

# APLICANDO A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA NO CONTROLE DA COMPACTAÇÃO DE PILHAS DE REJEITO DE MINERAÇÃO

## Applying electrical conductivity to the compaction control of piles of mining waste disposal

João Marcos Miranda Vaillant<sup>a</sup>, Lara Magalhães Batista e Costa<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Departamento de Engenharia Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Brasil

<sup>b</sup>Chammas Engenharia, Brasil

**RESUMO** – O estudo avalia o uso da condutividade elétrica como método alternativo no controle da compactação de Pilhas de Disposição de Rejeito de Mineração (PDR). As curvas de compactação do rejeito em laboratório foram obtidas na Energia Normal e, sobre essas mesmas amostras, foram também realizadas medidas de condutividade elétrica. O equipamento para aferição das medidas elétricas foi construído para uma tensão contínua de 12V, utilizando dois eletrodos de haste de aço inoxidável, com ponta biselada, com 70 mm de comprimento e 40 mm de espaçamento entre eles. Os resultados indicaram que o grau de compactação (GC) do rejeito de mineração varia com a condutividade elétrica conforme uma função quadrática. Os valores da condutividade elétrica para um mesmo GC são maiores na compactação de campo, cuja curva se aproxima mais da compactação manual controlada em laboratório. Conclui-se que, para obter um GC=100%, ou maior, em relação à Energia Normal, a camada compactada do rejeito de mineração no campo deve apresentar uma condutividade elétrica igual ou superior a 0,23 mS/cm.

**ABSTRACT** – The study evaluates the use of electrical conductivity as an alternative method in controlling the compaction of piles of mining waste disposal (PWD). The laboratory tailings compaction curves were obtained in normal energy and, on these same samples, measures of electrical conductivity were also performed. Electric measurement equipment was built for a continuous 12V voltage, using two stainless steel rod electrodes with 70 mm long and 40 mm spacing between them. The results indicated that the degree of compaction of mining tailings varies with electrical conductivity according to a quadratic function. The values of electrical conductivity to the same GC are higher in field compaction, whose curve is closer to the manual controlled compaction in the laboratory. It is concluded that, to obtain a GC = 100% or greater than normal energy, the compacted layer of the mining tailings studied must have an electrical conductivity equal to or greater than 0,23 mS/cm.

**Palavras Chave** – controle de compactação, pilhas de rejeito, condutividade elétrica

**Keywords** – compaction control, piles of mining waste, electrical conductivity

## 1 – INTRODUÇÃO

Métodos alternativos para a disposição de rejeitos de mineração são cada vez mais estudados, para substituição aos diques/barragens. No Brasil, já é realidade a construção de estruturas chamadas

---

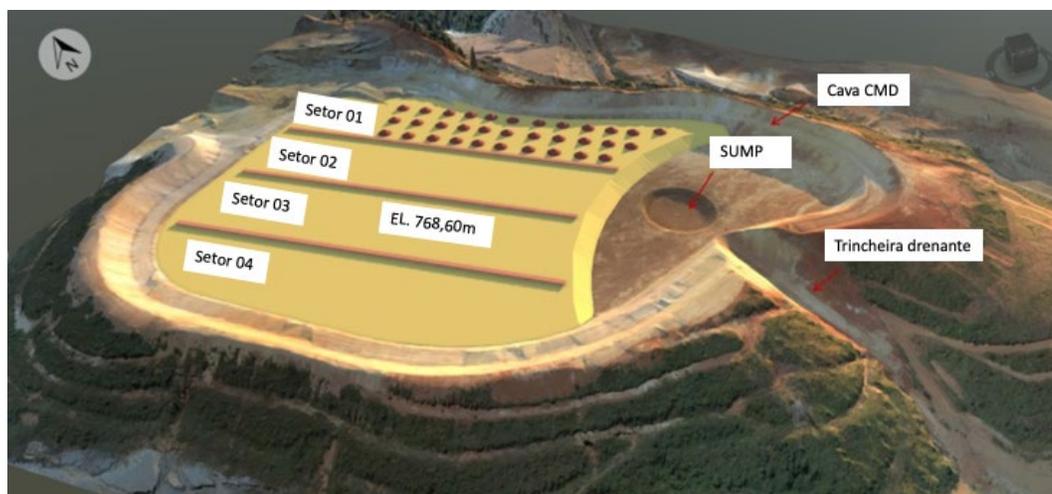
E-mails: jmvaillant@gmail.com (J. Vaillant), laramagalhaesc@gmail.com (L. Costa)

ORCID: [orcid.org/0000-0001-8705-9037](https://orcid.org/0000-0001-8705-9037), [orcid.org/0009-0006-7024-0570](https://orcid.org/0009-0006-7024-0570)

de Pilhas de Disposição de Rejeito (PDR), também conhecidas como Empilhamentos Drenados. Essas novas estruturas têm sua construção implementada com base em projeto executivo detalhado, contendo inúmeros critérios técnicos.

A norma NBR 13028:2017 (ABNT, 2017) define rejeito como fração mineral gerada no processo de tratamento de minérios, com baixo ou nenhum valor econômico, que contém maior proporção de “ganga” ou minerais de valor secundário em relação aos demais produtos obtidos numa dada operação de beneficiamento. A “ganga” é a matéria mineral rochosa ou terrosa sem utilidade, que ocorre com o minério metálico ou outros minérios de uma jazida.

A disposição de rejeito filtrado em pilhas exige um controle tecnológico, regido por um programa de controle e garantia da qualidade. Nesse sentido, a sua operação envolve um conjunto significativo de dados que são registrados e analisados, verificando as diretrizes de projeto e os parâmetros geotécnicos de qualidade especificados que norteiam a operação de uma estrutura em execução. E, nesse contexto, surge a necessidade de substituir as técnicas tradicionais de controle de compactação, por técnicas alternativas que garantam mais rapidez e operacionalidade ao processo. A Figura 1 ilustra uma pilha de rejeito em construção.<sup>1</sup>



**Fig. 1** – Esquema da distribuição dos setores de compactação do rejeito na pilha (Adaptada de Costa, 2023).

Entre as novas técnicas para controle de compactação, em uso ou em estudo, citam-se o EDG – Electrical Density Gauges; NDG - Nuclear Density Gauge; TDR - Time Domain Reflectometry (Meehan e Hertz, 2011); DCP –Dynamic Cone Penetrometer (Cosentino e Shaban, 2018), entre outros. Consta-se que os métodos elétricos vêm ganhando mais atenção devido à sua rapidez, economia e praticidade de leitura. Esses métodos, porém, apresentam equipamentos de alto custo, complexidade de leitura e, muitas vezes, baixa precisão de resultado. Assim sendo, a busca por um método que apresente custo reduzido, praticidade e rapidez na leitura e boa precisão nos resultados, ainda se faz necessária. É nesse contexto que esse artigo se justifica e foca seus objetivos.

<sup>1</sup>CMD (Cava da Mina Divisa)

SUMP (estrutura similar a caixa coletora com função de dissipar a energia da água e/ou reter materiais oriundos da drenagem superficial e possibilitar o direcionamento ordenado).

## 2 – REVISÃO TEÓRICA

Segundo Nery (2013), a técnica de disposição de rejeitos em pilha, apresenta diversas vantagens tais como: maior estabilidade, estrutura mais sólida e segura, alta densidade do resíduo disposto (maior concentração de sólidos por unidade de volume), o que aumenta a capacidade de armazenamento do depósito. Além disso, apresenta baixo potencial de risco, reduzindo as chances de ocorrência de incidentes e vazamentos, melhorando as condições para o encerramento do depósito, com menor custo e período de monitoramento necessários.

Nery (2013) destaca, no entanto, que um dos principais desafios enfrentados por este método de disposição de resíduos secos está relacionado com as variações das condições climáticas. Períodos de chuvas intensas ao longo do ano podem impactar o processo de compactação do rejeito conforme especificado no projeto.

Em estudo realizado por Silva (2018), é destacado que as diretrizes para a elaboração de um projeto de empilhamento de rejeitos dependem, essencialmente, das características geotécnicas do local de fundação, das propriedades do rejeito e das condições climáticas da região. Durante a pesquisa, foi observado que o grau de compactação, expresso pelos índices de vazios do rejeito empilhado, exerce uma grande influência na estrutura, uma vez que está diretamente relacionado com o comportamento do material. Essa característica desempenha um papel fundamental na análise dos parâmetros de resistência, pois quando ocorre expansão do material, há um aumento nas tensões efetivas e uma redução nas poropressões, tornando-o mais suscetível à liquefação.

A tecnologia de compactação dos solos no campo é bastante conhecida, e realizada em camadas cuja espessura varia em função do tipo de solo (Sobreira *et al*, 2018; Craig e Knappet, 2018). A densidade seca das camadas compactadas, bem como o seu teor de umidade, são parâmetros de projeto que precisam ser controlados a cada camada. Esse controle de compactação é, na maioria dos casos, feito com o Cilindro Biselado, Frasco de Areia e Ensaio de Hilf. Em substituição a esses métodos tradicionais e diretos, introduziu-se os métodos indiretos de controle, obtidos por meio de correlações com alguma grandeza física. Neste contexto, os métodos baseados em medidas elétricas vêm ganhando destaque nos últimos anos.

Destaca-se o estudo de Meehan e Hertz (2011), para avaliação de um novo método de controle de compactação, denominado EDG (Electrical Density Gauges). O estudo foi realizado em duas frentes de serviço de campo onde foram utilizados outros métodos indiretos de controle para comparação, tais como: EIS (Electrical Impedance Spectroscopy); TDR (Time Domain Reflectometry); CS (Capacitance Sensors), NDG (Nuclear Density Gauge), e outros dois métodos convencionais como comparativo.

O método EDG, criado recentemente para controle de compactação de solo, possui um equipamento portátil, leve que utiliza fonte de corrente alternada (AC). O equipamento utiliza frequência de 3 MHz e quatro (4) elétrodos de aço, através das quais são efetuadas as medidas de corrente e tensão. Os dados de leitura permitem os cálculos da resistência e impedância do material, que poderão ser corrigidos em função da temperatura. A partir destes parâmetros elétricos obtém-se por correlação os parâmetros de compactação do solo estudado (densidade seca e teor de umidade), conforme a norma ASTM (2011).

