetidos a ensaios com aplicação de tensão contínua entre eletrodos planos metálicos. A influência da qualidade de contato eletrodo-solo foi analisada a partir de diferentes condições de interface: uso de gel condutor e aplicação de carga mecânica. Observou-se variação significativa da corrente ao longo do tempo, associada a efeitos como resistência de contato, aquecimento por efeito Joule, redistribuição de umidade e fenômenos eletroquímicos no meio condutor. Os resultados evidenciam que pequenas alterações nas condições de contato podem impactar a resistividade aparente obtida, destacando a necessidade de procedimentos controlados de ensaio, com atenção à geometria, pressão aplicada e estabilidade eletroquímica. A caracterização da resistividade elétrica mostrou-se uma ferramenta eficiente para análise comparativa de solos compactados, tendo potencial aplicação em estudos de engenharia geotécnica, dimensionamento de sistemas de aterramento e investigação de propriedades físico-elétricas de solos.

Palavras-chave: resistividade elétrica; resistência de contato; método das quatro pontas; caracterização do solo.

ABSTRACT

This study investigates the electrical characterization of compacted soil samples through resistivity measurements using the four-point method. Cylindrical specimens were prepared and subjected to tests with the application of direct voltage between flat metallic electrodes. The influence of electrode-soil contact quality was analyzed under different interface conditions, including the use of conductive gel and the application of mechanical load. A significant variation in electric current over time was observed, associated with effects such as contact resistance, Joule heating, moisture redistribution, and electrochemical phenomena within the conductive medium. The results demonstrate that small changes in contact conditions can significantly affect the measured apparent resistivity, highlighting the need for controlled testing procedures with careful attention to geometry, applied pressure, and electrochemical stability. Electrical resistivity characterization proved to be an effective tool for the comparative analysis of compacted soils, with potential applications in geotechnical engineering studies, grounding system design, and the investigation of the physical-electrical properties of soils.

Key words: electrical resistivity; contact resistance; four-point method; soil characterization.

1. INTRODUÇÃO

A resistividade elétrica do solo é uma propriedade física amplamente utilizada na geofísica e na engenharia geotécnica, podendo ser aplicada em campo por meio de métodos geofísicos, como a Tomografia de Resistividade Elétrica (*Electrical Resistivity Tomography-ERT*). Esse método permite a investigação do subsolo, sendo fundamental para projetos de

¹Graduanda em Engenharia Civil, Ufersa, Campus Caraúbas, e-mail: lizandra.gurgel@alunos.ufersa.edu.br

²Professor coorientador(a), Departamento de Engenharias, Ufersa, Campus Caraúbas, e-mail: francisco.lima@temporarios.ufersa.edu.br

³Professor orientador, Departamento de Engenharias, Ufersa, Campus Caraúbas, e-mail: adriano.costa@ufersa.edu.br

fundações, estruturas de engenharia, pontes e para a determinação da profundidade da rocha matriz (Devi *et al.*, 2017). Além disso, a resistividade elétrica é empregada em estudos hidrogeofísicos, possibilitando a identificação da presença de água nos poros do solo ou em fissuras das rochas (Silva *et al.*, 2021; Chou *et al.*, 2023; Innocenti, 2024).

Nos últimos anos, estudos têm avaliado a resistividade elétrica de solos compactados em laboratório como alternativa às medições em campo, especialmente em situações com limitações operacionais ou logísticas. Nesse contexto, diversos autores evidenciam correlações entre a resistividade elétrica e propriedades geotécnicas. Aquino (2010) analisou a relação entre resistividade elétrica e compactação do solo em ensaios laboratoriais, enquanto Campos (2015) investigou o uso da resistividade elétrica como ferramenta indireta para o monitoramento da sucção em campo. De forma complementar, Xie *et al.* (2023) estudaram o comportamento da resistividade elétrica em solos contaminados por diferentes metais.

Para a determinação da resistividade elétrica em laboratório, destacam-se os métodos de duas e quatro pontas. Campos (2015) utilizou o método Kelvin em corpos de prova compactados e indeformados, antes e após a saturação. Aquino (2010) adotou o método de duas pontas, no qual a tensão era medida diretamente na fonte de alimentação, ficando sujeita à influência da resistência interna do sistema. De forma semelhante, Mikos (2017) empregou o método de duas pontas utilizando regulador manual de tensão e um multímetro para a medição da corrente elétrica e da tensão aplicada, resultando em maior tempo de ensaio e menor eficiência operacional do procedimento.

