

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**ANÁLISE DO SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO PARA MONITORAMENTO DE  
UMIDADE EM REJEITOS FILTRADOS  
TRABALHO DE FORMATURA - 2022/2**

Ariane de Sá Landim

Orientador: Prof. Dr. Fernando Antônio Medeiros Marinho

**SÃO PAULO  
2022**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao meu orientador, o Prof. Dr. Fernando Marinho, pela oportunidade de participar deste projeto e por todo ensinamento, paciência e apoio ao longo deste ano.

Agradeço também a empresa Vale S.A. pelo fornecimento dos materiais utilizados, sendo a principal responsável por tornar este projeto possível.

Agradeço ao Fábio, a Zuleide e ao Yuri, pela ajuda essencial nos experimentos no laboratório e com a análise de dados, sem a qual eu não conseguiria terminar este projeto. Agradeço também pela ótima companhia que tornou este trabalho mais leve.

Agradeço aos meus amigos da turma 60 e agregados que, apesar de não terem participado diretamente deste trabalho, sempre foram a minha maior força para concluir este curso. Tenho enorme gratidão por todas as pessoas que conheci, principalmente aqueles que estiveram mais presentes no meu dia a dia. Deixo aqui o meu agradecimento a Levi, Portera, Beiço, Boi, Célebro, Raíssa, Prepara, Pitú, Michelle, Marquinhos, Bagulho, Pipico, Duba, Gouveia, Sarjeta, Marmita, Chockany, Gorfo, Syd, Jahdeu, Jonas, Manu, Nesquik, Iludida, TeyTey, Monange, Beto, Berne, Cana, Jura e Frida. Obrigada por terem sido ótimos amigos e por terem feito a minha experiência na graduação ter sido a melhor experiência da minha vida.

Queria deixar um agradecimento especial para a Pakita, que foi a minha primeira amiga da sala e a minha grande companheira ao longo de toda a graduação. Para a Meska, que desde que nos conhecemos nunca nos desgrudamos e também sempre esteve comigo ao longo de todos esses anos. Para o Singa, que foi o meu maior companheiro de rolês. Para o Marquinhos, que era a melhor companhia para qualquer tipo de papo bobo. Para o Muri, por ser só muito parceiro e bobo. Para a Nicóli, que se aproximou mais de mim nessa reta final do curso e já se tornou uma das pessoas que mais me sinto próxima. E para o Du, por toda ajuda ao longo desses anos e por todos os bons momentos juntos. Eu amo muito vocês.

Agradeço, por fim, aos meus pais, as duas pessoas mais importantes da minha vida, que sempre me apoiaram, tanto financeiramente quanto emocionalmente, em todas as minhas decisões. Vocês são os verdadeiros responsáveis por todas as minhas conquistas e são o maior motivo de todo o meu esforço. Eu dedico este trabalho a vocês.

## RESUMO

Com a ampliação do uso de depósitos de rejeitos filtrados compactados amplia-se a necessidade de determinação do comportamento da água nestes maciços. O sensor de umidade é uma ferramenta essencial utilizada no campo para a definição da característica de retenção e fluxo de água pelo solo. Para medições em campo, busca-se monitorar, de forma passiva, a resposta do solo a um determinado evento, como por exemplo em casos de chuva. Por conta disso, o tempo de resposta do sistema de medição tem um papel fundamental na escolha do equipamento adequado.

Muitos sensores utilizados em campo possuem uma curva de calibração própria que é feita com a utilização de solos típicos (areia de composição quartzo-feldspática). Entretanto, no caso de rejeitos de mineração de ferro, além da grande diferença da composição mineral em relação a solos típicos, há a presença de partículas muito finas que podem alterar a constante dielétrica do material, que é utilizada como leitura indireta pelo sensor para a definição do teor de umidade. Por conta disso, é necessário estabelecer uma nova curva de calibração específica para este tipo de material.

O sensor TEROS 12 possui boa robustez, tamanho compacto, boa precisão, baixa manutenção e custo acessível e, por isso, foi o equipamento escolhido para esta pesquisa. Tendo como referência a curva de compactação do ensaio de Proctor foram realizados sete experimentos com a utilização do sensor TEROS 12, sendo que um deles foi feito com amostra de areia fina para comparação com os resultados do rejeito de minério de ferro. Os dados de umidade volumétrica ( $\theta$ ) obtidos pelo sensor foram comparados com os dados obtidos por cálculo direto. Foi observada uma boa correlação dos dados do sensor com a amostra de areia fina, comprovando a calibração original utilizada pelo sensor. No entanto, para os rejeitos de minério de ferro foi necessário estabelecer novas equações de calibração. Os procedimentos utilizados para a determinação das equações de calibração estão apresentados neste trabalho.

## ABSTRACT

With the expansion of the use of compacted landfills for filtered tailings the need for determining the behavior of water in these massifs is amplified. Moisture sensor is an essential tool used to define water retention characteristics and flow through the soil. For field measurements, the aim is to passively monitor the response of the soil to a given event, such as rainfall. Because of this, the response time of the measurement system plays a key role in the choice of appropriate equipment.

Many sensors used in the field have their own calibration curve that is made using typical soils (quartz-feldspathic sand). However, in the case of iron mining tailings, besides the big difference in mineral composition in relation to typical soils, there is the presence of very fine particles that can change the dielectric constant of the material, which is used as an indirect reading by the sensor to define the moisture content. Because of this, it is necessary to establish a new calibration curve specifically for this type of material.

The TEROS 12 sensor has good robustness, compact size, good precision, low maintenance, and affordable cost, and therefore was the chosen equipment for this research. Using the Proctor test compaction curve as a reference, seven moist content experiments were performed using the TEROS 12 sensor, one of which was performed with a fine sand sample for comparison with the iron ore tailings results. The volumetric moisture data ( $\theta$ ) obtained by the sensor were compared with the data obtained by direct sampling method. A good correlation of the sensor data with the fine sand sample was observed, proving the original calibration used by the sensor. However, for the iron ore tailings it was necessary to establish new calibration equations. The procedures used to determine the calibration equations are presented in this paper.

<b>RESUMO</b>	3
<b>2. INTRODUÇÃO</b>	6
<b>3. OBJETIVOS</b>	6
<b>4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	7
4.1. Sistema de Empilhamento de Rejeitos Filtrados	7
4.2. Compactação e Umidade Ótima do Solo	7
4.3. Medição do Teor de Umidade	9
4.4. Trabalhos Desenvolvidos com TEROS 12	10
4.5. Constante Dielétrica do Solo	11
<b>5. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	11
5.1. Sensor	11
5.2. Caracterização do Rejeito	12
5.3. Ensaio de Compactação Normal Proctor	14
5.4. Instalação do Sensor	15
5.5. Testagem do Sensor TEROS 12	15
5.5.1. Experimento 1	15
5.5.2. Experimentos 2 e 3	16
5.5.3. Experimento 4	19
5.5.4. Experimentos 5, 6 e 7	20
5.6. Coleta de Dados e Calibração	21
<b>6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	22
6.1. Teor volumétrico no ar e na água	22
6.2. Curva de Compactação Normal Proctor	23
6.3. Determinação das Equações de Calibração	24
<b>7. CONCLUSÕES</b>	27
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	29

## **2. INTRODUÇÃO**

Os empilhamentos de rejeitos filtrados vêm sendo utilizados como uma substituição ao convencional sistema de barragens de rejeitos, em resposta aos diversos rompimentos ocorridos no Brasil e no mundo. Apesar de ser uma alternativa mais ecológica, o sistema de empilhamentos de rejeitos filtrados ainda carece de estudos mais detalhados acerca do comportamento da água quando em contato com o material depositado. A característica porosa destes sistemas e a presença variável e/ou constante da água gera problemas que podem colocar em risco a segurança dos maciços. Desta forma, a definição das características de retenção de água e seu processo de fluxo associado ou não com processos climáticos é de fundamental importância para a área de mineração, e de aplicação direta em muitos casos.

Em vista da importância deste tema, foi proposto pela VALE em 2021 o projeto: “Avaliação da retenção de água em rejeitos filtrados por meio de colunas instrumentadas” com o objetivo de desenvolver um sistema de colunas instrumentadas, de fácil manuseio, para determinação da capacidade de retenção de líquidos em meios porosos, especificamente rejeitos filtrados, e obtenção da função de permeabilidade. O uso de colunas de solo equilibradas ou não é uma técnica simples e eficiente de não só avaliar a capacidade de retenção de água, mas também de entender o fenômeno de sua movimentação nestes materiais.

O presente projeto objetiva estudar o sistema de instrumentação a ser utilizado no monitoramento das colunas instrumentadas, desenvolvendo processos de calibração e/ou verificação do sensor, processo de instalação e análise de dados.