O método EIS mede, igualmente, as propriedades dielétricas do solo em função da frequência. Segundo Meehan e Hertz (2011) sua teoria é baseada na interação de um campo elétrico externo com o “momento do dipolo elétrico” do meio, em que a impedância é medida para uma determinada faixa de frequência. A partir das propriedades dielétricas do solo, são estabelecidas correlações com a umidade e densidade do solo.

O método TDR foi inicialmente criado para medir apenas o teor de umidade do solo. Consiste basicamente na medida da velocidade de uma onda eletromagnética através de uma linha de transmissão. Esta velocidade está relacionada com a constante dielétrica do meio entre condutores equidistantes inseridos no solo. O equipamento TDR envia um pulso de voltagem através de um cabo coaxial e, quando esse sinal atinge o começo da sonda, parte dele é refletido de volta ao

aparelho. Isso decorre da incompatibilidade na impedância entre o cabo e a sonda. Quando a porção remanescente do sinal alcança o final da sonda, a reflexão ocorre novamente e, ambas reflexões causam uma descontinuidade do sinal, que é registada no TDR. E, a diferença de tempo entre essas duas descontinuidades é o tempo requerido para o sinal percorrer duas vezes o comprimento da sonda inserida no solo. Desse modo, a velocidade de onda é relacionada com a constante dielétrica do meio que, por sua vez, está relacionada com o teor de umidade volumétrico do solo. Posteriormente, essa umidade foi associada à umidade gravimétrica e à densidade do solo (Meehan e Hertz, 2011).

O estudo de Meehan e Hertz (2011) conclui que existem muitas incertezas e fontes de erro nas leituras de campo do método EDG. Isso foi atribuído, em parte, às variações no solo de empréstimo dos aterros, às dificuldades no controle da umidade e no processo de calibração do EDG. Constatou-se que a temperatura não afetou substancialmente as medidas elétricas no campo. O método que melhor aferiu a densidade do solo no campo, em relação ao método convencional, foi o NDG (Nuclear Density Gauge).

Outros métodos elétricos alternativos foram estudados ao longo da última década, para obtenção de relações com os parâmetros de compactação do solo (Islam *et al.*, 2012; Vaillant *et al.*, 2015; Vaillant e Cardoso, 2016; Al Rashid *et al.*, 2018; Mostafa *et al.*, 2017). Muitos dos quais já indicavam a sua aplicabilidade na avaliação do grau de compactação. Porém, foram poucos os estudos que apresentaram resultados obtidos em condições de campo. A seguir, serão apresentados alguns dos métodos citados e os resultados mais relevantes para o escopo dessa pesquisa.

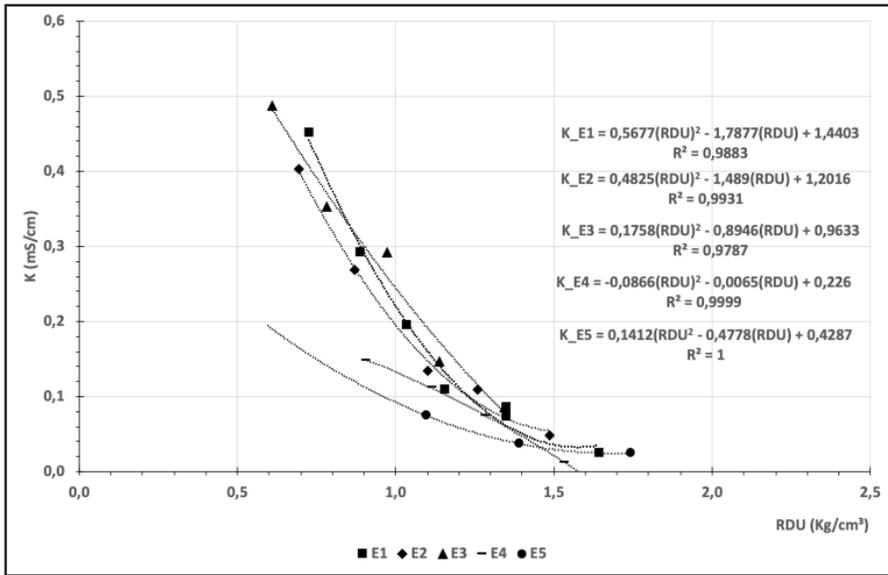
Islam *et al.* (2012) conduziram um experimento em laboratório para quatro (4) amostras de solo de diferentes localidades, e compactadas em diferentes teores de umidade. O estudo utilizou a energia Proctor Normal (ASTM, 2007) e a resistividade elétrica foi medida por meio de equipamento sensível a alta resistência, na escala de  $M\Omega$ . A tensão foi transmitida ao solo por meio de elétrodos cravados no topo da amostra compactada.

Kowalczyk *et al.* (2014) investigaram a correlação entre a resistividade elétrica (RE) de um solo não-coesivo com o seu grau de compactação (GC). Foram estudadas amostras cobrindo o espectro das faixas granulométricas da areia (fina, média e grossa), que foram compactadas em laboratório em caixa com dimensão de 60x60x50cm sendo respectivamente, comprimento, largura e altura. As medidas de resistividade elétrica foram tomadas a partir de uma configuração Wenner (4 elétrodos de haste), variando o espaçamento dos elétrodos de corrente em três posições distintas. Os resultados indicaram haver uma relação linear entre GC x RE. Os autores concluíram que a RE é potencialmente bem adaptada ao método de leitura empregado para correlação com o GC. Embora considerem que a RE não deve ser usada como “método direto” para determinação de GC, eles a consideram uma excelente perspectiva de uso no monitoramento dos parâmetros do solo.

Vaillant *et al.* (2015) conduziram um experimento em laboratório para obtenção de relações da condutividade elétrica (CE) com os parâmetros de compactação para várias amostras de solo. Nesse trabalho, os autores almejavam uma futura aplicação do método em condições de campo, para avaliação do grau de compactação. Assim sendo, o equipamento de leitura utilizado possuía dimensões tais que permitisse a sua aplicação em campo. Os autores entendiam que a utilização do mesmo equipamento em ambas as condições, reduziria as fontes de erro. Ou seja, o equipamento já estaria calibrado em laboratório e as relações obtidas com a condutividade elétrica poderiam ser utilizadas para controle da compactação. Nesse estudo, os autores observaram uma relação linear expressiva da umidade com a condutividade elétrica em todas as amostras estudadas. Observaram, ainda, que o coeficiente linear dessa relação, que denominaram de (reta de condutividade), apresentava também uma relação linear expressiva com a densidade seca máxima. Assim, foram propostas curvas representativas para o espectro de solos da região estudada, em função desse coeficiente.

Vaillant e Cardoso (2016), aplicaram o mesmo método para um solo argiloso estabilizado com cimento, variando as proporções (4 dosagens) e a energia de compactação (compactação manual,

com densidade controlada). Nesse estudo, os autores introduziram uma variável combinada entre os parâmetros de compactação, denominada RDU<sup>2</sup> (relação de densidade com a umidade, ou seja, densidade dividida pela umidade) para facilidade de apresentação da relação em apenas um gráfico cartesiano. Os resultados estão apresentados na Figura 2.



**Fig. 2** – Relação da condutividade elétrica (CE) com o parâmetro combinado RDU (densidade/umidade), para diferentes energias de compactação (Adaptado de Vaillant e Cardoso, 2016).

Em pesquisa anterior, Vaillant (2014) verificou a variação da condutividade elétrica de uma mesma amostra de solo submetida a dois métodos diferentes de compactação: Proctor Normal e Manual (densidade e umidade especificada). Os resultados podem ser vistos na Figura 3, onde se nota uma nítida influência do modo de compactação sobre os parâmetros de compactação combinados, conforme Vaillant e Cardoso (2016).

Inim *et al.* (2016) apresentaram um estudo realizado em laboratório para avaliar a correlação da resistividade elétrica (RE) com os parâmetros de compactação de um solo laterítico estabilizado com cimento. As amostras foram compactadas com três diferentes energias, variando os teores de cimento em quatro diferentes dosagens.

A resistividade elétrica foi medida com um arranjo montado com quatro elétrodos e, para esta medida, foram utilizadas amostras cuidadosamente moldadas nas dimensões de 11,0 x 6,0 x 7,0 cm (comprimento, largura e espessura). O resultado para uma das amostras pode ser visualizado no gráfico da Figura 4, no qual se observa a tendência de uma relação linear entre a resistividade e os parâmetros de compactação (densidade seca e teor de umidade). Porém, segundo os autores, para as amostras de solo derivadas de Gnaisse, a tendência observada na relação entre resistividade e densidade, foi do tipo polinomial.

Al Rashid *et al.* (2018) destacaram os efeitos do teor de umidade, composição do solo e densidade seca na resistividade elétrica dos solos. Utilizou-se o método de Wenner com 4 elétrodos de aço. O comportamento da resistividade elétrica em função da composição do solo, foi avaliado a partir de misturas em diferentes proporções de Caulim (K) e Bentonita (B) (90%K-10%B; 80%K-

<sup>2</sup> No artigo original de Vaillant e Cardoso essa variável foi nomeada como RDW.