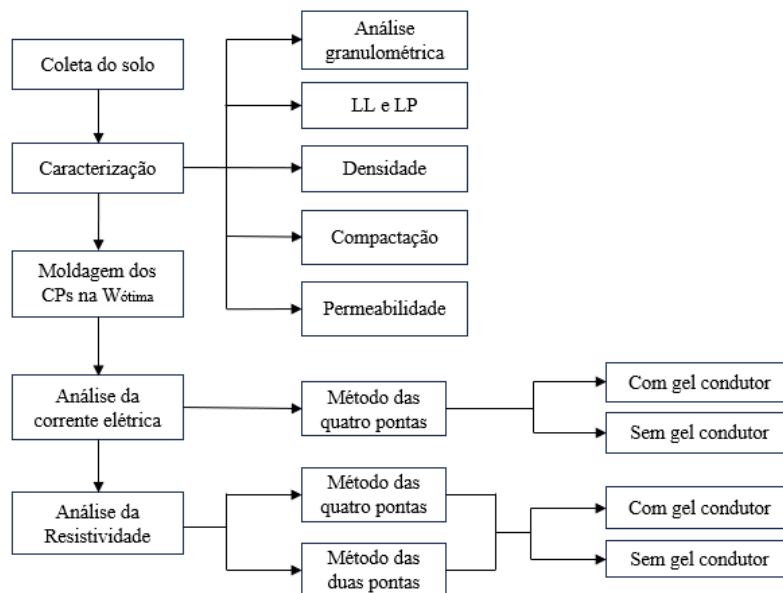
Segundo Mathias (2023), o método de quatro pontas apresenta maior precisão por utilizar circuitos independentes de medição de corrente e tensão, reduzindo a influência da resistência dos cabos e dos contatos elétricos, além de empregar equipamentos relativamente simples. Adicionalmente, Zhou *et al.* (2015) ressaltam que a resistência de contato entre eletrodos e solo pode introduzir erros significativos nas medições, tornando o método de quatro pontas mais confiável.

Diante das diferentes metodologias disponíveis e das limitações associadas ao método de duas pontas, torna-se relevante investigar de forma mais aprofundada o método de quatro pontas em solos compactados, bem como compará-lo ao método de duas pontas. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo avaliar a influência do tempo de ensaio e do contato eletrodo–solo sob diferentes condições de interface, como o uso de gel condutor e a aplicação de carga mecânica, contribuindo para futuras aplicações geotécnicas e ambientais em campo.

2. METODOLOGIA

O fluxograma da Figura 1 ilustra as etapas da metodologia empregada neste trabalho.

Figura 1 – Etapas da metodologia

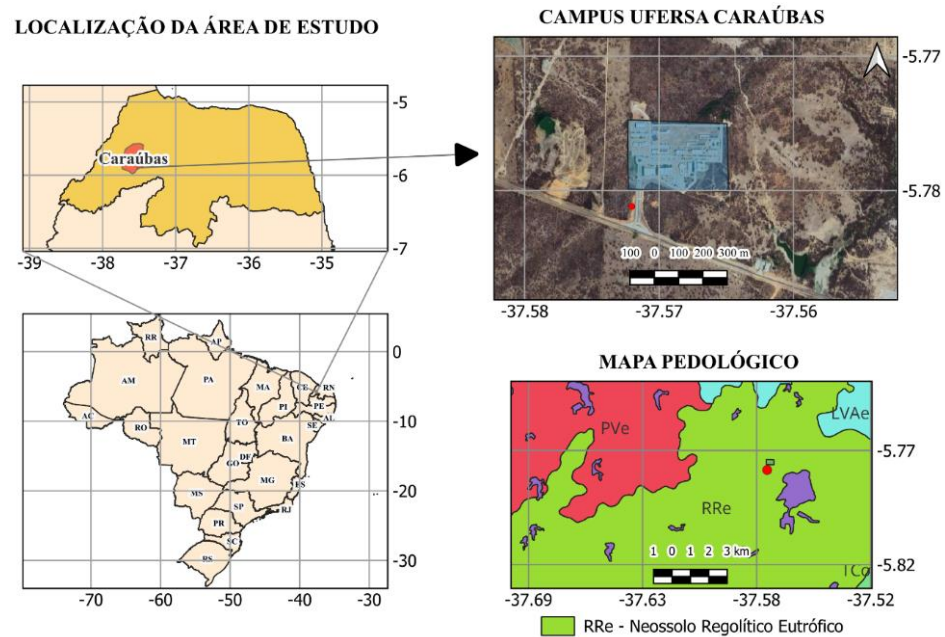


Fonte: A autora (2025)

2.1 Coleta do solo

O solo utilizado neste estudo foi coletado no campus da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), no município de Caraúbas-RN, nas coordenadas 5°46'31"S e 37°34'15"W. A coleta foi realizada em profundidade de 1 m, de modo a representar adequadamente o perfil do solo. O ponto exato de coleta encontra-se indicado no mapa apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Mapa Pedológico



Fonte: A autora (2025)

2.2 Caracterização do solo

A preparação do solo foi realizada conforme a NBR 6457/2024. Para a análise granulométrica conjunta com secagem prévia seguiu-se a NBR 7181/2024. Os limites de plasticidade e de liquidez foram determinados de acordo com a NBR 7180/2016 e a NBR 6459/2016, respectivamente. A massa específica dos grãos foi obtida segundo a NBR 6458/2016 e a DNER-ME 093/94. Para a determinação da massa específica aparente seca máxima e da umidade ótima, foi realizado o ensaio de compactação conforme a NBR 7182/2025, utilizando cilindro padrão e com reaproveitamento do solo. A permeabilidade do solo foi determinada por meio do ensaio de permeabilidade de carga variável, segundo a ABNT NBR 14545/2021 (tópico B). Os ensaios de caracterização realizados podem ser visualizados na Figura 3.