## **3. OBJETIVOS**

O objetivo deste projeto é estudar o sensor de medição de teor de umidade volumétrico TEROS 12, desenvolvido e comercializado pela empresa METER Group, e que será utilizado no monitoramento de colunas instrumentadas. Sendo assim, os objetivos deste trabalho são:

- Verificar se a calibração original do equipamento é válida para o rejeito de minério de ferro;
- Determinar os efeitos da densidade na equação de calibração;
- Definir a equação a ser utilizada no projeto: “Avaliação da retenção de água em rejeitos filtrados por meio de colunas instrumentadas” que está sendo desenvolvido pelo professor Dr. Fernando A. M. Marinho com o apoio da VALE S.A;
- Definir o procedimento de instalação dos sensores.

## 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1. Sistema de Empilhamento de Rejeitos Filtrados

Também conhecido como depósito a seco (*dry stacking*), o sistema de empilhamento de rejeitos filtrados consiste na filtragem, transporte, deposição e compactação dos rejeitos gerados após o processo de beneficiamento de minério. O processo de filtragem proporciona a separação de sólidos e líquidos, fazendo com que o rejeito adquira um grau de saturação de 60 a 80%. Após a filtragem, os rejeitos são transportados por meio de caminhões ou correias transportadoras até o local onde serão depositados e então compactados para a formação de pilhas (Davies, 2011).

O sistema de empilhamento de rejeitos filtrados possui um menor impacto ambiental do que os métodos de barragem convencionais, uma vez que a água filtrada pode ser reutilizada e o espaço ocupado para a disposição dos rejeitos é significativamente menor, tornando também mais fácil o processo de recuperação da área após a desativação da pilha. Além disso, justamente por ocupar um menor espaço, o seu monitoramento se torna mais fácil, reduzindo seu custo operacional e, por apresentar menor quantidade de água, também possui menor risco de liquefação (Silva, 2021).

Entretanto, a estabilidade de empilhamento de rejeitos filtrados ainda carece de estudos detalhados do ponto de vista do comportamento da água em contato com o maciço. O comportamento do solo na condição não saturada, como é o caso dos empilhamentos de rejeitos filtrados, exige a compreensão da distribuição, retenção e liberação da água nas diversas situações às quais o solo pode estar sujeito. Essas situações podem ser de ordem mecânica ou ambiental. A água pode mover-se para dentro ou para fora do solo por alteração no estado de tensão externo e/ou por questões ambientais, tais como infiltração e/ou evaporação. (Gitirana Junior et al. 2015)

A forma como a água se comporta no solo pode ser representada pela curva de retenção de água, sendo essa a propriedade mais importante para avaliar a estabilidade do solo não saturado. A curva de retenção de água consiste na relação entre a quantidade de água presente nos poros e a energia necessária para remover esta água (Gitirana Junior et al. 2015). Ou seja, é dependente do monitoramento do teor de água, medida que pode ser obtida com a utilização do sensor TEROS 12, que será estudado neste projeto.

### 4.2. Compactação e Umidade Ótima do Solo

Segundo Pinto (2006), a compactação do solo possui dois objetivos: aumentar o contato entre os grãos e tornar a amostra mais homogênea. Com o aumento da densidade, diversas propriedades do solo são melhoradas, como, por exemplo, o aumento da sua rigidez e resistência e diminuição da sua permeabilidade.

Ainda segundo Pinto (2006), o início da técnica de compactação iniciou-se com o engenheiro americano Proctor que, em 1933, publicou observações sobre a compactação de aterros, mostrando que, ao aplicar-se uma certa energia de compactação a massa específica resultante é função da umidade em que o solo estiver. Ao se compactar com umidade baixa, o atrito entre os grãos é muito alto, não sendo possível de se obter uma redução significativa do índice de vazios. Porém, com umidades mais elevadas, a água provoca um certo efeito de lubrificação entre os grãos, que deslizam entre si, produzindo um arranjo mais compacto e, consequentemente, maior densidade. A partir de um certo teor de umidade a compactação não consegue mais expulsar o ar dos vazios pois o grau de saturação já é elevado e o ar está ocluso (envolto por água). Sendo assim, há, portanto, para a energia aplicada, um certo teor de umidade, denominado umidade ótima, que conduz a uma densidade seca máxima.

Dos trabalhos de Proctor surgiu o Ensaio de Compactação, conhecido como Ensaio de Proctor. Este ensaio foi padronizado no Brasil pela ABNT (NBR 7182/86) e é utilizado para obter-se a curva de compactação, que consiste na representação da densidade seca em função da umidade (Figura 1). Geralmente, conecta-se no gráfico os pontos obtidos no ensaio, formando uma curva parabólica. O topo da curva define uma densidade seca máxima no eixo y e uma umidade ótima no eixo x (Pinto, 2006).

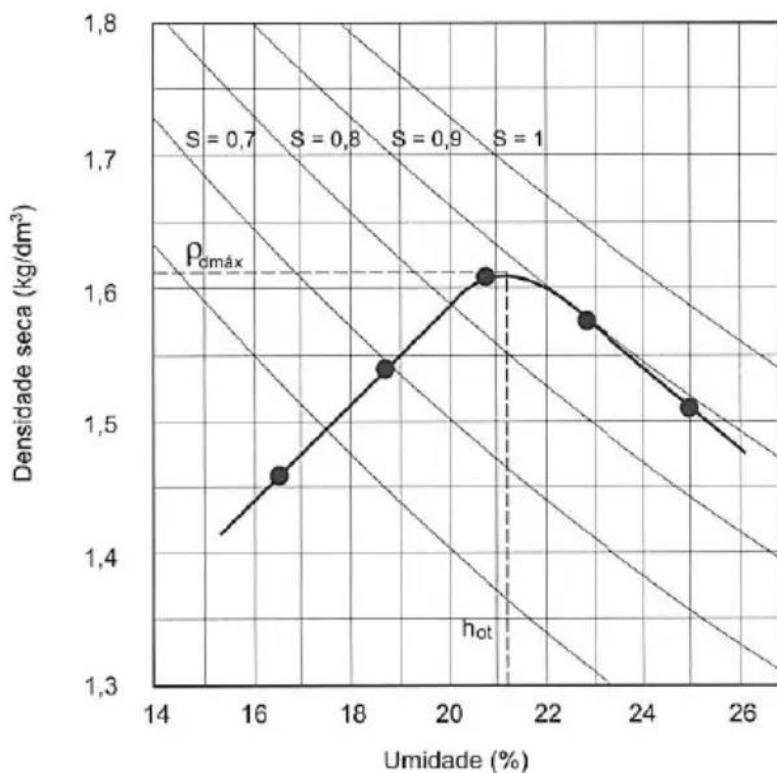


Figura 1: Exemplo de Curva de Compactação obtida em Ensaio de Proctor (Fonte: Pinto, 2006).

No gráfico também é possível traçar a curva de saturação, que corresponde ao lugar geométrico dos valores de umidade e densidade seca, com o solo saturado. Os pontos ótimos das curvas de saturação encontram-se em torno de 80% a 90% de saturação.

De maneira geral, solos argilosos apresentam densidades secas baixas (de 1,5 a 1,4 kg/dm<sup>3</sup>) e umidades ótimas elevadas (25 a 30%). As maiores densidades secas máximas (cerca de 2 a 2,1 kg/dm<sup>3</sup>) e umidades ótimas baixas (9 a 10%) são representadas por areias com pedregulhos (Pinto, 2006). Ou seja, cada tipo de solo pode apresentar valores bem distintos de densidades secas e umidades ótimas, sendo dependente de suas características físicas e químicas específicas, como tamanho e composição dos grãos. Esta variação está exemplificada na Figura 2. Sendo assim, o estudo de compactação é uma importante ferramenta para se obter a característica exata de qualquer tipo de solo estudado.