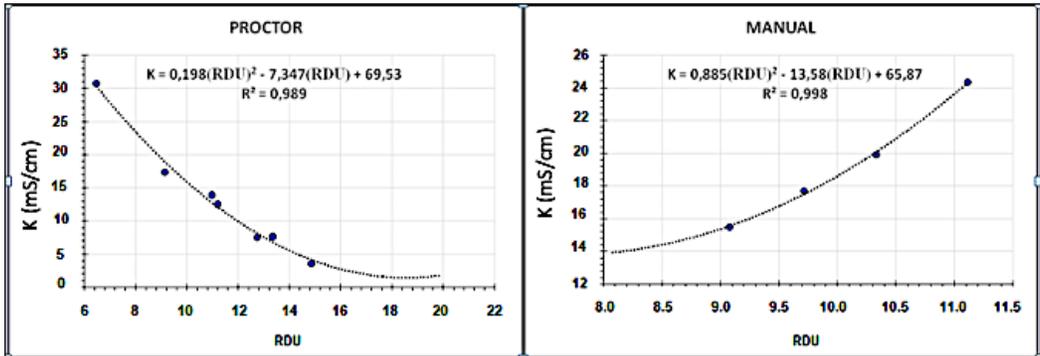


Fig. 3 – Comportamento da condutividade elétrica (K) com o parâmetro combinado RDU, para um solo compactado em dois diferentes modos de compactação (convencional e manual) (Vaillant, 2014)

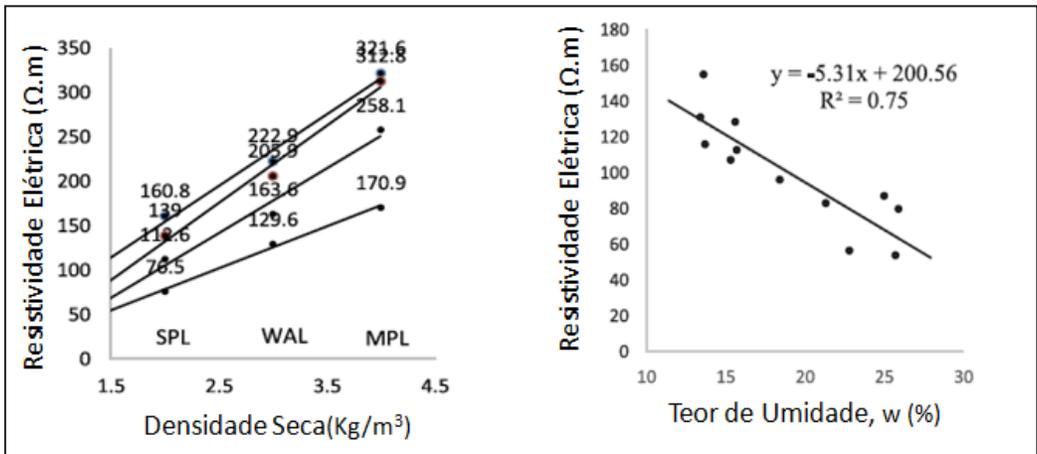
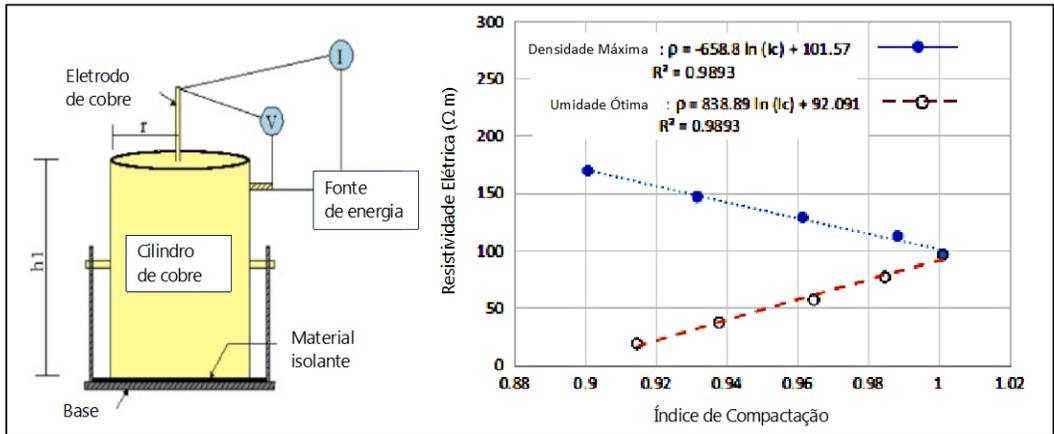


Fig. 4 – Esquema de leitura de Resistividade Elétrica em amostra de solo Laterítico, e relações com os parâmetros de compactação (Adaptado de Inim *et al.*, 2016).

20%B; 70%K-30%B; 60%K-40%B) e Caulim (K) e Areia (S) (90%K-10%S; 80%K20%S; 70%K-30%S; 60%K-40%S). Observou-se nos resultados, que o aumento do teor de bentonita na mistura diminui sua resistividade elétrica e, enquanto um aumento no teor de areia, aumenta a resistividade elétrica. A relação da RE com o teor de umidade foi inversamente proporcional, como observado também nos estudos mencionados anteriormente. Ou seja, para uma mesma densidade seca a resistividade elétrica diminui com o aumento da umidade e com o aumento no teor de argila.

Mostafa *et al.* (2018) observaram que a RE diminui com o aumento do teor de finos. O equipamento para leitura da resistividade elétrica foi montado com arranjo de 2 elétrodos, sendo um deles o próprio cilindro de compactação do solo, conforme ilustrado na Figura 5. Os resultados indicaram que, para altos teores de umidade (ramo úmido da curva de compactação), a resistividade elétrica diminui com o aumento no teor de finos e com o grau de compactação. No entanto, para baixas umidades (ramo seco da curva de compactação), a resistividade elétrica aumentou com o aumento do grau de compactação. O autor conclui que, a condutividade pode ser considerada como uma ferramenta eficaz de controle de qualidade da compactação de campo.



**Fig. 5** – Método de medição da Resistividade Elétrica (RE) para uma amostra de solo, e a relação dos parâmetros de compactação com o Índice de Compactação (Traduzida de Mostafa *et al.*, 2018).

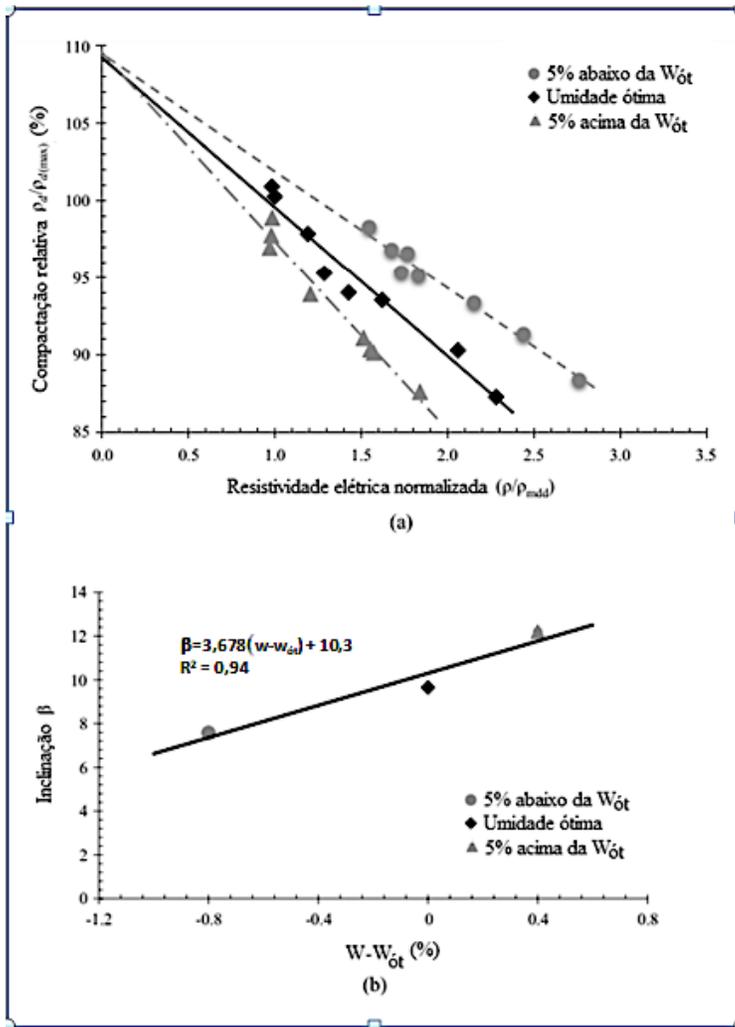
Mais recentemente, Owusu-Nimo *et al.* (2023) estudaram as relações da resistividade elétrica com os parâmetros de compactação de um solo laterítico de Gana. Os autores observaram que a densidade seca varia linearmente com o aumento da resistividade elétrica, para um mesmo teor de umidade. Essa relação foi apresentada em gráfico para a umidade ótima e para teores 5% abaixo e 5% acima dessa umidade, aproximadamente. Constata-se que essa tendência está totalmente de acordo com aquelas apresentadas nas referências mencionadas até aqui. Com exceção de Vaillant *et al.* (2015) e Inim *et al.* (2016), cujos trabalhos utilizaram metodologias diferentes. No primeiro caso, a resistividade elétrica foi medida durante o ensaio de compactação e, portanto, houve variação do teor de umidade e, no segundo caso, foram utilizadas amostras de solo estabilizadas com cimento.

Os dados obtidos no trabalho de Owusu-Nimo *et al.* (2023) foram normalizados, isto é, foram divididos pelo valor de densidade seca máxima e de teor de umidade ótimo obtidos no ensaio de compactação. Daí, obteve-se a relação gráfica mostrada na Figura 6, cujos coeficientes foram utilizados para obtenção de uma relação matemática indicada para o controle de compactação em condições de campo:

$$\frac{\rho_d}{\rho_{d(max)}} = \alpha - \beta \frac{\rho}{\rho_{mda}} \quad (1)$$

O coeficiente linear (\$\alpha\$) apresenta um valor aproximado de 109 e representa um grau de compactação máximo (equivalente a uma resistividade nula). O coeficiente angular (\$\beta\$) varia em função da diferença do teor de umidade medido em relação teor de umidade ótimo, conforme a relação dada na Fig. 6b. Esta equação forneceria, portanto, uma relação entre a resistividade elétrica de campo com o grau de compactação. Esse estudo, porém, não foi validado em campo.

Além desses estudos descritos até aqui, a literatura contempla outros tantos que visam estabelecer relações da resistividade elétrica com os parâmetros geotécnicos dos solos. Nesses estudos são utilizados equipamentos e métodos com as mais variadas configurações de leitura de corrente ou tensão, conforme demonstrado. Além das relações da resistividade com a densidade seca e teor umidade, outras propriedades do solo também já foram relacionadas. Dentre estas citam-se a mineralogia (Al Rashid *et al.*, 2018), tamanho dos grãos (Kowalczyk *et al.*, 2014); energia de compactação (Inim *et al.*, 2016; Vaillant e Cardoso, 2016), coesão e ângulo de atrito (Bin-Razali e Osman, 2011), índice de vazios (Vaillant e Santos, 2015; Alibrahim e Uygur, 2021) e CBR (Vaillant *et al.*, 2018).