Figura 3 – Ensaio de Caracterização do solo



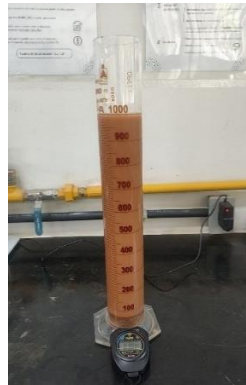
(a) Ensaio de compactação



(b) Limite de Liquidez e Plasticidade



(c) Ensaio do
Picnômetro:
densidade dos sólidos



(d) Ensaio de
granulometria conjunta:
Sedimentação



(e) Ensaio de
Permeabilidade

Fonte: A autora (2025)

2.3 Ensaio de Resistividade elétrica

Foram moldados 13 corpos de prova, com 10 cm de diâmetro e 12,77 cm de altura, utilizando-se a energia do Proctor normal e umidade próximo da ótima ($13,10 \pm 2\%$). Os ensaios de resistividade elétrica foram realizados após 1h de moldagem. Para controlar a perda de umidade, os corpos de prova foram acondicionados em recipiente térmico, com o objetivo de minimizar a perda de água até a realização dos ensaios de resistividade elétrica. Antes de cada ensaio, as amostras foram pesadas, visando à determinação do teor de umidade no início do ensaio de resistividade, além da análise dos índices físicos (Figura 4).

Figura 4 – Corpo de prova após moldagem



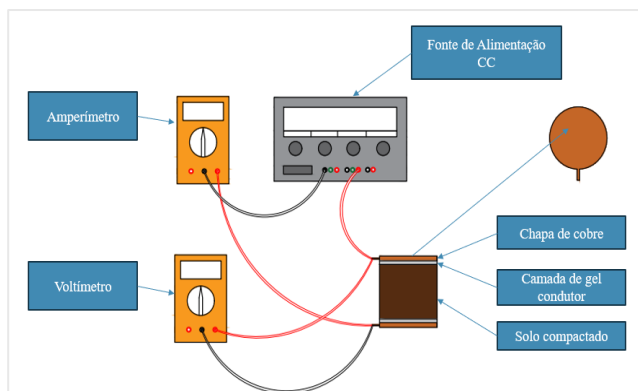
Fonte: A autora (2025)

2.3.1 Método das Quatro pontas

Neste trabalho, a resistividade elétrica dos corpos de prova compactados foi determinada por meio do método de quatro pontas, o qual foi adotado por minimizar os efeitos da resistência dos cabos e dos contatos elétricos, além de apresentar menor sensibilidade a variações de temperatura e a imperfeições nos pontos de contato.

Os materiais e equipamentos utilizados no ensaio foram: corpos de prova de solo compactado, com diâmetro de 10 cm e altura de 12,77 cm; uma fonte de alimentação (CC) para aplicação de tensão nos corpos de prova; placas de cobre com diâmetro de 10 cm e espessura de 1 mm; camada de gel condutor com aproximadamente 1 mm de espessura; peso de 2,50 kg para aumentar o contato entre as placas e o solo; um amperímetro para a leitura da corrente elétrica; um voltímetro para o monitoramento da tensão efetivamente aplicada ao corpo de prova; termômetro digital para verificação da temperatura dos eletrodos; e cabos elétricos para a montagem do circuito. O esquema do circuito empregado está apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Método das quatro pontas



(a) Esquema do Método das quatro pontas



(b) Esquema real do método de quatro pontas

Fonte: A autora (2025)

A partir das medições realizadas e das dimensões dos corpos de prova, a resistividade elétrica foi calculada por meio da Equação 1, de acordo com Aquino (2010).

$$\rho = \frac{V.A}{i.L} \quad (1)$$

em que, ρ é a resistividade elétrica ($\Omega.m$); V é a tensão elétrica (V); A é a área da seção transversal do corpo de prova (m); i é a corrente elétrica; (A); L é o comprimento do corpo de prova (m).

2.3.2 Análise da Corrente elétrica

Com o objetivo de verificar se o tempo de duração do ensaio interfere nos valores de corrente elétrica medidos, investigou-se o comportamento de amostras de solo compactado ao longo de 60 min. Além disso, considerando que alguns autores (Yamasaki, 2012; Campos 2015) realizam medições de resistividade elétrica usando método de quatro pontas sem a aplicação de gel condutor, avaliou-se também o efeito da passagem de corrente em corpos de prova com e sem gel.

Todos os corpos de prova foram moldados e ensaiados com umidade próxima à ótima. Os ensaios foram realizados com dois conjuntos experimentais: seis corpos de prova com utilização de gel condutor (CG) e seis corpos de prova sem o uso de gel condutor (SG).

Em todas as análises foi aplicada uma tensão de 60 V, sendo adotados três procedimentos distintos: aplicação contínua ao longo de 60 min (CG1, CG4, SG1 e SG6); aplicação no instante inicial (0 s) e reaplicação após 60 min de exposição (CG2, CG5, SG2 e SG5); e aplicação apenas após 60 min de exposição ao meio externo (CG3, CG6, SG3 e SG4). Esses procedimentos permitiram avaliar se, em corpos de prova submetidos à aplicação contínua de tensão elétrica, ocorreram reduções mais acentuadas da corrente em comparação com aqueles submetidos a medições pontuais.