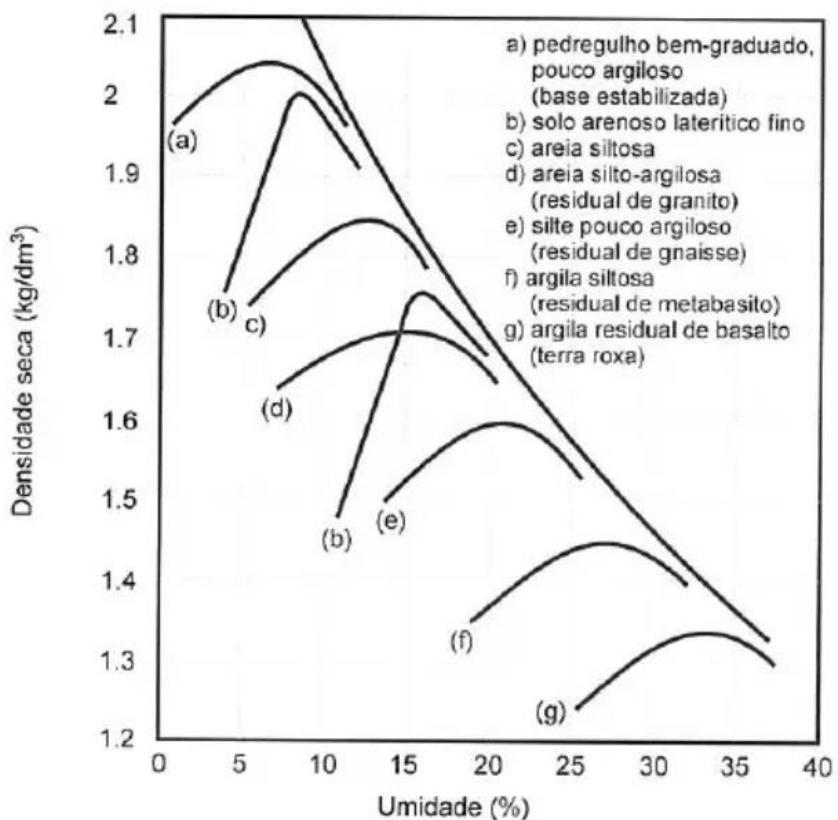


Figura 2: Curvas de Compactação de diversos solos brasileiros (Fonte: Pinto, 2006).

#### 4.3. Medição do Teor de Umidade

O método de amostragem direta do solo para o cálculo do teor de umidade costuma ser demorado e frequentemente destrutivo para a área de estudo de campo. No entanto, este método geralmente fornece uma medida de teor de umidade precisa e confiável. É o método padrão em relação ao qual todos os outros são comparados e calibrados (Evett et al. 2008).

De acordo com Evett et al. (2008), para a medição do teor de umidade em um tempo mais curto e com menor impacto no solo, diversos equipamentos de medição indireta foram desenvolvidos. Estes equipamentos usam técnicas nucleares ou técnicas eletromagnéticas. Entretanto, o uso de técnicas nucleares, mesmo se seguras, estão sendo desencorajadas em muitos países. Já as técnicas eletromagnéticas são amplamente utilizadas, sendo que os

principais equipamentos são: sensores resistivos, sensores capacitivos, reflectometria no domínio do tempo (TDR), tensiômetros e sensores de condutividade térmica. Ainda segundo Evett et al. (2008), o grande problema do método eletromagnético é que, por se tratar de leitura indireta, em muitos casos é gerado uma estimativa irrealisticamente grande da variabilidade do conteúdo de teor de umidade ou é necessário um número excessivo de tubos de acesso no solo a fim de se obter um percentual médio do teor de umidade com precisão aceitável.

Por conta disso, Evett et al. (2008) afirma que para garantir que um método indireto produza valores razoáveis de teor de água é obrigatório verificar se os valores máximo e mínimo relatados pelos sensores estão dentro dos valores de campo nas condições mais úmidas e mais secas. Além disso, para garantir que os sensores produzam resultados de acurácia e precisão conhecidas, alguma forma de calibração é necessária.

Segundo Irmak e Irmak (2005), foi demonstrado que os sensores de umidade do solo variam em seu desempenho devido a fatores que incluem o tipo de solo, propriedades químicas e físicas do solo, temperatura e faixa de umidade do solo em que eles operam.

O TEROS 12 é um sensor capacitivo novo produzido pela empresa METER Group. Os sensores capacitivos medem o tempo de carga de um capacitor, que é proporcional ao material dielétrico do solo. A resistência do solo também é usada para medir a umidade, já que à medida que a umidade aumenta, a resistência diminui. Os sensores capacitivos são menos propensos à corrosão do que os sensores resistivos e são mais precisos. Por esta razão, sensores de umidade do solo são geralmente capacitivos em vez de resistivos (ICT international, 2014).

#### **4.4. Trabalhos Desenvolvidos com TEROS 12**

Por se tratar de um instrumento recente ainda existem poucas pesquisas desenvolvidas especificamente com o sensor TEROS 12. Mokarighahroodi e Shukla (2019) avaliaram o desempenho do sensor em relação à estimativa de teor de água no solo. O sensor foi instalado em um solo argiloso a 1 m e 2 m do tronco de árvores e a 10, 20 e 40 cm de profundidade da superfície do solo. As amostras de solo foram coletadas dezessete vezes entre três irrigações sucessivas, onde o conteúdo de água do solo foi determinado. As medidas de teor de água captadas pelo sensor TEROS 12 concordaram bem com os teores medidos pelo método de amostragem direta a 10 e 20 cm de profundidade, porém sobreestimou o teor na profundidade de 40 cm em ambos os locais. O estudo concluiu que o sensor do TEROS 12 pode monitorar solos argilosos com razoável precisão.

#### 4.5. Constante Dielétrica do Solo

Sensores capacitivos, tais como o TEROS 12, medem o tempo de carga do material dielétrico do solo ( $\epsilon$ ), que é uma média ponderada das constantes dielétricas das partículas do solo ( $\epsilon_{\text{part.}} \approx 3-5$ ), da água ( $\epsilon_{\text{água}} = 80$ ) e do ar ( $\epsilon_{\text{ar}} = 1$ ), com a equação:  $\epsilon = (c t / L)^2$ , em que  $c$  ( $\text{m s}^{-1}$ ) é a velocidade da luz no vácuo e  $L$  (m), o comprimento da sonda metálica (Davis & Chudobiak, 1975; Topp et al., 1980). Com a variação da quantidade de água no solo ( $\theta$ ) ocorre variação da constante dielétrica  $\epsilon$ , portanto, por meio de uma calibração experimental entre  $\epsilon$  e  $\theta$ , é possível utilizar este método na determinação da umidade de solos. Sendo assim, a leitura do teor de umidade volumétrica é feita de forma indireta e dependente do valor da constante dielétrica de cada solo. Por conta disso, são necessárias calibrações para diferentes tipos de solo, a fim de que se obtenha o valor correto do teor de umidade.

Villwock (2004) afirma que a calibração é exigida especialmente quando se trabalha com Latossolos, devido a algumas particularidades, como, por exemplo, os altos teores de ferro e argila e a expansibilidade do solo. Em solos com maior quantidade de areia, a água está mais livre e, nos mais argilosos, mais adsorvida, fazendo com que haja pequena diminuição da constante dielétrica (Dasberg & Hopmans, 1992).

Roth et al. (1992) mostraram que são necessárias calibrações diferentes para solos com minerais ferrosos ou orgânicos. Segundo Robinson et al. (1994), a presença de óxido de Fe e de minerais de óxido de Ti influencia na determinação da constante dielétrica  $\epsilon$ , consequentemente, na leitura do teor de água pelo sensor. Tendo em vista o exposto acima a calibração do sensor para uso em rejeitos de minério de ferro se faz necessária.

### 5. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 5.1. Sensor

Para este projeto, será utilizado 1 sensor de umidade TEROS 12. O sensor TEROS 12 (Figura 3) usa um campo eletromagnético para medir a permissividade dielétrica do meio ambiente, fornecendo uma onda oscilante de 70-MHz para as agulhas do sensor, que carregam de acordo com o material dielétrico. O tempo de carga é proporcional ao material dielétrico e ao teor volumétrico de água do solo. O sensor possui um tamanho compacto com apenas 9,4 cm de comprimento por 2,4 cm de largura e 7,4 cm de altura. Ele também pode ser utilizado para medição da temperatura e condutividade elétrica do solo (manual TEROS 11/12, 2020).

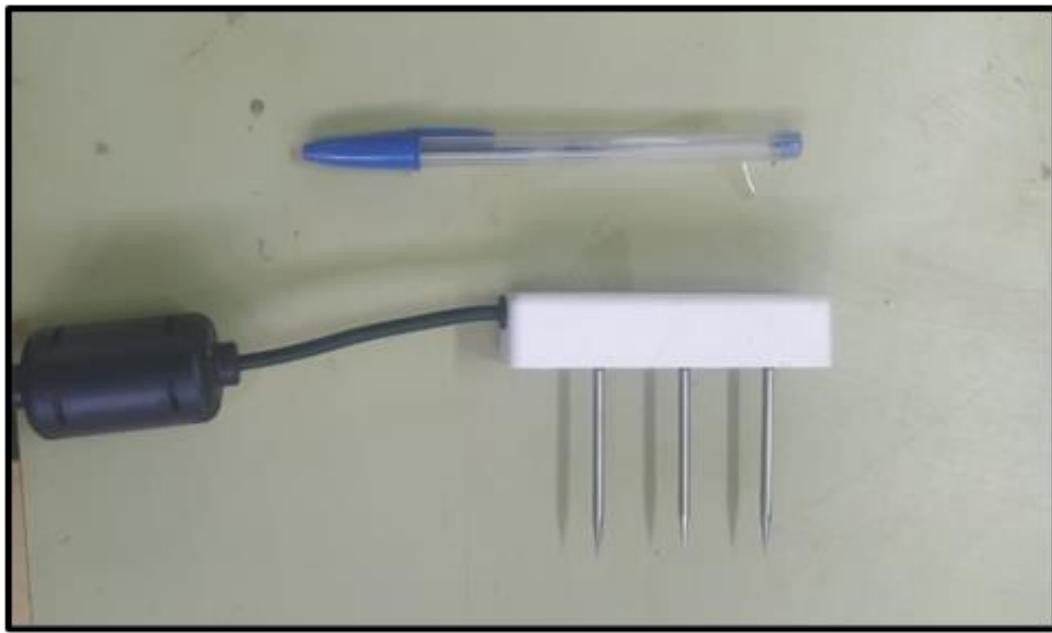


Figura 3: Sensor TEROS 12.