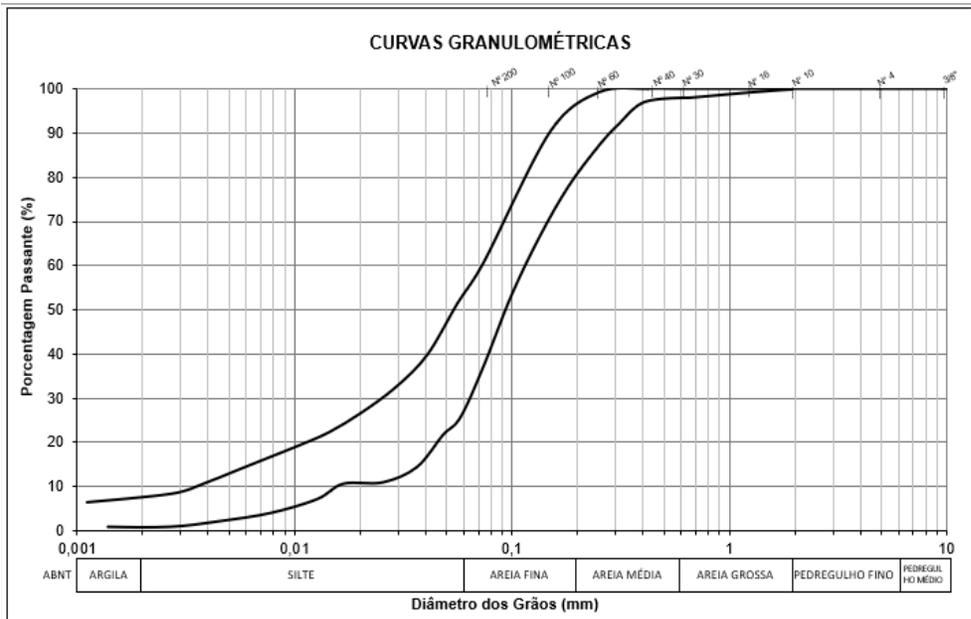
**Fig. 6** – Resistividade elétrica versus grau de compactação (a) e relações do coeficiente angular desta tendência, com a diferença da umidade de campo com a ótima (b) (Traduzida de Owusu-Nimo *et al.*, 2023).

Considerando todo cenário apresentado, este estudo pretende contribuir para ampliar o espectro de dados obtidos em campo e fomentar novas pesquisas nessa condição.

### 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

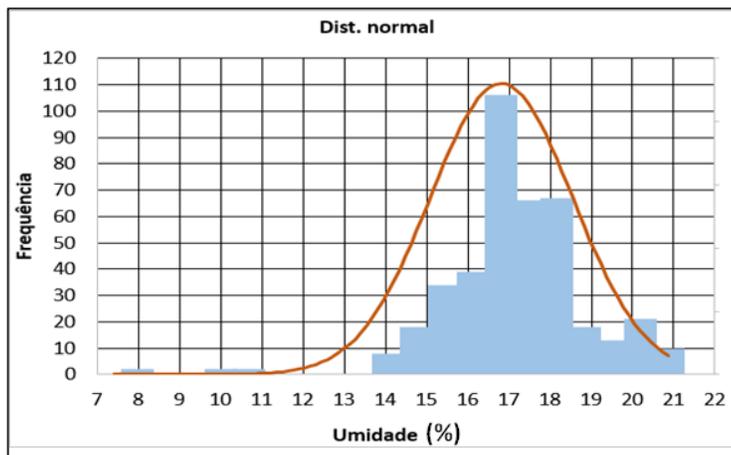
Neste capítulo serão descritos a origem e as características do rejeito de mineração utilizado no estudo e as técnicas empregadas na compactação e nas medidas da condutividade elétrica.

O rejeito gerado pela usina de beneficiamento do minério de ferro (UBMF), passa por um enquadramento da sua faixa granulométrica no sentido de atender às especificações de aceitabilidade para o empilhamento (Fig. 7). Isso é feito com um rigoroso controle no processo de filtragem e testes em aterro experimental. Nesse sentido, admite-se para destinação à pilha de rejeito materiais com características semelhantes aos materiais trabalhados no aterro experimental no que tange à resistência, trabalhabilidade, trafegabilidade, umidade ótima e comportamento geomecânico.



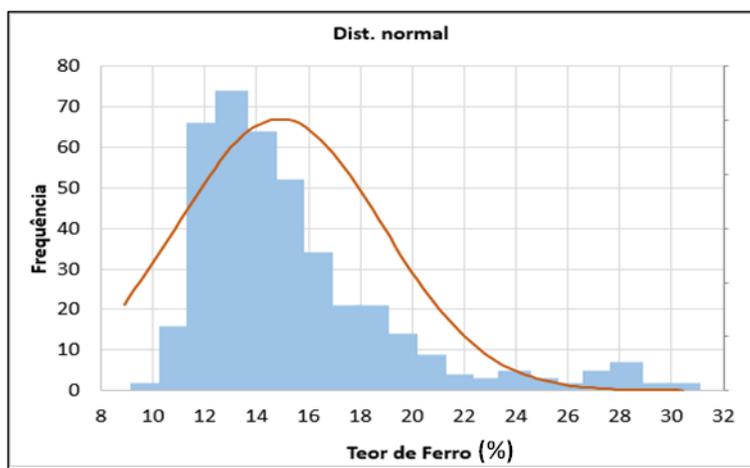
**Fig. 7** – Faixa granulométrica do rejeito especificado para empilhamento. (Costa, 2023)

O teor de umidade do rejeito, na saída da planta de filtragem da UBMF, apresenta limites característicos observados em testes experimentais. A frequência da umidade na saída da filtragem é mostrada na Figura 8, para um rejeito total com 20% de material ultrafino.



**Fig. 8** – Frequência da umidade geotécnica do rejeito na saída da UBMF (Costa, 2023).

Outro parâmetro do rejeito que é igualmente medido e controlado na UBMF, é o seu teor de ferro. Para o rejeito com 20% de ultrafinos, esses teores apresentam a estatística mostrada na Figura 9.



**Fig. 9** – Frequência do teor de ferro no rejeito (Costa, 2023).

### 3.1 – Coleta e preparo das amostras de rejeito

O material estudado é um rejeito da mineração de ferro, produzido em uma UBMF específica, que está sendo disposto sob a forma de uma Pilha de Disposição de Rejeito (PDR). Essa escolha atende ao projeto executivo da empresa mineradora.

Para início dos estudos, foram coletadas, manualmente, amostras deformadas do rejeito utilizado na pilha, conforme ilustrado na Figura 10. As amostras foram coletadas pelo método de raspagem, em cota superficial, com auxílio de pás e picaretas. Após coletadas, as amostras foram colocadas em sacos plásticos hermeticamente fechados, visando conservar o teor de umidade natural durante o transporte das amostras (Fig. 10).



**Fig. 10** – Procedimento de coleta das amostras de rejeito.

### 3.2 – Caracterização do rejeito

A preparação das amostras durante a campanha experimental ocorreu de acordo com as diretrizes especificadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6457:2016 (ABNT, 2016a).

A massa específica dos sólidos foi determinada com o auxílio da norma NBR 6458:2016 (ABNT, 2016b).

Os ensaios de limites de consistência, foram realizados de acordo com as normas NBR 6459:2016 (ABNT, 2016c) e NBR 7180:2016 (ABNT, 2016d).

Os ensaios de granulometria conjunta foram desempenhados de acordo com a norma NBR 7181:2018 (ABNT, 2018), na qual realizou-se os procedimentos de peneiramento (grosso e fino) e de sedimentação. As frações granulométricas das partículas foram definidas a partir das instruções da norma NBR 6502:2022 (ABNT, 2022).

A umidade de compactação é importante na execução da Pilha de Disposição de Rejeito, para obtenção de um empilhamento com comportamento geotécnico dentro das premissas de Projeto. Assim, a umidade alvo do rejeito para a compactação da pilha deve atender os limites estabelecidos:  $10,5\% < \text{umidade alvo para compactação} < 13,5\%$ .

### 3.3 – Compactação em laboratório

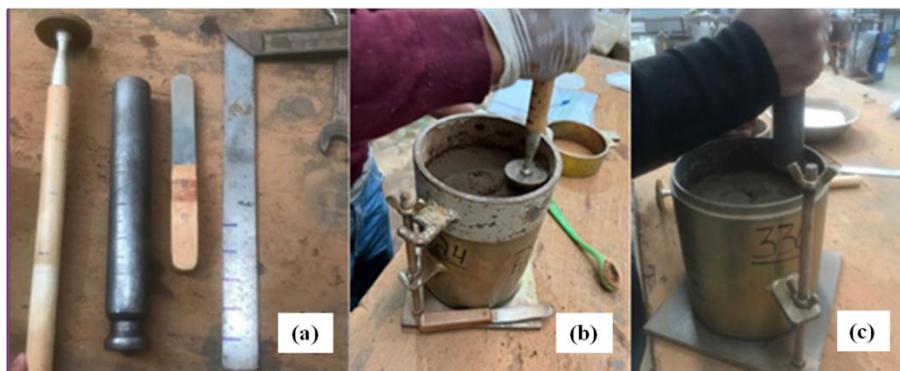
O ensaio de compactação convencional (CPN) foi realizado de acordo com a NBR 7180:2016 (ABNT, 2016d). Foram compactados cinco corpos de prova, na energia Proctor Normal (12 golpes), com cinco camadas, utilizando cilindro grande e soquete de 4.536 g. Optou-se por compactar todas as amostras na mesma energia (normal), podendo assim submeter as amostras às mesmas condições de ensaio, facilitando a comparação e análise dos métodos e dos resultados.

Para cada corpo de prova compactado foi coletada uma amostra do material para realização do ensaio de teor de umidade. O procedimento foi repetido até que se obtivesse pelo menos dois pontos abaixo e dois acima da umidade ótima na curva de compactação. Para tanto, adicionou-se 2% de umidade a cada novo ensaio realizado.

A compactação “manual” (CM) foi realizada com objetivo de observar o comportamento da condutividade elétrica mediante variações no grau de compactação do rejeito e no tipo de compactação realizado. Esperava-se que a condutividade elétrica apresentasse variações na leitura em função do equipamento e/ou do método de aplicação da energia. A partir dos resultados obtidos no ensaio de  $C_{PN}$ , foram estabelecidas algumas variações no GC do rejeito e, para cada uma foram moldados 3 corpos de prova. Foram definidos os graus de compactação (GC) seguintes: 80%, 85%, 90%, 95%, 98%, 100% e 104% (todos moldados na umidade ótima obtida no ensaio de compactação Proctor Normal).

Para a moldagem dos corpos de prova do rejeito seco ao ar, foi adicionada água suficiente para alcançar a umidade ótima obtida a partir do ensaio de compactação Proctor Normal. O material (rejeito + água) foi homogeneizado em saco plástico para obter uniformidade no teor de umidade. A quantidade de material foi sempre superior à necessária para preencher os moldes das densidades especificadas, possibilitando a coleta de material para determinação e verificação do teor de umidade em cada corpo de prova moldado.