2.3.3 Método das duas pontas

O método das duas pontas, no aspecto experimental, se diferencia do método das quatro pontas por não utilizar um medidor de tensão independente, empregando o valor de tensão fornecido pela própria fonte. Com a finalidade de comparar os métodos de medição por duas e

quatro pontas, foi moldado um corpo de prova compactado com umidade próxima à ótima. Em seguida, foram realizados ensaios com aplicação de 40 V na amostra, considerando as seguintes condições experimentais: método de duas pontas sem utilização de gel condutor; método de quatro pontas sem gel condutor; método de duas pontas com utilização de gel condutor; e método de quatro pontas com utilização de gel condutor. O arranjo experimental para a aplicação do método de duas pontas pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 – Método das duas pontas



Fonte: A autora (2025)

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

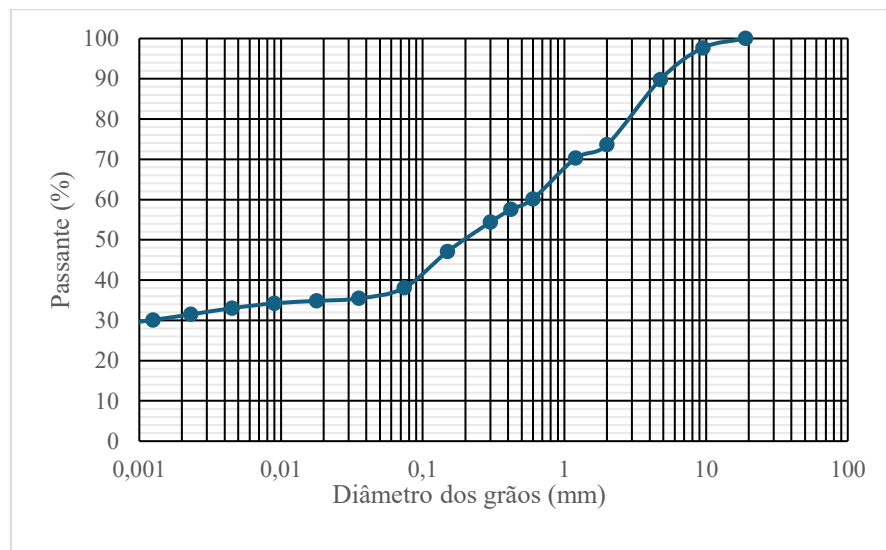
3.1 Caracterização do solo

De acordo com o mapa pedológico apresentando na Figura 2, o solo investigado trata-se de um Neossolo Regolítico eutrofrico, do qual deriva de rochas graníticas pertencentes à Suíte Intrusiva Dona Inês, caracterizadas por elevado grau de evolução geológica e altos teores de sílica (SiO_2), variando entre 72% e 77% (Galindo, 2017). Os ensaios de caracterização física indicaram Limite de Liquidez (LL) de 33% e Índice de Plasticidade (IP) de 11%, enquanto a massa específica dos sólidos foi determinada como $2,690 \text{ g/cm}^3$. O índice de atividade das argilas apresentou valor de 0,36, o que classifica sua atividade como inativa. O coeficiente de permeabilidade K_s foi de $1,12134\text{E-}05$, que é um valor característico de uma areia com elevado teor de finos (Pinto, 2006). A massa específica aparente seca máxima ($\rho_{\text{dmáx}}$) do solo é de $1,908 \text{ g/cm}^3$ e umidade ótima ($w_{\text{ótima}}$) é 13,10 %, que são valores característicos de um solo arenoso laterítico fino.

Como pode ser visto na Figura 7, a análise granulométrica mostrou predominância de fração arenosa com presença de finos argilosos, permitindo classificar o solo como areia

argilosa. Pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (do inglês, *Unified Soil Classification System* - SUCS), o material enquadra-se como SC-CL, correspondente a uma areia argilosa de baixa plasticidade. Já segundo o Departamento de Estradas de Rodagem dos Estados Unidos (do inglês, *Highway Research Board* - HRB), o solo é classificado como A-6, que de acordo com Santos (2006), pertence a um grupo que reúne solos argilosos suscetíveis a variações volumétricas entre condições secas e úmidas, apresentando comportamento regular como material de subleito, visto que seu Índice de Grupo é próximo de zero.

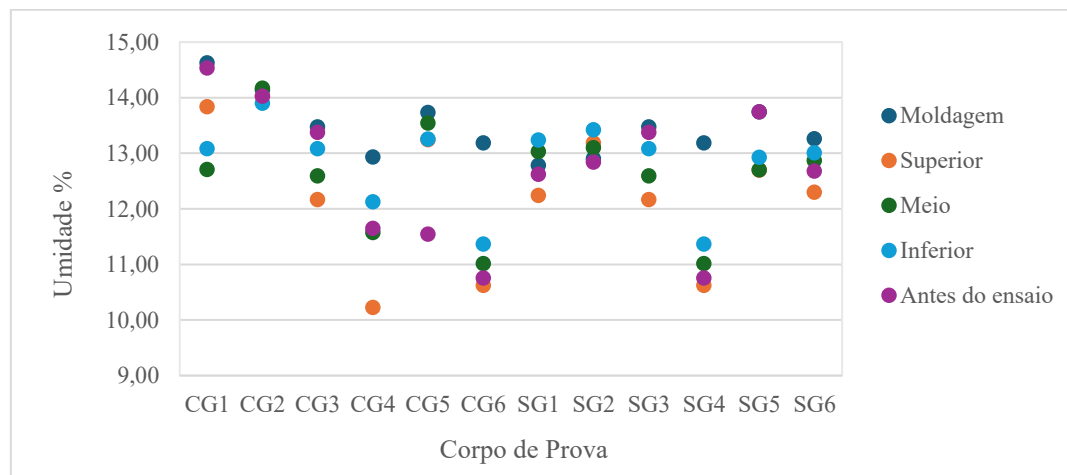
Figura 7 – Curva granulométrica



Fonte: A autora (2025)

As umidades dos corpos de prova após a moldagem, antes dos ensaios de resistividade, bem como aquelas medidas após o ensaio (nas regiões superior, média e inferior da amostra), estão apresentadas na Figura 8.