## 5.2. Caracterização do Rejeito

Para este projeto foram utilizados dois rejeitos de minério de ferro fornecidos pela empresa Vale S.A.

O primeiro rejeito, denominado de Abóboras, é itabirítico e advindo da Mina do Pico, localizada no município de Itabirito em MG.

Segundo Boccamino (2017), 70% dos rejeitos da Mina do Pico foram classificados como rejeitos arenosos (constituídos por areia e silte), no qual são submetidos à processos de espessamento e filtragem à vácuo até atingirem a condição não saturada. Os outros 30% apresentaram granulometria fina (silto-argilosa) e são depositados em pilhas após o processo de espessamento. Neste projeto será utilizado apenas o rejeito granular.

Estudos por difração de raio-x (Figura 4) feitos por Jesus (2021), mostraram que o rejeito estudado é composto consideravelmente por quartzo e hematita, sendo a goethita, muscovita e caulinita, minerais que ocorrem em menores proporções.

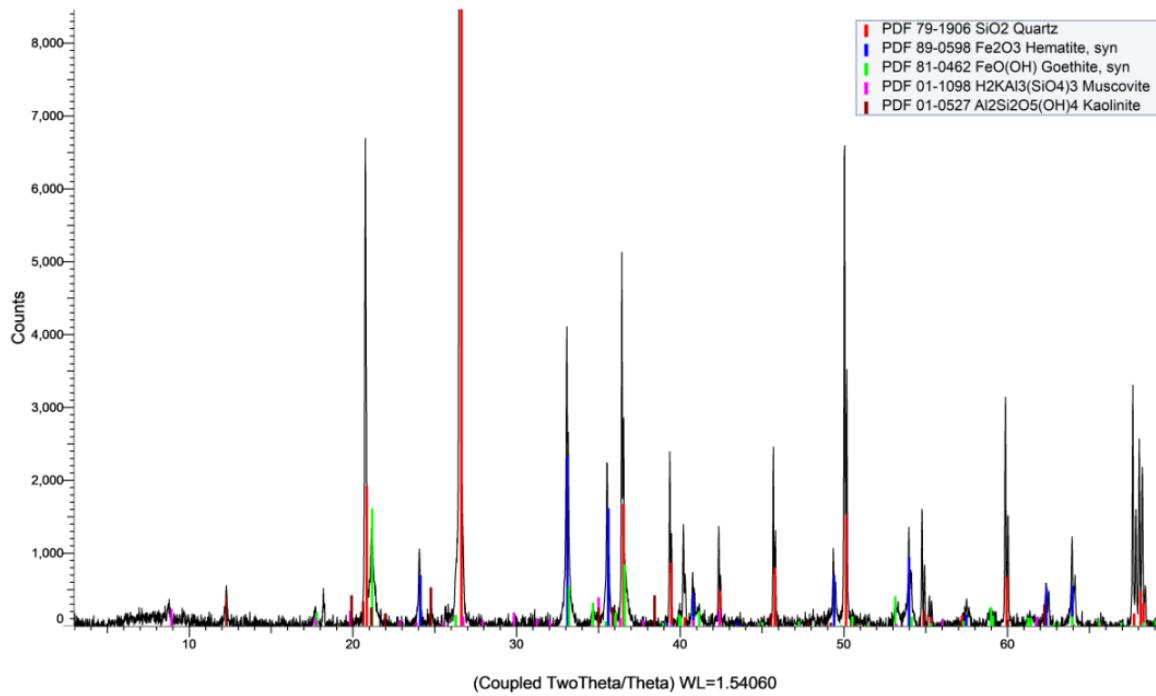


Figura 4: Difratograma de raio-x do rejeito Abóboras. (Fonte: Jesus, 2021).

O segundo rejeito, denominado de Flotação Cianita, é advindo da Mina Vargem Grande, localizada no município de Nova Lima em MG. Estudos por difração de raio-x (Figura 5) mostraram que o rejeito Flotação Cianita é composto exclusivamente de quartzo e hematita, sendo a hematita equivalente a 10,9% da sua composição.

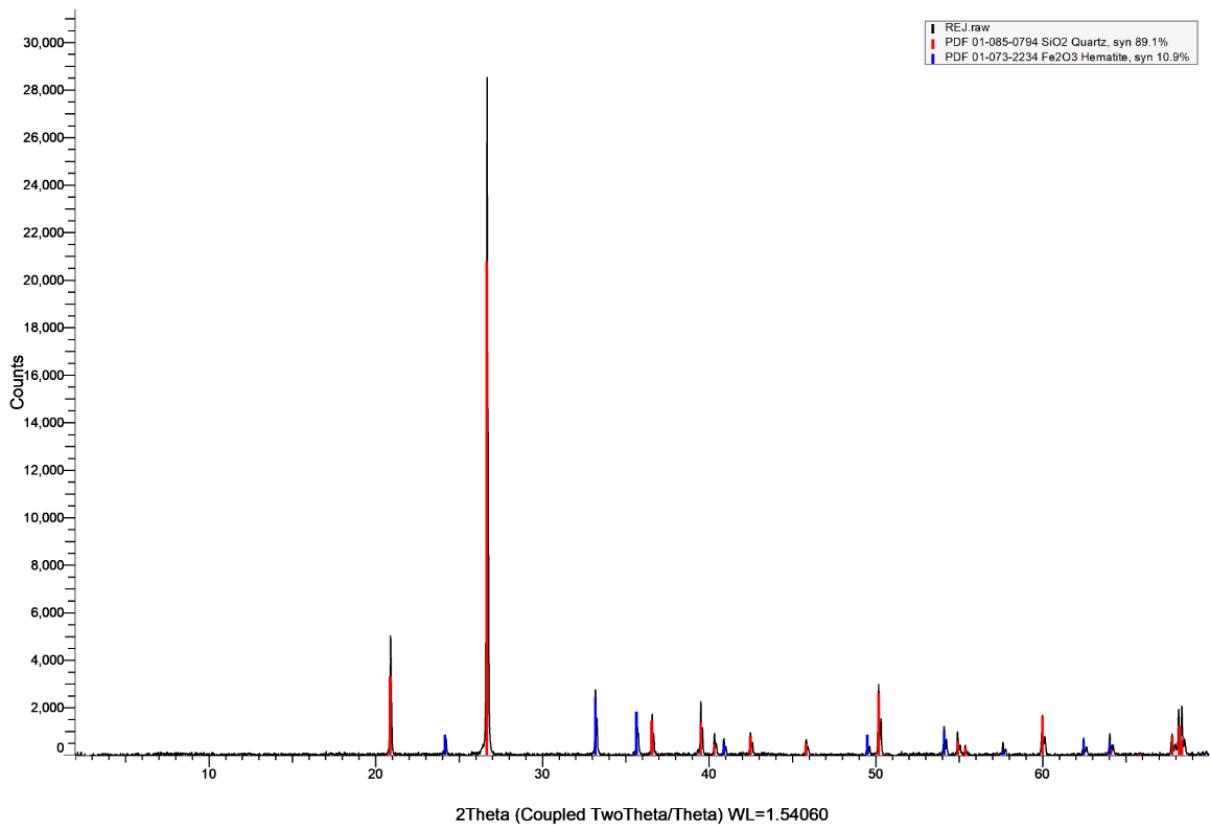


Figura 5: Difratograma de raio-x do rejeito Flotação Cianita.

### 5.3. Ensaio de Compactação Normal Proctor

O ensaio de Compactação Normal Proctor para o rejeito Abóboras foi realizado no trabalho de Jesus (2021), gerando uma densidade seca de  $2,04 \text{ g/cm}^3$  e umidade ótima de 12,6%, de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1: Resultado do Ensaio de Compactação Proctor para o rejeito Abóboras (Fonte: Jesus, 2021).

	$\rho_d \text{ (g/cm}^3)$	Umidade Ótima (%)
<b>Proctor Normal</b>	2,04	12,6

Sendo assim, para este projeto, foi necessário fazer o ensaio de Compactação Normal Proctor apenas para o rejeito Flotação Cianita.