A compactação manual foi realizada em 5 camadas de 2,3 cm, utilizando-se as ferramentas mostradas na Figura 11a. O cilindro utilizado para a moldagem dos corpos de prova, foi o cilindro grande utilizado no ensaio de compactação Proctor Normal, com dimensões de, aproximadamente,

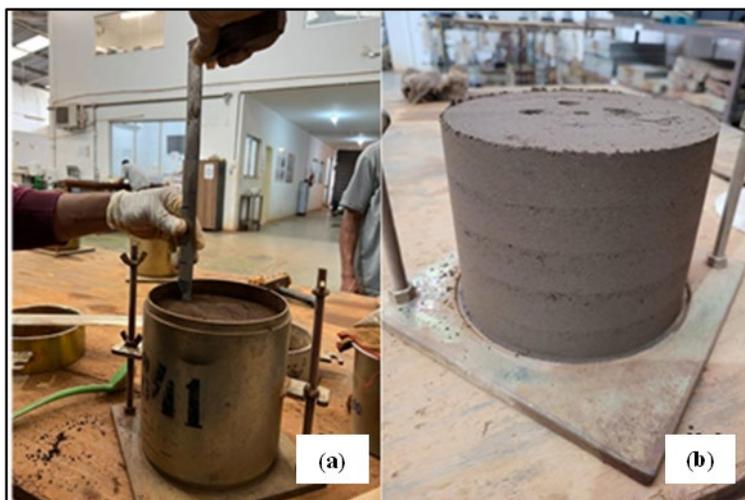


**Fig. 11** – Equipamentos utilizados na compactação manual do rejeito.

152 mm de diâmetro e 115 mm de altura (Fig. 11b). Com a densidade seca máxima ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) e umidade ótica ( $W_{\acute{o}t}$ ) do ensaio de compactação Proctor Normal e, considerando o volume do cilindro, determinou-se a massa úmida necessária para a confecção dos corpos de prova.

Para atingir a densidade ou grau de compactação desejado, utilizou-se uma haste no início do processo para o nivelamento da superfície (Fig. 11b), e um soquete de compactação para aplicar a energia necessária (Fig. 11c).

A cada camada, foi realizada a medida da altura para aferir a densidade da camada (Figura 12a). Depois de pronto, o conjunto corpo de prova e cilindro, será pesado e imediatamente realizadas as leituras de condutividade (Fig. 12b).



**Fig. 12** – Verificação de altura da camada compactada (a) e corpo de prova após extração (b).

### 3.3.1 – Medidas da condutividade elétrica em laboratório

A condutividade elétrica foi medida para cada ponto do ensaio de compactação Proctor Normal. A leitura foi obtida a partir de um protótipo construído para este fim, por meio de um sistema de montagem simples, utilizando um circuito de corrente contínua. Utilizou-se dois elétrodos de aço inoxidável com ponta biselada, para facilitar a cravação. Os elétrodos foram construídos com seção transversal de 6 mm e comprimento de 70 mm, instalados a 40 mm de distância entre eles. Essas medidas foram dimensionadas para obtenção de uma relação unitária entre o comprimento do elétrodo ( $L$ ) e a área de contato com o solo ( $A$ ). Assim sendo, a condutividade elétrica seria função apenas da Resistência Elétrica ( $R$ ), de acordo com a Equação 2. Utilizou-se como fonte de tensão contínua uma bateria de 12 V (Figura 13).

A cravação dos elétrodos foi realizada na região central do corpo de prova, e com o alinhamento paralelo à face do corpo de prova. A corrente elétrica foi lida em um amperímetro digital, imediatamente após o circuito ser ligado à bateria de 12V. Um multímetro foi inserido no circuito para verificar a tensão da bateria, resultando em maior precisão e confiabilidade nas leituras.

A resistência elétrica  $R$  foi obtida por meio da conhecida lei de Ohm e a condutividade elétrica ( $K$ ) é obtida em função da resistência através da equação seguinte:

$$K = \frac{L}{RA} \quad (2)$$



**Fig. 13** – Montagem do circuito para leitura da corrente elétrica no corpo de prova.

### 3.4 – Compactação de campo (CC)

A compactação do rejeito em campo foi realizada em camadas com espessura fofa (antes da compactação) entre 0,30 a 0,60 m, espalhadas com um trator D10. A compactação das camadas foi executada por meio de quatro (4) passadas de rolo liso vibratório de 20 toneladas.

A cada quatro camadas por praça de trabalho, isto é, a cada setor da pilha (Fig. 1), foi realizado um levantamento topográfico para medir a espessura final das camadas, bem como seus respectivos volumes.

A liberação das camadas compactadas no campo é realizada com base no critério do Grau de Compactação (GC) que foi obtido por meio do método do cilindro cortante, sendo que a amostra deverá ser coletada por furo. Com a mesma amostra é obtida a massa específica dos grãos, a ser utilizado na determinação do índice de vazios. A frequência dos ensaios de controle obedeceu ao critério de pelo menos três ensaios para cada 12.000 m<sup>2</sup> de aterro.

Os valores de referência para controle da compactação são os seguintes:

- Massa específica seca in situ: 1,80 a 1,95 g/cm<sup>3</sup>
- Massa específica dos grãos: 2,95 a 3,10 g/cm<sup>3</sup>
- Teor de umidade in situ: 10,5% a 13% ( $W_{ót} \pm 1,5\%$ )
- Índice de vazios:  $\leq 0,65$
- Grau de compactação:  $GC \geq 95\%$

#### 3.4.1 – Medidas da condutividade elétrica no campo ( $K_C$ )

As leituras da condutividade elétrica em campo ( $K_C$ ), foram realizadas do mesmo modo praticado no laboratório, utilizando-se do mesmo equipamento portátil, conforme foi previsto em Vaillant e Cardoso (2016). As leituras foram tomadas em diferentes setores da camada compactada da pilha de rejeito, conforme mostrado na Figura 14.

Em cada local, foram realizadas 3 cravações dos eletrodos em pontos equidistantes daquele onde foi avaliado o GC pelo método convencional. Assim, foi possível avaliar qualquer dispersão ou erro de leitura ou, ainda, observar mudanças nas características do rejeito ou da energia de compactação.

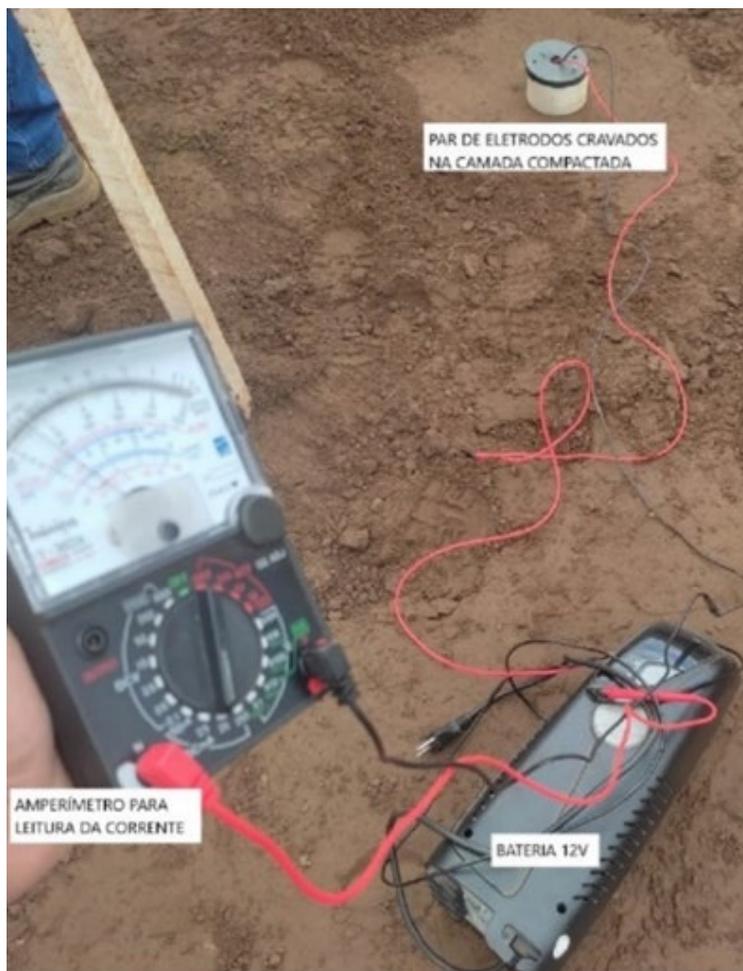


Fig. 14 – Procedimento de leitura da CE realizada no campo

#### 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, optou-se por apresentar os resultados preferencialmente na forma de gráficos para facilitar a visualização e orientar a discussão que será realizada concomitantemente.

##### 4.1 – Ensaio de caracterização

Os resultados obtidos na caracterização do rejeito estudado nesta pesquisa estão resumidos no Quadro 1.

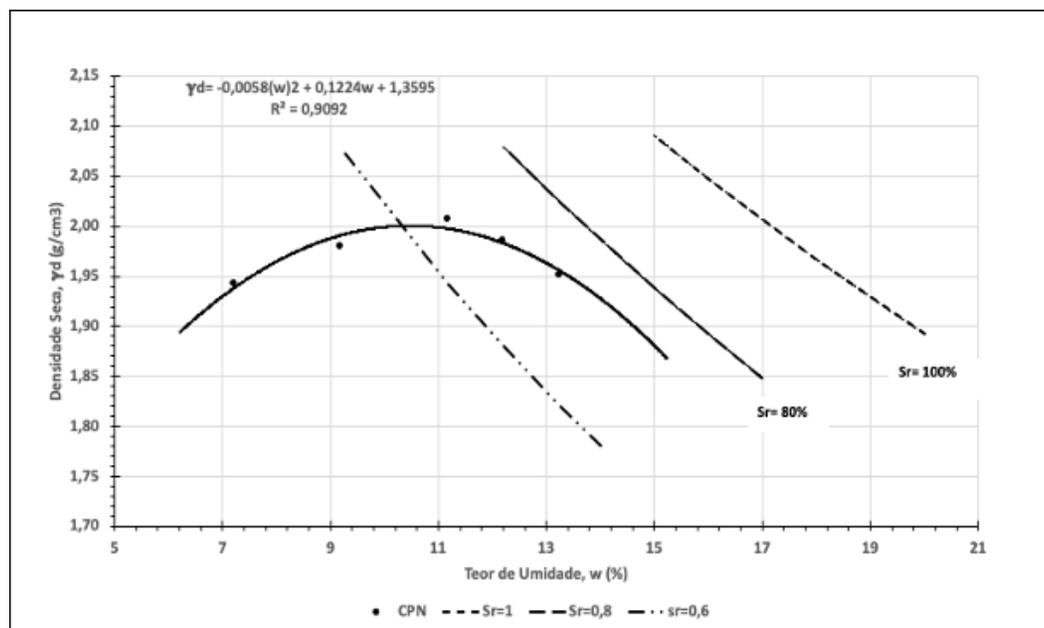
A análise granulométrica do rejeito, mostrou que ele é composto na sua maior parte por areia (59%) e silte (32%). O material se apresenta predominantemente arenoso e, portanto, o resultado para o ensaio de Limites de Atterberg, como esperado, foi “Não Plástico”, típico de materiais granulares.