Figura 8 - Gráfico: Umidade x Corpo de prova



Fonte: A autora (2025)

Nos corpos de prova CG1 e CG4, submetidos à aplicação contínua de tensão por 60 minutos com uso de gel condutor, foi registrada uma perda de aproximadamente 2 % de umidade ao longo do ensaio, possivelmente decorrente do aquecimento do material associado ao efeito Joule. Já o corpo de prova CG5, no qual a tensão foi aplicada no instante inicial e reaplicada após 60 minutos, também com uso de gel condutor, apresentou um aumento em torno de 2 % no teor de umidade ao final do ensaio. No entanto, no corpo de prova CG2, ensaiado sob o mesmo procedimento, o teor de umidade permaneceu praticamente constante.

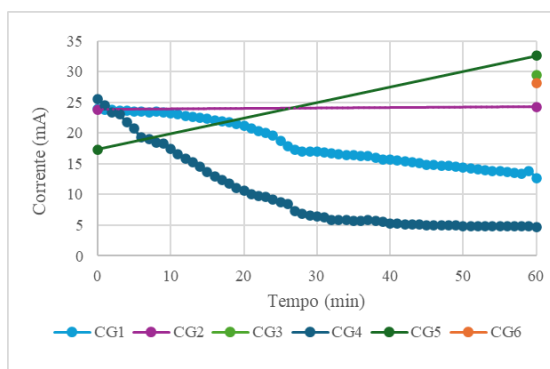
Adotando-se o mesmo procedimento experimental aplicado aos corpos de prova CG2 e CG5, porém sem a utilização de gel condutor, observou-se, no corpo de prova SG5, uma redução de 1 % no teor de umidade após 60 minutos. De maneira geral, não foi identificado aumento do teor de umidade nos corpos de prova ensaiados sem gel, indicando que eventuais acréscimos observados nas amostras com gel estão provavelmente associados à redução da viscosidade do gel em função do seu aquecimento. Esse comportamento influencia a distribuição de umidade e, consequentemente, os valores de corrente elétrica medidos.

3.2 Análise da Corrente elétrica

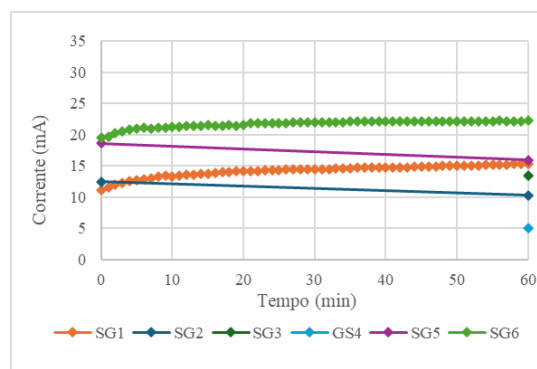
Os resultados obtidos referem-se aos ensaios realizados em 12 corpos de prova moldados e analisados na umidade próxima ótima, ensaiados em três condições diferentes.

Os gráficos de corrente elétrica em função do tempo para os corpos de prova com umidade próxima à ótima, com utilização de gel condutor e sem gel condutor, são apresentados na Figura 9.

Figura 9 – Gráfico: Corrente elétrica x Tempo



(a) Gráfico: Corrente elétrica x tempo (com gel)



(b) Gráfico: Corrente elétrica x tempo (sem gel)

Fonte: A autora (2025)

De maneira geral, observou-se que, sob a aplicação da mesma tensão elétrica, os corpos de prova ensaiados sem a utilização de gel condutor apresentaram valores de corrente elétrica

inferiores àqueles nos quais o gel foi empregado. Nos corpos de prova sem gel, os valores iniciais de corrente situaram-se na faixa de 11 a 19 mA, enquanto, nos corpos de prova com gel condutor, os valores iniciais variaram entre 17 e 25 mA.

Verificou-se também que, nos corpos de prova em que a corrente foi medida apenas após o período de 60 min, as amostras com gel condutor (CG3 e CG6) apresentaram valores em torno de 30 mA, ao passo que os corpos de prova sem gel (SG3 e SG4) registraram correntes significativamente menores, entre 5 e 13 mA.

Constatou-se que a aplicação contínua de tensão de 60 V ao longo de 60 minutos resultou em redução da corrente elétrica nas amostras com gel condutor. A amostra CG1 apresentou uma redução de 47 % ao final do ensaio, enquanto a amostra CG4 apresentou uma redução ainda mais significativa, de 81,35 %. Além disso, não foi observado aumento significativo da temperatura dos eletrodos durante a aplicação contínua da tensão, a qual se manteve em torno de 30 ± 2 °C.