O ensaio foi realizado seguindo as orientações da norma NBR 7182 (ABNT, 1986). Sendo assim, foi utilizado um cilindro metálico padrão de volume igual a  $1000 \text{ cm}^3$  onde o rejeito foi compactado em 3 camadas iguais, cada uma delas por meio de 26 golpes de um soquete padrão de 2,5 kg, caindo de uma altura de 30,5 cm, gerando uma energia normal de  $5,95 \text{ kg.cm/cm}^3$ .

A Figura 6 (A) mostra o registro fotográfico da amostra compactada em uma energia de  $5,95 \text{ kg.cm/cm}^3$ . Já a figura 6 (B) mostra o registro da amostra retirada do molde cilíndrico utilizado para o ensaio.

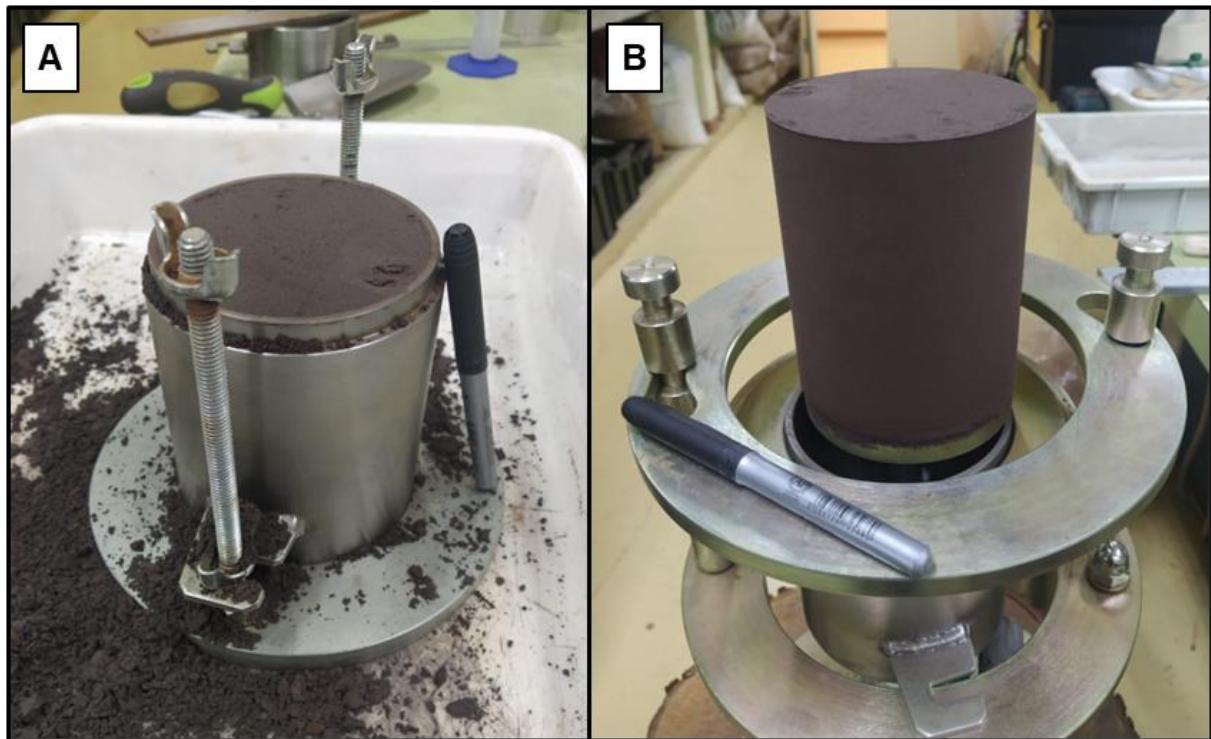


Figura 6: Ensaio de Compactação Proctor. A - Amostra compactada. B - Amostra retirada do molde.

Este ensaio foi repetido 6 vezes, quando se teve a certeza de que foi alcançado dois pontos abaixo da umidade ótima e dois pontos acima. Após cada compactação, foi anotado o

peso do corpo de prova para determinação do peso específico e foram retiradas 2 porções de solo para determinação do teor de umidade. Com os valores do peso específico do solo e do teor de umidade, foi calculado o peso específico aparente seco mediante a equação 1:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{(1+w)} \quad (1)$$

Com os valores do peso específico aparente seco e do teor de umidade foi feito o gráfico da curva de compactação, onde determinou-se o teor de umidade ótima, de 10,85%, que foi utilizada como base para os experimentos de medição de umidade com o sensor TEROS 12.

#### 5.4. Instalação do Sensor

De acordo com o manual de especificações do fabricante (2020), para a utilização do sensor TEROS 12 é importante fazer uma verificação da funcionalidade do sensor antes de sua utilização. Esta verificação pode ser feita deixando o sensor no ar e totalmente na água, sendo que é esperado que o sensor leia um valor de aproximadamente  $0,70 \text{ m}^3/\text{m}^3$  na água e um valor levemente negativo no ar. Após a verificação o sensor pode ser inserido no solo em qualquer posição e de forma que as hastes do sensor estejam cobertas pelo solo, sendo importante garantir que não existam objetos metálicos próximos ao mesmo, pois sua funcionalidade pode ser afetada. Também é importante compactar o solo ao redor das hastes do sensor para evitar a presença de vazios com ar que possam comprometer a funcionalidade do mesmo.

No presente estudo os sensores foram calibrados completamente inseridos no solo, que é a forma como serão utilizados nas colunas. Verificou-se ainda o efeito deste procedimento quando comparado com o processo de cravação apenas das hastes.

#### 5.5. Testagem do Sensor TEROS 12

Com a utilização dos dois rejeitos de minério de ferro estudados foram obtidos 23 pontos de calibração para cinco densidades diferentes. Tanto para o rejeito Abóboras quanto para o Flotação Cianita foram definidas duas equações em função das densidades utilizadas. A utilização de um segundo rejeito (Flotação Cianita) foi feita para comparação dos resultados das curvas de calibração, de modo a definir se seria necessário fazer uma calibração específica para cada tipo de rejeito.

##### 5.5.1. Experimento 1

O experimento 1 consistiu na mistura de água com o rejeito Abóboras (Figura 7), em que foram verificados os valores brutos (RAW) do sensor ao longo do tempo. O sensor foi

instalado no topo de um recipiente de vidro de forma que conseguisse medir o processo de sedimentação do rejeito em suspensão na água.



Figura 7: Mistura de água com o rejeito Abóboras para testagem com sensor TEROS 12.

### 5.5.2. Experimentos 2 e 3

Os experimentos consistiram em fazer a leitura pelo sensor de diversos teores de umidade concomitantemente com a leitura pelo método de amostragem direta a fim de verificar se o sensor mediria o mesmo teor indicado por este método.

O método de amostragem direta consiste na retirada de uma pequena amostra do rejeito utilizado que deve ser armazenado em uma pequena cápsula metálica. Essa amostra deve ser pesada em uma balança de alta precisão junto com a cápsula e então colocada em uma estufa com temperatura acima de 100º C por pelo menos 24 horas até estar completamente seca para então ser pesada novamente. Após este processo é feito o cálculo do teor de umidade gravimétrica (w) de acordo com a equação 2:

$$w = \frac{\text{massa de água}}{\text{massa seca}} * 100 \quad (2)$$

Entretanto, o sensor TEROS 12 mede a umidade volumétrica, que relaciona o volume de água com o volume de rejeito. Dessa forma, para o cálculo da umidade volumétrica ( $\theta$ ) multiplicamos a umidade gravimétrica pela densidade seca ( $\rho_d$ ) dividida pela densidade da água ( $\rho_w$ ), conforme a equação 3:

$$\theta = w * \frac{\rho d}{\rho w} \quad (3)$$

Em ambos os experimentos se utilizou o rejeito Abóboras, com a diferença de que para o 2 utilizou-se a densidade do solo com valor de 1,86 g/cm<sup>3</sup> e para o 3 utilizou-se o valor de 2,35 g/cm<sup>3</sup>. Além disso, o método adotado para o experimento 3 foi diferente. Enquanto no experimento 2 o sensor foi inserido completamente dentro do rejeito, no experimento 3 apenas as hastes metálicas foram cravadas na superfície do rejeito. O objetivo foi verificar se a calibração sofreria algum tipo de alteração por conta do método utilizado.