**Quadro 1** – Resultados dos ensaios de caracterização do rejeito.

Designação do Solo	Areia siltosa com pouca argila e com vestígios de pedregulho de cor marrom
Areia Grossa (%)	2
Areia Média (%)	11
Areia Fina (%)	46
Silte (%)	32
Argila (%)	7
Pedregulho (%)	1
D60 (mm)	0,105
D50 (mm)	0,083
D30 (mm)	0,047
D10 (mm)	0,005
Umidade Natural (%)	12,39
Massa específica real dos grãos (g/cm <sup>3</sup> )	3,046
Umidade ótima (%)	10,77
Massa específica seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )	2,009
Índice de Plasticidade (%)	NP

#### 4.2 – Ensaio de compactação convencional (CPN)

A partir da curva de compactação obtida para a energia normal (Figura 15), definiu-se a umidade ótima ( $w_{ót}$ ) de 10,77% e a densidade seca máxima do solo ( $\gamma_{dmáx}$ ) de 2,009 g/cm<sup>3</sup> para o rejeito estudado. Embora a curva apresente uma pequena dispersão em relação a um ponto, em todos os ensaios realizados com o rejeito foram observados os mesmos parâmetros e a mesma curva característica.

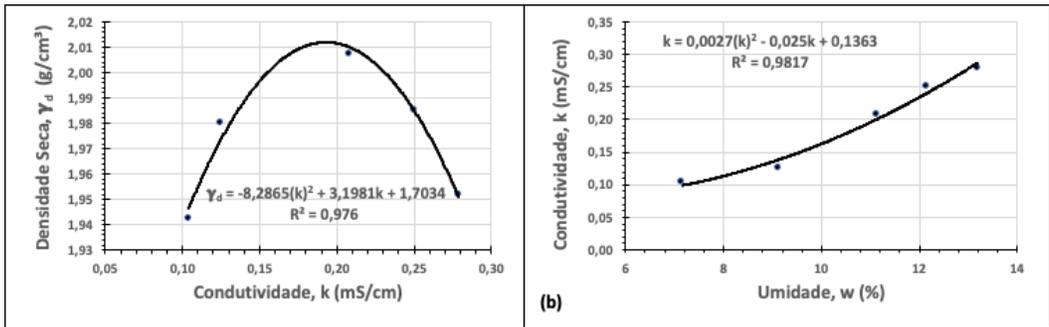


**Fig. 15** – Curvas de compactação e saturação do rejeito na energia normal (C<sub>PN</sub>)

#### 4.2.1 – Condutividade Elétrica do rejeito compactado no método convencional ( $K_P$ )

Com as leituras de condutividade elétrica obtidas a partir dos pontos do ensaio de compactação Proctor Normal ( $K_P$ ), estabeleceram-se relações com a umidade, densidade seca e um parâmetro combinado, dado pelo quociente da densidade pela umidade ( $RDU_P$ ), conforme proposto no trabalho de Vaillant e Cardoso (2016).

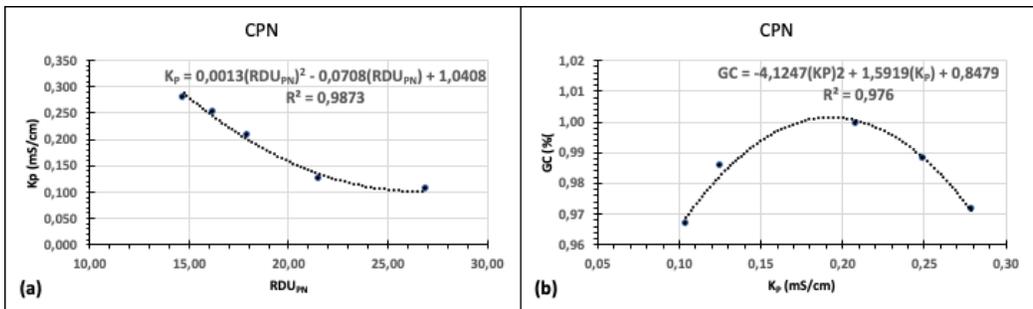
A Figura 16a, apresenta a relação da condutividade elétrica com a densidade seca obtida para cada ponto do ensaio de compactação Proctor Normal, apresentando um comportamento semelhante ao observado na literatura. Os valores da condutividade elétrica apresentam-se menores do que aqueles observados para solos argilosos e siltosos (Mostafa *et al.*, 2018), como era de se esperar. Para os valores ótimos (densidade seca máxima e teor de umidade ótimo) do rejeito, o valor de  $RDU_P = 18,65$  e  $K_P$  tem um valor próximo de  $0,19$  mS/cm que representa, portanto, uma “condutividade ótima” para o rejeito ( $K_{ót}$ ).



**Fig. 16** – Relação da condutividade elétrica com os parâmetros de compactação do rejeito, na energia normal ( $C_{PN}$ )

A relação da condutividade elétrica ( $K_P$ ) com a umidade ( $W$ ) apresenta, em boa parte dos estudos encontrados na literatura, uma relação próxima da linear. Indicando que  $K_P$  aumenta para aumentos de  $W$ . Porém, isso parece ocorrer até um valor limite estabelecido em função das características do solo. Sendo assim, adotou-se função polinomial para melhor representar esse comportamento, conforme mostra a Figura 16b.

A relação da condutividade elétrica com o parâmetro combinado  $RDU$ , doravante chamada de “curva de condutividade” ( $CK_P$ ), apresentou o comportamento mostrado na Figura 17a. Esta curva tem características semelhantes à curva que relaciona  $K_P$  com  $W$  (Fig. 16b). No ponto de inflexão, ou de estabilização, o limite mínimo da condutividade elétrica é de  $0,10$  mS/cm, como indicado nas duas curvas. A Figura 17b apresenta a relação da condutividade com a densidade relativa ou grau



**Fig. 17** – Curva de condutividade ( $CK_P$ ) do rejeito compactado no método  $C_{PN}$  e relação com o Grau de Compactação ( $GC$ ).

de compactação ( $GC_P$ ), cujo objetivo é estabelecer comparações com os outros métodos de compactação estudados.

### 4.3 – Ensaio de compactação manual (CM)

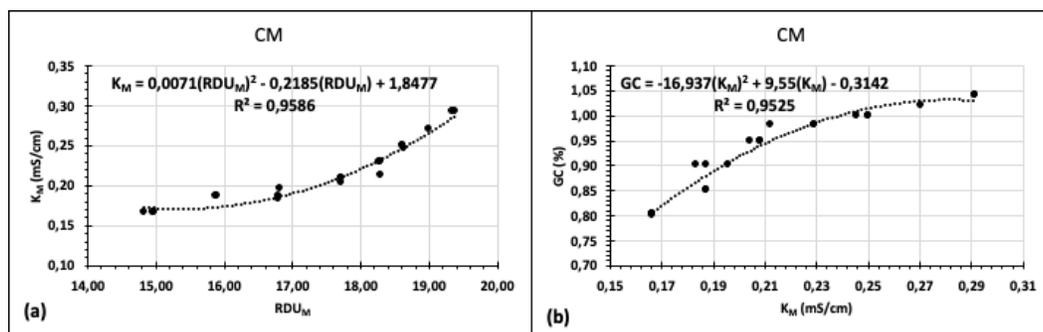
A compactação manual (CM), conforme foi descrita no capítulo anterior, foi realizada no sentido de observar o comportamento da condutividade com a mudança no modo de densificação do solo. E, conforme mencionado, esse método de compactação foi realizado com umidade constante ( $W_{ót}$ ), variando-se o grau de compactação.

#### 4.3.1 – Condutividade Elétrica do rejeito compactado no método manual ( $K_M$ )

As relações da condutividade com os parâmetros de compactação manual ( $K_M$  x  $RDU_M$ ) podem ser observadas na Figura 18a. A tendência é a mesma apresentada na compactação Proctor Normal ( $C_{PN}$ ), porém, indicando um ponto de inflexão da curva um pouco mais alto. Ou seja, as condutividades elétricas medidas na compactação manual são maiores do que na compactação Proctor Normal ( $K_M > K_P$ ). Esse fato já é um indicativo da influência do modo de aplicação da energia de compactação.

O comportamento da condutividade para o caso da compactação com variações na umidade, está de acordo com outros resultados encontrados na literatura (Kowalczyk *et al.*, 2014; Vaillant *et al.*, 2015; Vaillant e Cardoso, 2016).

A relação de  $GC_M$  x  $K_M$  (Fig. 18b) também tem comportamento similar à  $C_{PN}$ , indicando o ponto de inflexão no limite imposto no plano de ensaio ( $GC=1,04$ ). Resultados semelhantes foram encontrados em estudo anterior (Kowalczyk *et al.*, 2014) . Em todos os casos os valores de condutividade elétrica foram maiores na compactação manual. E, conseqüentemente, pode-se esperar essa mesma tendência na condutividade elétrica para as medidas realizadas em campo.



**Fig. 18** – Curva de condutividade para o rejeito compactado no método manual (a) e relação da condutividade com o Grau de Compactação (b)

### 4.4 – Condutividade Elétrica do rejeito compactado em campo ( $K_c$ )

Os dados aferidos em campo atestaram a eficácia das leituras de condutividade elétrica, que, praticamente, não apresentaram dispersão entre as medidas tomadas em três diferentes posições equidistantes do ponto de controle. O Quadro 2 apresenta todos os valores de condutividade medidos em campo, para cada ponto de estudo. Esse fato por si, já demonstra a eficácia da condutividade como ferramenta de apoio à compactação de campo. As leituras foram realizadas em diferentes setores da PDR, conforme foi apresentado na Figura 1.