Dessa forma, a redução da corrente pode estar associada à distribuição não uniforme da corrente na superfície da chapa de cobre, com concentração em pontos específicos, o que pode provocar aquecimento localizado do gel. Como consequência, ocorre a perda de consistência do material, favorecendo sua penetração nos vazios do solo e reduzindo progressivamente a área efetiva de contato elétrico.

Observou-se também a formação de bolhas no gel condutor após determinado tempo de ensaio, possivelmente associada à dissipação de energia concentrada na fina camada de gel, cujo pequeno volume intensifica o aquecimento em relação ao solo. Por se tratar de um material à base de água, podem ocorrer processos de eletrólise, evaporação parcial do solvente e formação de bolhas gasosas na interface eletrodo-gel-solo, resultando no surgimento de regiões isolantes, no aumento da resistência de contato e, conseqüentemente, na redução da corrente elétrica ao longo do tempo.

Por outro lado, nas amostras ensaiadas sem o uso de gel condutor, observou-se um aumento gradual da corrente elétrica ao longo do tempo quando a tensão foi aplicada continuamente por 60 min. As amostras SG1 e SG6 apresentaram elevação da corrente em relação aos valores iniciais de 27,74 % e 12,02 %, respectivamente.

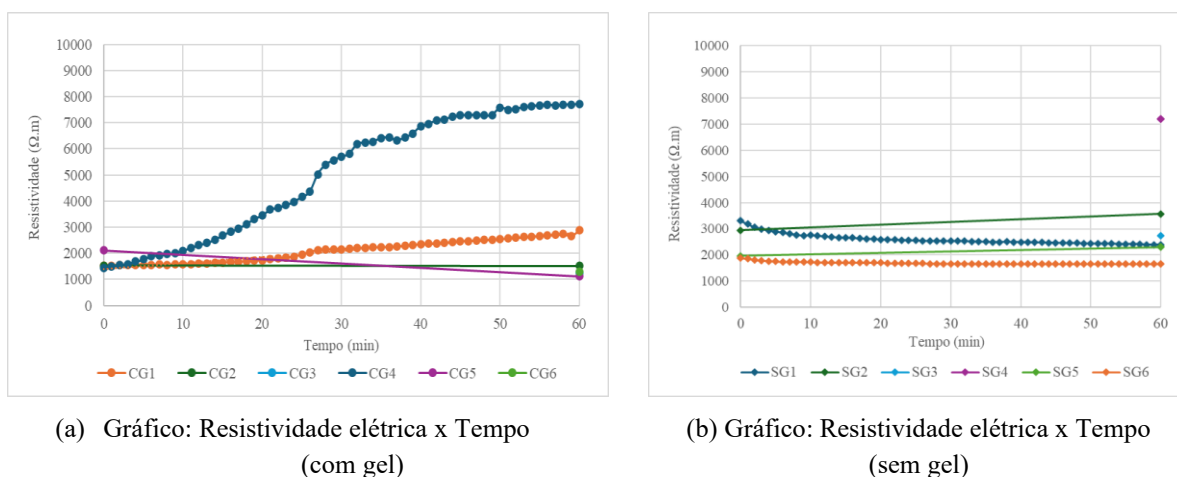
Esse comportamento pode ser explicado pela melhoria progressiva do contato mecânico entre o eletrodo metálico e o solo. Inicialmente, o contato metal-solo é limitado por microvazios e irregularidades superficiais, no entanto, a aplicação de carga mecânica pode favorecer o assentamento gradual da amostra, aumentando a área real de contato e reduzindo a resistência

de contato. Além disso, a aplicação contínua de tensão promove aquecimento do solo por efeito Joule, o que pode reduzir a resistividade elétrica em solos úmidos devido ao aumento da mobilidade iônica da água presente nos poros. Ademais, em regime de corrente contínua, também podem ocorrer fenômenos como eletromigração de íons e redistribuição de água próxima à interface eletrodo-solo, tornando essa região progressivamente mais condutiva e contribuindo para o aumento da corrente elétrica medida.

3.3 Análise da resistividade

Os gráficos de resistividade elétrica em função do tempo para os corpos de prova ensaiados com e sem a utilização de gel condutor são apresentados na Figura 10.

Figura 10 - Gráfico: Resistividade elétrica x Tempo



Fonte: A autora (2025)

Observa-se que os valores obtidos, em ambas as condições, situam-se dentro das faixas típicas de uma areia argilosa. De acordo com a NBR 7117:2020, a resistividade elétrica típica varia entre 500 e 5000 $\Omega \cdot m$ para argilas e entre 1000 e 8000 $\Omega \cdot m$ para areias.

Conforme destacado por Hazreek *et al.* (2015), a granulometria exerce papel fundamental nesse comportamento, uma vez que partículas mais finas favorecem maior condução elétrica, resultando em menores valores de resistividade, enquanto partículas mais grossas dificultam a propagação da corrente elétrica, resultando em resistividades mais elevadas. Dessa forma, solos arenosos tendem a apresentar resistividades maiores, enquanto solos argilosos, em geral, exibem valores inferiores.

Contudo, outros fatores também influenciam a resistividade elétrica dos solos, como a presença de misturas de diferentes materiais, a estratificação do perfil, o teor de umidade, a

temperatura, o grau de compactação, a pressão aplicada, bem como a composição química e a concentração de sais dissolvidos na água presente nos poros (Kindermann; Campagnolo, 1995).