Para o preparo do experimento 2 foram separados 6064,34 g de rejeito seco que ocuparia um volume de 3260,4 cm<sup>3</sup> de um recipiente de plástico retangular. Foram então adicionados e misturados cerca de 325 g de água para se chegar em uma umidade aproximada de 5% (a umidade real foi verificada pelo método de amostragem direta) definida pelo cálculo das Equações 4 e 5:

$$massa \text{ úmida} = massa \text{ seca} * (1 + w/100) \quad (4)$$

$$massa \text{ de água adicionada} = massa \text{ úmida} - massa \text{ seca} \quad (5)$$

Após esta etapa, o rejeito foi fracionado em 3 porções de tamanhos iguais e cada porção foi adicionada e compactada uma sobre a outra no recipiente de plástico. O sensor foi inserido no recipiente após o processo de compactação da primeira porção e, em seguida, as outras duas porções foram adicionadas e compactadas. Iniciou-se então o processo de espera do tempo de equilíbrio (indicado após um período com um valor constante) do sensor para a leitura do teor de umidade. Assim que o sensor entrou em equilíbrio foi adicionado mais água de forma uniforme no solo para atingir um novo teor de água. Salienta-se que esses processos de adição de água exigem um equilíbrio do solo com a água adicionada. Este processo foi repetido várias vezes até se obter os 4 dados de teores de umidade pré-definidos (5, 10, 12 e 15%). Em cada teor de umidade medido foi coletada uma amostra do solo para verificar o teor pelo método de amostragem direta. As etapas do processo estão exemplificadas na Figura 8.

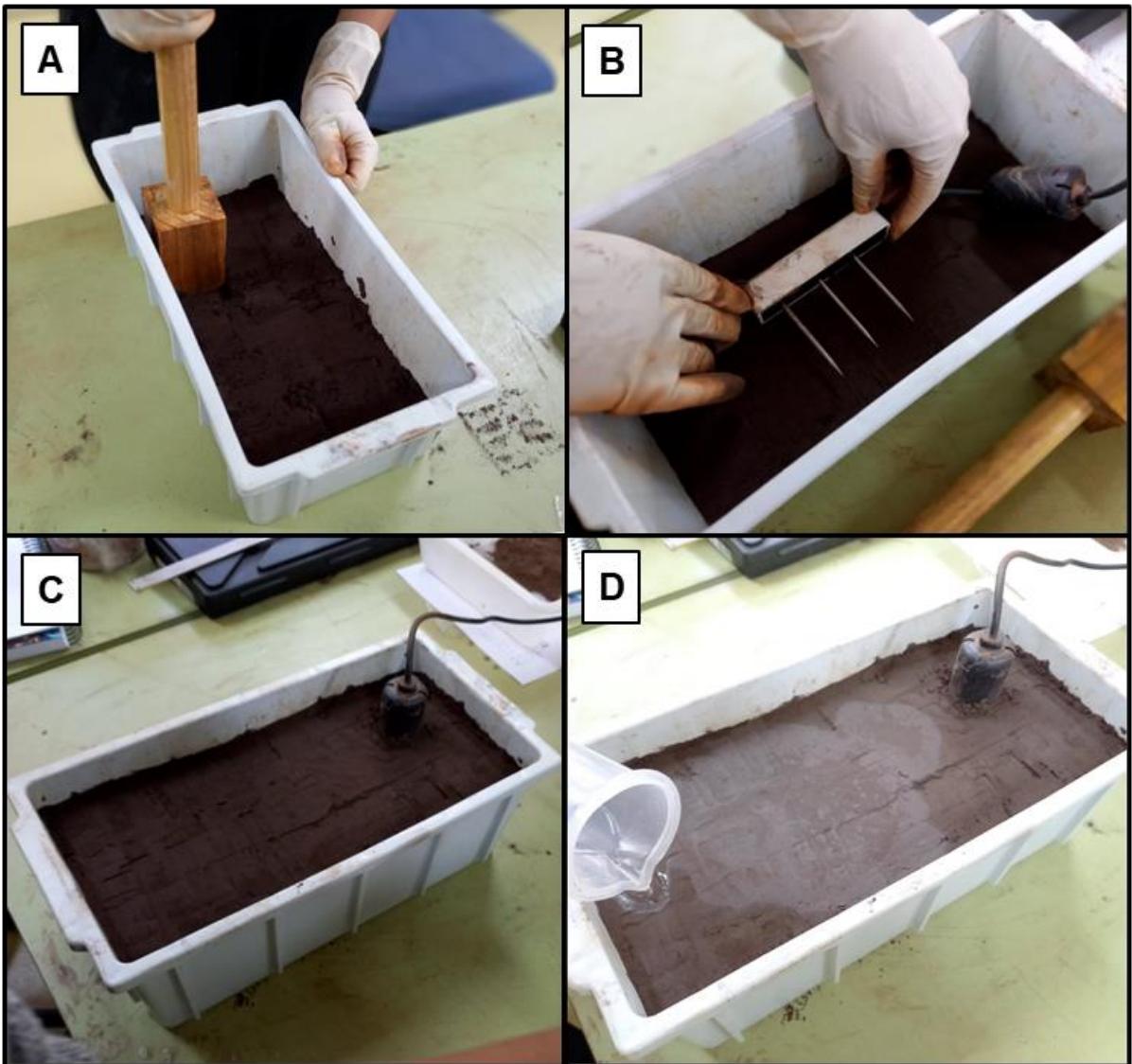


Figura 8: Montagem do segundo experimento. A) Adição e compactação da primeira porção de rejeito. B) Adição do sensor TEROS 12. C) Montagem finalizada. D) Adição de água para início da próxima etapa com novo teor de umidade pré-estabelecido.

Os teores escolhidos para o experimento com o rejeito Abóboras foram definidos com base na umidade ótima de 12,6%, definido no trabalho de Jesus (2021). Valores de umidade muito acima da umidade ótima acabam sendo difíceis de se trabalhar pois o rejeito se liquefaz, passando a se comportar como um fluido.

Após o término da última etapa, o sensor continuou a medição do teor de umidade por mais 72 dias enquanto a água do rejeito estava em processo de evaporação. Durante este período foram coletadas mais 3 amostras de solo para cálculo do teor de umidade pelo método de amostragem direta, de forma a aumentar a quantidade de dados do experimento.

A montagem do experimento 3 foi feita de forma similar, porém com a utilização de outro recipiente. Para este foi utilizado um recipiente metálico circular com volume de 1000 cm<sup>3</sup> (Figura 9). Este experimento também foi feito com um menor número de dados (3 dados), com valores de umidade aproximados de 11, 12 e 14% (verificadas pelo método de

amostragem direta), pois o objetivo era apenas verificar o efeito do processo de cravação das hastes do sensor.



Figura 9: Experimento 3 - medição de umidade do rejeito Abóboras com a cravação das hastes do sensor TEROS 12.

#### 5.5.3. *Experimento 4*

O experimento 4 seguiu o mesmo procedimento do experimento 2 e também teve como objetivo verificar a curva de calibração do sensor TEROS 12, porém dessa vez utilizando areia normal brasileira (NBR-7214) no lugar do rejeito de minério de ferro. A densidade utilizada foi de 1,29 g/cm<sup>3</sup>.

A testagem com areia foi feita como forma de comparação dos resultados, uma vez que a areia, diferentemente do rejeito de minério de ferro, não possui grande porcentagem de metais pesados em sua composição. Sendo assim, o sensor sofre menos interferência destes metais e tende a apresentar resultados mais próximos aos do método de amostragem direta.

Como a areia é um solo mais fácil de se trabalhar pois a água adicionada espalha-se mais rapidamente, foi possível fazer a análise de 10 dados de umidades diferentes (variando de 2% até 20% de umidade). Para este experimento também utilizou-se o recipiente de plástico retangular, conforme Figura 10.



Figura 10: Experimento 4 - medição de umidade de areia com o sensor TEROS 12.

#### 5.5.4. Experimentos 5, 6 e 7

Os experimentos 5, 6 e 7 também consistiram em fazer a leitura pelo sensor TEROS 12 de diversos teores de umidade concomitantemente com a leitura pelo método de amostragem direta, entretanto, para estes foi utilizado o rejeito Flotação Cianita.

Como o rejeito Flotação Cianita ainda não tinha sido estudado em trabalhos anteriores, foi necessário fazer um ensaio de compactação Proctor a fim de descobrir a umidade ótima do rejeito, chegando a um valor de 10,85%. Dessa forma, para os experimentos 5, 6 e 7 foram testadas umidades variando de 6% a 16% de umidade, evitando o efeito de liquefação do solo.

Para os três experimentos foi utilizado um recipiente de plástico circular com volume de 2779,21 cm<sup>3</sup>. No experimento 5 foram compactados 4200,08 g de rejeito seco neste recipiente, gerando uma densidade de 1,51 g/cm<sup>3</sup>. No 6 foram compactados 5168,90 g de rejeito seco, gerando uma densidade de 1,86 g/cm<sup>3</sup>. E no 7 foram compactados 5600,11 g, gerando uma densidade de 2,015 g/cm<sup>3</sup>. Este último experimento foi feito apenas para checagem de dados, de modo que foram feitas apenas 2 coletas de dados.