**Quadro 2** – Resultados das leituras de condutividade em campo.

Pontos	Condutividade elétrica (mS/cm)					DP
	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	Média	
Baia 1	0,283	0,258	0,258	-	0,266	0,011
Baia 2	0,333	0,375	0,354	0,375	0,359	0,016
Baia 3	0,25	0,25	0,25	-	0,25	0,000
Baia 4	0,258	0,258	0,25	-	0,255	0,004
Baia 5	0,292	0,292	0,292	-	0,292	0,000

O Quadro 3 apresenta as leituras de campo para o controle da compactação. Nota-se que o controle da umidade, de fato apresenta dificuldades em atender à tolerância de projeto ( $W_{ót} \pm 1,5\%$ ). Porém, isso não foi obstáculo para a obtenção do GC desejado. Aliás, o maior GC (105%) foi obtido para uma maior umidade de campo (12,8%), superando em 2% a umidade ótima na CPN (10,8%). E, para um teor de umidade próximo da ótima, o GC foi de 102%.

Não houve relação matemática entre densidade seca com o teor de umidade de campo, ou seja, parece não existir uma curva de compactação para o método de campo.

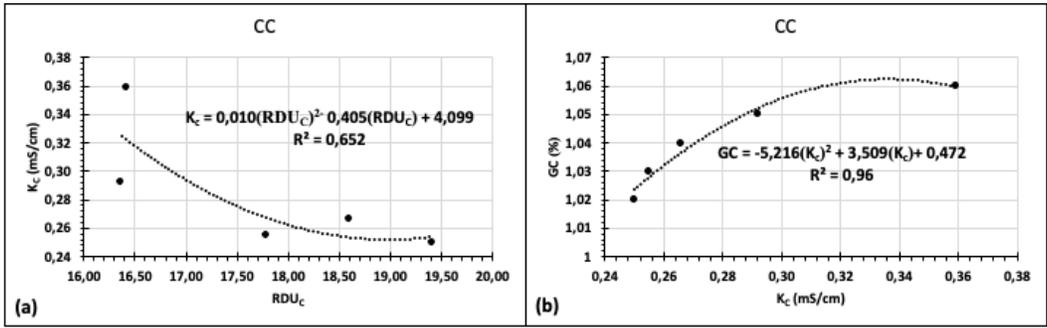
Tratando-se de um solo arenoso, em condições de campo, é fácil supor que a perda de umidade ocorre mais rapidamente. Isso é facilitado pela pouca espessura de camada e pelo revolvimento do solo para homogeneização. Por outro lado, também deve-se considerar que operação de compactação das camadas e a determinação da umidade de controle, não seguem um padrão de tempo definido. Ou seja, as camadas apresentam tempos de secagem variados, o que justifica as diferenças nas medidas de umidade. Por conseguinte, a densidade seca também varia para uma mesma energia aplicada. Assim sendo, é possível que a curva de condutividade no campo ( $CK_C$ ) tenha sido afetada por essa aleatoriedade nos parâmetros de controle (Figura 19a). Porém, a tendência é muito similar com a  $CK_P$  (Fig. 18a). Nota-se que o ponto de inflexão da curva de condutividade de campo (0,25 mS/cm) é cerca de 3 vezes maior do que aquele apresentado pela curva padrão de laboratório (0,08 mS/cm), confirmando as análises anteriores. Isso significa que a condutividade medida no campo para obter um  $GC=1$ , também deverá ser maior do que aquela leitura de laboratório.

**Quadro 3** – Dados obtidos no campo para o controle da compactação convencional.

Baias	Umidade (%)	Dens. Seca ( $g/cm^3$ )
B1	11,20	2,084
B2	12,97	2,130
B3	10,60	2,058
B4	11,60	2,063
B5	12,83	2,100

A Figura 19b apresenta a relação do grau de compactação com a condutividade elétrica de campo. Observa-se uma correlação bastante razoável e os altos valores de condutividade obtidos, conforme mencionado.

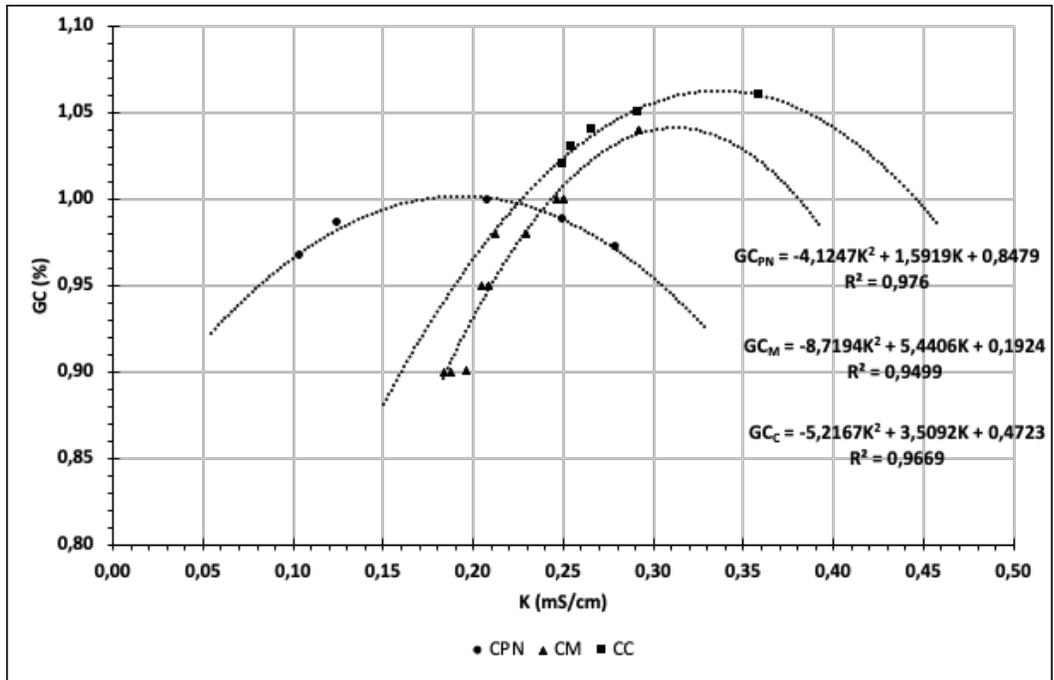
O comportamento  $GC \times K_C$  (Fig. 19b) segue o mesmo padrão observado para a CPN. Ou seja, existe um ponto de máximo a partir do qual o GC diminui com o aumento de  $K_C$ . Observa-se que os valores de  $K_C$  são sempre maiores do que  $K_P$  ( $K_C > K_P$ ). Assim, para obtenção de um  $GC=1$ , o valor de  $K_C$  é igual a 0,23mS/cm, aqui chamada de “condutividade ótima de campo” ( $k_{Cót}$ ) que é 21% maior do que  $k_{Pót}$ . O ponto de inflexão da curva sugere um “Grau de Compactação Máximo” para o rejeito, situado em torno de 1,06. Ou seja, para as condições de compactação de campo descritas no



**Fig. 19** – Curva de condutividade no campo ( $CK_C$ ) e relação com o grau de compactação

tópico anterior, haverá um  $GC_{m\acute{a}x}$  que só será ultrapassado aumentando-se a energia aplicada à camada de rejeito.

A curva  $GC \times K$  que mais se aproximada curva de campo é aquela obtida na compactação manual de laboratório (Fig. 20). Provavelmente, isso decorre do fato de que ambas foram realizadas para umidades próximas da umidade ótima. Parece ser um indicativo de que este ensaio deveria ser referência para aplicação da condutividade elétrica no campo.



**Fig. 20** – Relações do Grau de Compactação ( $GC$ ) com a condutividade elétrica ( $K$ ) nos diferentes modos de compactação

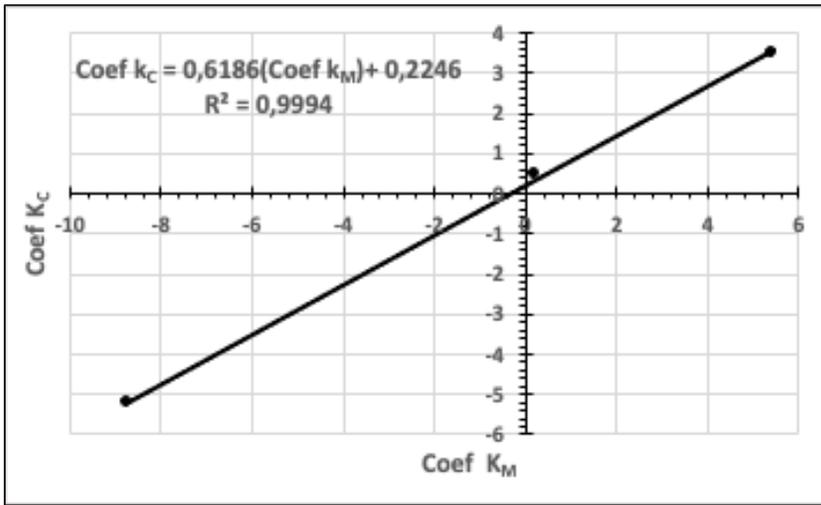
Ao estabelecer a relação matemática entre os coeficientes das curvas  $GC$  para compactação manual de laboratório e a curva de campo, encontrou-se uma relação linear com praticamente 100% de correlação, conforme indicado na Figura 21. Daí, é possível estabelecer uma relação matemática a partir dos três coeficientes da função quadrática, para simular a curva de campo, conforme indicado na equação seguinte:

$$\text{Coef}(C_C) = 0,618 \times \text{Coef}(C_M) + 0,224 \quad (3)$$

A partir dessa relação entre os coeficientes obtém-se a equação para simular o  $GC_{\text{camp}}$  :

$$GC_C = -5.18(K_C)^2 + 3,60(K_C) + 0,34 \quad (4)$$

O Quadro 4 apresenta os cálculos realizados para estimativa do GC no campo a partir da Equação 4, ao lado dos dados experimentais. Observa-se um pequeno desajuste nos valores de GC simulados para o campo. Isso se deve, naturalmente, aos erros embutidos nas curvas GC x K, para os dois casos (Fig.20). Portanto, foi necessária uma pequena correção nos valores dos coeficientes, conforme mostrado no Quadro 4.