No corpo de prova CG4, observou-se um aumento da resistividade elétrica de aproximadamente $1500 \Omega \cdot m$ no instante inicial para cerca de $8000 \Omega \cdot m$ após 60 minutos de ensaio. De forma semelhante, no corpo de prova CG1, verificou-se um acréscimo de aproximadamente duas vezes em relação ao valor inicial após uma hora de ensaio. Esses resultados podem estar associados à diminuição da viscosidade do gel condutor ao longo do ensaio.

Nos ensaios sem o uso de gel condutor, a resistividade apresentou valores ligeiramente maiores, variando entre 2000 e $3500 \Omega \cdot m$, mantendo-se praticamente constante ao longo dos 60 min de ensaio. Entretanto, o corpo de prova SG4, ao qual a tensão foi aplicada apenas após 60 min, apresentou resistividade de $7000 \Omega \cdot m$.

Campos (2015) utilizou o método de quatro pontas, para avaliar uma areia argilosa, sem o uso de gel condutor no contato entre a placa e o solo. Ele aplicou uma tensão eficaz (RMS) de 6 V, com forma de onda senoidal, razão cíclica de 50% e frequência de 1000 Hz nos corpos de prova e obteve valores de resistividade inferiores a $1000 \Omega \cdot m$ para umidades superiores a 6% e valores da ordem de $80000 \Omega \cdot m$ para umidades inferiores a esse limite, significativamente acima dos valores típicos para esse tipo de solo. Valores nessa mesma faixa para uma areia argilosa também foram apresentando por Yamasaki (2012), estudo utilizado por Campos (2015) como referência para a definição de seus procedimentos experimentais.

Dentre as possíveis causas para os elevados valores de resistividade elétrica observados nos solos analisados pelos autores Yamasaki (2012) e Campos (2015), destaca-se a hipótese de contato elétrico inadequado entre o solo e os eletrodos, uma vez que a aplicação de cargas de apenas 500 g sobre os corpos de prova compactados pode ter sido insuficiente para garantir uma interface eletrodo-solo eficiente. Outro fator a ser considerado é o uso de corrente alternada, que pode ter influenciado os valores de resistividade obtidos.

Já Aquino (2010) aplicou o método de duas pontas em uma argila arenosa, utilizando gel condutor para melhorar o contato elétrico entre o eletrodo e o solo. Ainda assim, foram obtidos valores de resistividade de até $21000 \Omega \cdot m$ para umidades inferiores a 10%, com estabilização dos resultados a partir de aproximadamente 25%. Esses valores elevados podem estar relacionados, entre outros fatores, ao método empregado e ao tempo de ensaio.

3.4 Método das Duas pontas

Ao analisar um corpo de prova utilizando os métodos de duas e quatro pontas, com e sem utilização de gel condutor, sob aplicação de uma tensão de 40 V, observou-se que os valores de resistividade elétrica obtidos não apresentaram diferenças significativas entre os métodos. Esse resultado indica que o método de duas pontas pode fornecer estimativas compatíveis da resistividade elétrica.

Entretanto, o método de quatro pontas mostra-se mais adequado para esse tipo de ensaio, uma vez que a medição da tensão é realizada por meio de um voltímetro independente, reduzindo a influência da resistência de contato e permitindo a obtenção de valores mais representativos da resistividade do material.

Conforme apresentado na Tabela 1, a utilização de gel condutor resultou em diferenças de 51,14% nos valores de resistividade para o método de duas pontas, enquanto, para o método de quatro pontas, a diferença observada foi de 55,39%, o que demonstra a influência do gel condutor nas medições, independentemente do método empregado.

Tabela 1 – Comparação dos métodos de duas e quatro pontas

Método	Resistividade ($\Omega \cdot m$)
Duas pontas (sem gel)	5195,61
Quatro pontas (sem gel)	5651,93
Duas pontas (com gel)	2538,47
Quatro pontas (com gel)	2521,03

Fonte: A autora (2025)

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da corrente elétrica em corpos de prova de uma areia argilosa compactada com energia Proctor Normal, utilizando o método de quatro pontas em três condições distintas de aplicação de tensão, com e sem gel condutor, revelou comportamentos distintos. Nos ensaios com gel, a corrente elétrica apresentou tendência a diminuir gradativamente ao longo do tempo, possivelmente devido à dissipação de potência concentrada na camada de gel e à ocorrência de eletrólise. Por outro lado, nos ensaios sem o uso de gel, os corpos de prova apresentaram valores de resistividade maiores em comparação aos ensaios com gel. Além disso, aplicação gradual de tensão resultou em aumento progressivo da corrente, que se estabilizou ao longo do tempo.

Os valores de resistividade obtidos, com e sem a utilização de gel condutor, situaram-se dentro da faixa típica de uma areia argilosa. Entretanto, a resistividade dos corpos de prova sem gel foi mais elevada do que nos ensaios com gel, possivelmente devido ao contato elétrico

inadequado entre eletrodo e solo, indicando que a simples aplicação de carga no corpo de prova pode não ser suficiente para garantir uma boa interface. Esse comportamento da corrente também foi observado nos ensaios realizados pelo método de duas pontas, que apresentou resultados de resistividade semelhantes aos do método de quatro pontas.