Os registros fotográficos podem ser observados na Figura 11.

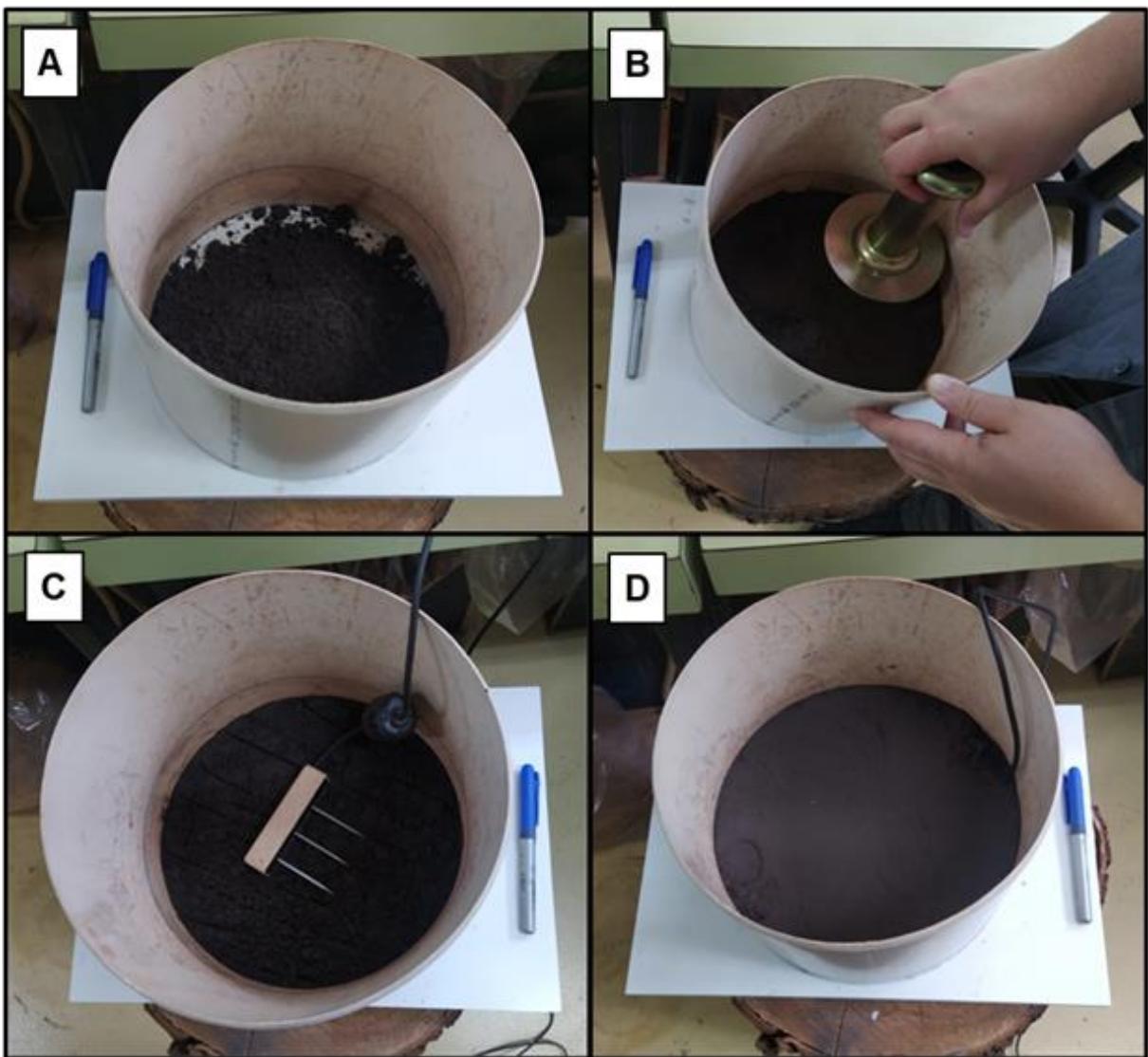


Figura 11: Montagem do experimento 5. A) Adição de rejeito. B) Compactação do rejeito. C) Adição do sensor TEROS 12. C) Montagem finalizada.

### 5.6. Coleta de Dados e Calibração

Para todos os experimentos, os dados dos sensores foram automaticamente coletados de 1 em 1 minuto pelo software *ZENTRA Utility*. Ao fim dos experimentos os dados são baixados e transferidos para o programa *Microsoft Excel*, onde 3 tipos de gráficos estatísticos de dispersão (*scatterplot*) foram feitos:  $\theta$  (%) lido pelo sensor x tempo (min);  $\theta$  (%) lido pelo sensor x  $\theta$  (%) calculado pelo método de amostragem direta; e  $\theta$  (%) calculado pelo método de amostragem direta x leitura bruta do sensor. Além destes, também foi feito um gráfico de barras para a comparação dos tipos de amostras com a leitura bruta do sensor.

O sensor TEROS 12 possui uma equação de calibração embutida no sistema de aquisição de dados. O sistema registra um valor bruto (RAW) que é convertido para teor de umidade volumétrica ( $\theta$ ). A equação de calibração original do sensor é definida pela equação 6 e pode ser observada na Figura 12.

$$\theta = (0.03879 * RAW) - 69.56 \quad (6)$$

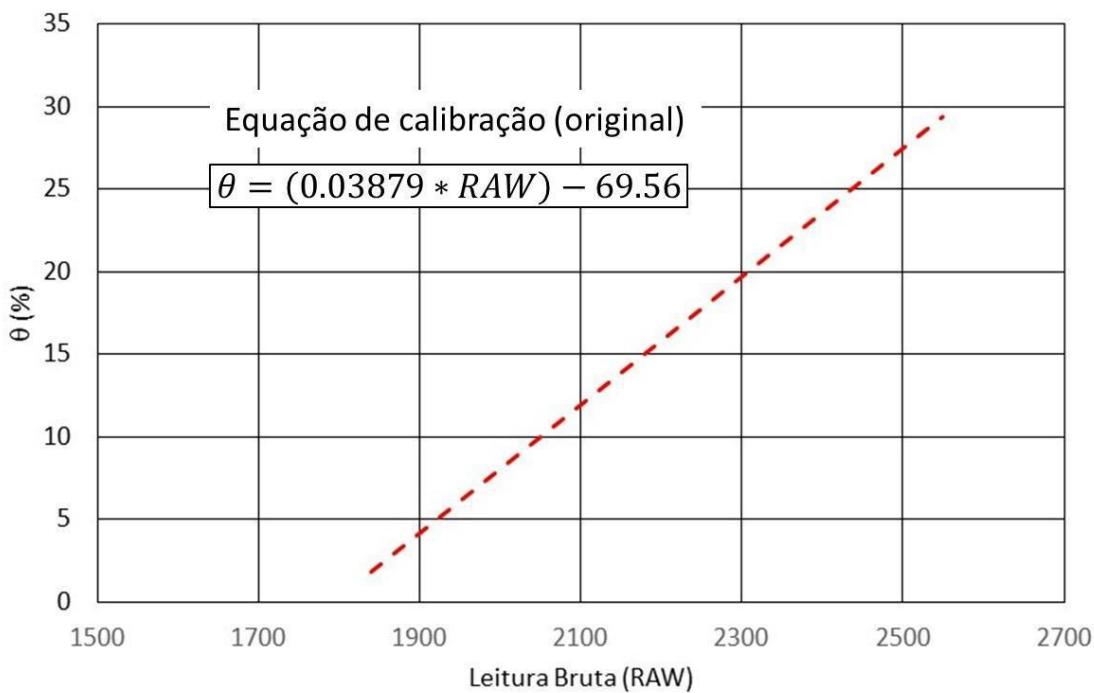


Figura 12: Gráfico da equação de calibração original do sensor TEROS 12.

Entretanto, de acordo com Evett et al. (2008), a calibração automática do sistema leva em conta uma série de condições controladas, como temperatura controlada, água destilada, tipo de solo e sua densidade. Isto produz uma calibração muito precisa para as condições testadas. Porém, como o rejeito utilizado difere muito dos solos usualmente encontrados na natureza é necessário fazer uma calibração específica para o mesmo.

A calibração do sensor TEROS 12 foi feita utilizando o gráfico de dispersão e com base na equação gerada pelo coeficiente de correlação linear de Pearson  $r$ , em que  $y$  é equivalente ao valor de  $\theta$  calculado por amostragem direta e  $x$  é igual ao valor de  $\theta$  lido pelo sensor. Com isso, a própria equação de  $r$  já é a equação de calibração.