**Fig. 21** – Relação entre os coeficientes das curvas GC x K para compactação manual e de campo

**Quadro 4** – Cálculo do Grau de Compactação a partir das relações com a condutividade elétrica.

Coef.	a= -8,72 b= 5,44 c= 0,19	a= -5,22 b= 3,51 c= 0,47	a= -5,16 b= 3,59 c= 0,34	a <sub>aj</sub> = -5,24 b <sub>aj</sub> = 3,64 c <sub>aj</sub> = 0,44
K	GC <sub>Man</sub> Exp	GC <sub>Camp</sub> Exp	GC <sub>Camp</sub> Sim	GC <sub>Camp</sub> Sim <sub>aj</sub>
0,20	0,93	0,97	0,86	0,96
0,22	0,97	0,99	0,88	0,99
0,24	1,00	1,01	0,91	1,01
0,26	1,02	1,03	0,93	1,03
0,28	1,03	1,05	0,94	1,05
0,30	1,04	1,06	0,96	1,06

## 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo buscou introduzir um método indireto para controle da compactação, que apresentasse baixo custo e leituras rápidas e de boa precisão, conforme foi mencionado ao final da seção introdutória. Nesse sentido, utilizou-se a condutividade elétrica (K) como método alternativo no controle da compactação de pilhas de disposição de rejeito da mineração de ferro. O equipamento

para medida da condutividade elétrica foi projetado e construído para uso tanto no laboratório quanto no campo. Nos ensaios de laboratório para caracterização do material e para obtenção dos seus parâmetros de compactação, utilizou-se a Energia Normal pois esta foi também a energia usada no campo.

Juntamente com os ensaios de compactação em laboratório foram tomadas medidas de condutividade elétrica, para observar o comportamento desse parâmetro em função das variações de umidade e de densidade seca. Foram realizados, ainda, ensaios de laboratório utilizando compactação manual, no sentido de observar a influência do processo de densificação do solo nas medidas de condutividade elétrica.

O mesmo equipamento utilizado no laboratório foi levado ao campo para leituras de condutividade *in loco*, na construção de um aterro real (PDR).

Os resultados indicaram haver curvas de condutividade características para cada método de compactação utilizado (Figs. 17, 18 e 19), não considerando outras influências, tais como as variações de mineralogia, temperatura, etc.

Associando a condutividade elétrica (K) com o grau de compactação (GC) do material em laboratório e no campo, observou-se curvas polinomiais distintas, como era esperado, com um grau de correlação ( $R^2$ ) mínimo de 0,95 (Fig. 20). Observou-se regressões lineares expressivas entre os coeficientes das curvas de laboratório com a curva de campo, com grande vantagem ( $R^2=1$ ) para a curva de compactação manual em laboratório (Fig. 21). Assim, foi possível estabelecer uma equação matemática para relacionar a condutividade elétrica de campo com o Grau de Compactação da PDR (Eq. 4). Desse modo, pode-se estimar o GC apenas pela medida da condutividade elétrica no campo. Nesse caso, para obter um  $GC = 1$  para o rejeito de mineração no campo, a condutividade elétrica medida *in loco* deve ser igual a  $K = 0,23$  mS/cm (Quadro 4).

Conclui-se, portanto, que o método da condutividade elétrica proposto, apresenta-se como uma alternativa relevante para o controle da compactação no campo. Devido ao baixo custo de construção, rapidez de leitura e boa precisão nos resultados, pode-se aumentar substancialmente o número de pontos de controle. Por outro lado, devido a grande sensibilidade da condutividade elétrica às pequenas variações nos parâmetros de compactação do material, seria possível detectar essas mudanças e evitar inconformidades em tempo útil.

## 6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Cefet-MG e ao Laboratório GEOLABOR da Chammas Engenharia, onde o estudo foi planejado e implementado. Agradecimento especial ao Engenheiro Tadeu Henrique Castro, Sócio Diretor da Chammas Engenharia, que apoiou incondicionalmente e disponibilizou todos os recursos necessários para a realização da pesquisa.

## 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (2016a). NBR 6457 – *Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro, Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 14 p.

ABNT (2016b). NBR 6458 – *Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro, Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 14 p.

ABNT (2016c). NBR 6459 – *Solo – determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro, Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 9 p.

ABNT (2016d). NBR 7180 – *Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 7 p.

- ABNT (2017). NBR 13028 – *Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos*. Rio de Janeiro, Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 16 p.
- ABNT (2018). NBR 7181 – *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro, Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 16 p.
- ABNT (2022). NBR 6502 – *Solos e Rochas – Terminologia*. Rio de Janeiro, Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 40 p.
- Alibrahim, B.; Uygur, E. (2021). *Influence of compaction method and effort on electrical resistivity and volume change of cohesive soils*. KSCE Journal of Civil Engineering, v. 25, pp. 2381-2393. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-0419-9>
- Al Rashid, Q. A.; Abuel Naga, H. M.; Leong, E. C.; Lu, Y.; Al Abadi, H. (2018). *Experimental-artificial intelligence approach for characterizing electrical resistivity of partially saturated clay liners*. Applied Clay Science, v. 156, pp. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.01.023>
- ASTM (2007). ASTM D 422-63 – *Standard test method for particle-size analysis of soils* -. Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, PA/USA: ASTM International.
- ASTM (2011). ASTM D 7698 – *Standard method for in-place estimation of density and water content of soil and aggregate by correlation with complex impedance method* -. Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, PA/USA: ASTM International.
- Bin-Razali, M. N. F.; Osman, S.B. A. (2011). *Non-quantitative correlation of soil resistivity with some soil parameters*. In: National Postgraduate Conference Proceedings. Perak, Malaysia. pp. 1-4. <https://doi.org/10-1109/NatPC.2011.6136365>
- Costa, L. M. B. (2023). *Estudo da condutividade elétrica como parâmetro de controle da compactação de uma pilha de rejeito de mineração*. Curso de Engenharia de Produção Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (Trabalho de Conclusão de Curso). Belo Horizonte: CEFET-MG. 62 p.
- Craig, R. F.; Knappett, J. A. (2018). *Mecânica dos Solos*. 8. ed. Rio de Janeiro, Brasil: LTC.
- Consentino, P. J.; Shaban, A. M. (2018). *Predicting bearing ratio of granular soil using Dynamic Cone Penetrometer and modified PENCEL pressuremeter tests*. Innovation in Geotechnical Engineering Conference - ASCE-GSP. Honoring Jean-Louis Briaud volume.
- Inim, I. J.; Tijani, M. N.; Affiah, U. E. (2016) *Experimental assessment of electrical properties of lateritic soils as an alternative non-destructive method for compaction monitoring*. International Journal of Geotechnical Engineering. v. 12, n. 3, pp.1-6. <https://doi.org/10.1080/19386362.1270792>
- Islam, T.; Chik, Z.; Mustafa, M. M.; Sanusi, H. (2012). *Modeling of electrical resistivity and maximum dry density in soil compaction measurement*. Environmental Earth Science. v. 67, n. 5. pp. 1299-1305. <https://doi.org/10.1007/s126665-012-1573-7>
- Kowalczyk, S.; Maslakowski, M.; Tucholka, P. (2014). *Determination of the correlation between the electrical resistivity of non-cohesive soils and the degree of compaction*. Journal of Applied Geophysics, v. 110, pp. 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.08.016>.
- Meehan, C. L.; Hertz, J. S. (2011). *Using electrical density gauges for field compaction control*. Repository 220. Newark: Delaware Center for Transportation, University of Delaware.

- Mostafa, M.; Anwar, M. B.; Radwan, A. (2017). *Application of electrical resistivity measurement as quality control test for calcareous soil*. Housing and Building National Research Center, v. 14, n. 3, pp. 379-384. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2017.07.001>
- Nery, K. D. (2013). *Caracterização geotécnica e avaliação da compactação de um resíduo da produção de alumina (lama vermelha) desaguado por filtro prensa*. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais (Dissertação de Mestrado). Belo Horizonte: UFMG. 144 p.
- Owuzu-Nimo, F.; Peprah-Manu, D.; Ayeh, F. J.; Charkley, F.; Ampadu, S. I. K. (2023). *Compaction verification of lateritic soil using electrical resistivity: a laboratory study*. Geotechnical and Geological Engineering, v. 42, n.2, pp. 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02598-z>
- Silva, L. J. C. (2018). *Diretrizes de projeto de empilhamento de rejeito de minério de ferro filtrado – caso estudo: Mineira Minérios Itaúna*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica da Universidade Federal de Ouro Preto (Dissertação de Mestrado Profissional). Ouro Preto: UFOP. 265 p.
- Sobreira, D. S. V.; Lucena, A. E. F. L.; Lucena, L. C. F. L.; Sousa, T. M. (2018). *Estudo comparativo entre os métodos de compactação de solos por impacto e amassamento*. Geociências, v. 37, n. 3, pp.683-693. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v37i3.12860>
- Vaillant, J. M. M. (2014). *Estudo das relações entre os parâmetros de compactação e a condutividade elétrica*. Trabalho não publicado.
- Vaillant, J. M. M.; Santos, O. J. (2015). *Determination of soil physical indices in the field using the electrical conductivity*. In: From Fundamentals to Applications in Geotechnics - Proceedings of the 15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Sfriso, A. O.; Manzanal, D. (Eds.). Clifton, VA: IOS Press E-books, p. 597-604.
- Vaillant, J. M. M.; Cardoso, R. (2016). *Comportamento da condutividade elétrica mediante variações nos parâmetros de compactação dos solos*. In: 15º Congresso Nacional de Geotecnia e 8º Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia: A Geotecnia e os desafios societais. Porto, Portugal: SPG. s/p.
- Vaillant, J. M. M.; Silva, L. A.; Tecianelli, G.R. (2015). *Avaliação do grau de compactação do solo com uso da condutividade elétrica*. Geotecnia, v. 134, pp. 147-160. <https://doi.org/1024849/j.geot.2015.134.08>
- Vaillant, J. M. M.; Barsante, C. A.; Morandini, T. L. C. (2018). *O uso da condutividade elétrica para estimativa do índice de suporte Califórnia (CBR) dos solos. Reunião de Pavimentação Urbana – São Paulo, Brasil*. In: Anais da 21ª Reunião de Pavimentação Urbana – 21ª RPU. Rio de Janeiro, Brasil: Associação Brasileira de Pavimentação - ABPv. ISSN: 1809-256x RPU.