Diante disso, evidencia-se a necessidade de combinar o uso de gel condutor com carga adequada para assegurar bom contato elétrico entre solo e eletrodo. No entanto, recomenda-se a aplicação de tensão pontual superior a 40 V, a fim de evitar ensaios prolongados, que podem provocar redução da corrente elétrica e interferir na medição da resistividade. Ademais, para trabalhos futuros, sugere-se a realização de análises de resistividade utilizando eletrodos confeccionados com outros materiais condutores, bem como a avaliação do comportamento elétrico do solo sob corrente alternada.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016. **NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016. **NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016. **NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016. **NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2024. **NBR 6457: Solos – Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade.** Rio de Janeiro, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020. **NBR 7117-1: Parâmetros do solo para projetos de aterramentos elétricos – Parte 1: Medição da resistividade e modelagem geolétrica.** Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021. **NBR 14545: Solo – determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável.** Rio de Janeiro, 2021.
-

- AQUINO, F. R. **Estudo comparativo entre a resistividade elétrica e características geotécnicas de um solo argiloso compactado**. 2010. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2010. Disponível em: <https://www.repositorio.unb.br/handle/10482/7219>. Acesso em: 11 out. 2025.
- CAMPOS, L. G. **Variação da resistividade elétrica para três solos não saturados**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/efc29a82-7c8b-4ebf-9e22-19bb16e56af0/content>. Acesso em: 11 out. 2025.
- CHOU, C.; PERUZZO, L.; FALCO, N.; HAO, Z.; MARIA, B.; WANG, J.; WU, Y. Improving evapotranspiration computation with electrical resistivity tomography in a maize field. **Vadose Zone Journal**, v. 23, n. 1, p. 1-15, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/vzj2.20290>. Acesso em: 11 out. 2025.
- DEVI, A.; ISRAIL, M.; AMBALOGAN, R.; GUPTA, P. K. Subsurface soil characterization using geoelectrical and geotechnical investigations at a bridge site in Uttarakhand Himalayan region. **Journal of Applied Geophysics**. v. 144, n. 1, p. 78-85, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.07.005>. Acesso em: 14 dez. 2025.
- GALINDO, A. C.; SRIVASTAVA, N. K.; SOUZA, L. C.; MAIA, H. N.; SÁ, J. M.; ARAÚJO, A. G. S.; OLIVEIRA, M.T. D.; FILLIPPI, R. R. **Geologia e recursos minerais da folha Apodi, SB.24-X-C-VI: estado do Rio Grande do Norte**. Recife: CPRM, 2017. 182 p. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/17718>. Acesso em: 11 out. 2025.
- HAZREEK, Z.; AZIMAN, M.; AZHAR, A.; CHITRAL, W.; FAUZIAH, A.; ROSLI, S. The behaviour of laboratory soil electrical resistivity value under basic soil properties influences. In: AEROEARTH, 2014, Bali. **Anais [...]**. Bali: IOP Publishing, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/23/1/012002>.
- INNOCENTI, A.; PAZZI, V.; NÁPOLIS, M.; FANTI, R.; ORLANDINI, S. Assessing the efficiency of the irrigation system in a horticulture field through time-lapse electrical resistivity tomography. **Irrigation Science**, p. 1-15, 18 Mar. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00271-024-00919-5>.
- KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento elétrico**. 3. ed. Porto Alegre: Sagra-D.C. Luzzatto, 1995. Disponível em: <https://coletaneaeletrica.com.br/doc/ebook4.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2025.
- MIKOS, A. P. **Caracterização geotécnica de campo experimental para avaliação do método não destrutivo da resistência elétrica em solo grampeado**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Disponível em: <https://gegeo.ufpr.br/wp-content/uploads/2024/09/mikos-2017.pdf>. Acesso em: 11 out. 2025.
- MATHIAS, I. C.; RUFINO, C. D.; PIRES, W. M.; SOUSA, T. G.; PAULA, A. S. Processamento de dados de condutividade elétrica pela técnica de quatro pontas para

avaliação da microestrutura dos materiais. **Brazilian Journal of Development**, v. 9, n. 05, p. 14828-14838, 2023. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv9n5-022>

PINTO, C. de S. **Curso básico de mecânica dos solos: com exercícios resolvidos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SANTOS, E. F. **Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-29052007-163758/publico/EFS.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2025.

SILVA, A. C. S. C.; INFANTE, A. P. M.; MANZONI, C. P.; GUIMARÃES, C. C.; REIS, A. O. Aplicação do método da resistividade em estudos hidrogeológicos no distrito de Coqueiral, Nobres-MT. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2021. **Anais** [...]. São Paulo: ABAS, 2021. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29460>. Acesso em: 14 dez. 2025.

XIE, X.; LI, D.; YAN, J.; PEI, J.; WU, W.; LIU, Z.; DING, X. Complex resistivity spectrum of pollutant soils with low-concentration heavy metals. **Heliyon**, v. 9, n. 10, e20541, 2023. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e20541.

YAMASAKI, M. T. **Influência da salinidade do fluido na avaliação da compactação e da resistividade elétrica de dois solos**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia, Bauru, 2012. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/92972>. Acesso em: 22 ago. 2025.

ZHOU, M.; WANG, J.; CAI, L.; FAN, Y.; ZHENG, Z. Investigations on laboratory factors affecting soil resistivity and measurement. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 51, n. 6, p. 5358-5365, Nov./Dec. 2015. DOI: 10.1109/TIA.2015.2442223.