## 6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 6.1. Teor volumétrico no ar e na água

Para se avaliar o comportamento do sensor em condições bem conhecidas, foram medidos os valores brutos com o sensor em três condições, quais sejam: no ar, na água, em areia pura (areia padronizada IPT) seca e no rejeito seco. O valor bruto (RAW) registrado pelo sensor no ar foi de 1843,8 e na água foi de 3296,0 (Figura 13). Também foram medidos os valores na areia seca (1926,0) e no rejeito seco (2060,0).

O resultado do experimento em que o rejeito foi colocado em suspensão na água também pode ser observado na Figura 8. Foi feito o acompanhamento da variação da leitura (dado bruto) com o processo de sedimentação em que o valor da água com rejeito 1 representa o momento da completa mistura do rejeito com a água, enquanto que a água com rejeito 4 representa o momento de total sedimentação do rejeito no fundo do recipiente. Sendo assim, os valores de água com rejeito 2 e 3 são os momentos intermediários entre estes processos explicados. É possível observar que quanto maior o processo de sedimentação do rejeito mais próximo o valor de RAW fica do valor da água, porém, ainda assim, levemente menor.

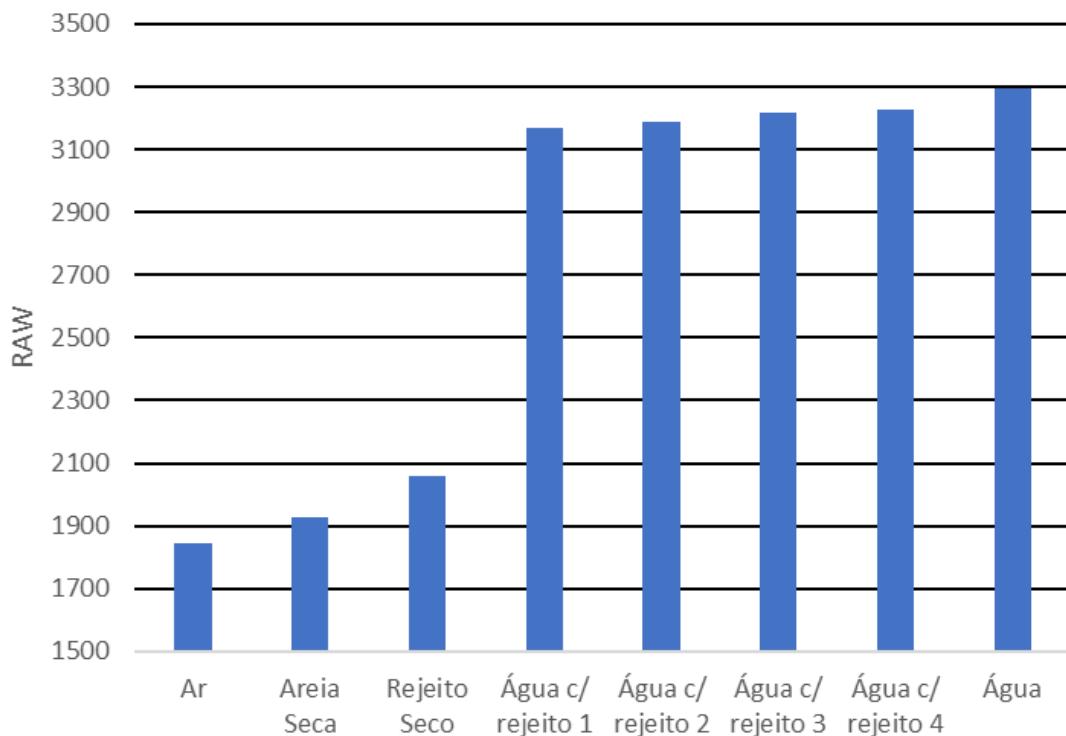


Figura 13: Gráfico relacionando o tipo de material com a leitura bruta (RAW) do sensor TEROS 12.

Com este experimento é possível definir que em uma situação de campo (com rejeitos de minério de ferro que possuam as mesmas características físicas e químicas dos rejeitos utilizados neste experimento) as condições máximas (solo totalmente úmido) e mínimas (solo totalmente seco) medidas pelo sensor em RAW seriam de 3228,00 e 2060,00, respectivamente. Isto provavelmente ocorre por conta da composição mineral do rejeito que possui uma quantidade significativa de ferro, alterando o valor da permissividade dielétrica e, consequentemente, a calibração do sensor.

## 6.2. Curva de Compactação Normal Proctor

A curva de compactação para o rejeito Flotação Cianita pode ser visualizada na Figura 14. Foi necessário fazer a coleta de 6 pontos para se ter a certeza de que havia sido coletado

o número correto de dados para a confecção da curva de compactação. O teor de umidade ótimo encontrado para o rejeito foi de 10,85% e a densidade seca máxima foi de 2,015 g/cm<sup>3</sup>, como mostra a Tabela 2.

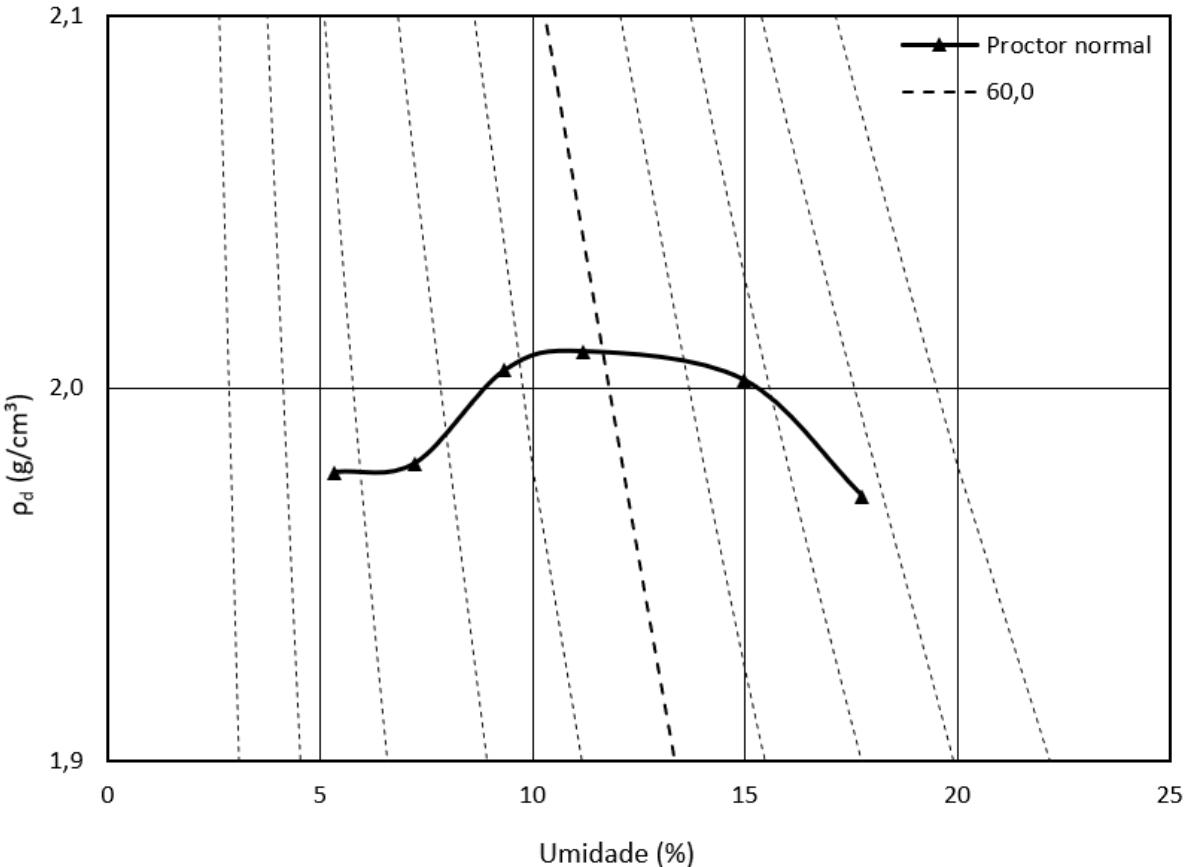


Figura 14: Curva de Compactação Normal Proctor com sua curva de saturação em negrito.

Tabela 2: Resultados da Curva de Compactação Normal Proctor

Resultados do Proctor Normal	
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2,015</b>
Umidade Ótima (%)	<b>10,85</b>

### 6.3. Determinação das Equações de Calibração

Com base na análise dos dados obtidos com verificação da calibração em areia, constatou-se que a calibração original do sensor é adequada para a determinação dos valores de  $\theta$ , uma vez que a linha de unidade dos valores medidos com o sensor e calculados com a equação original apresentam uma relação 1:1. Já para os dados experimentais dos rejeitos utilizados a relação não foi de 1:1, sendo então necessário estabelecer uma nova equação de calibração dos dados, que também é dependente da densidade utilizada. Para o rejeito Abóboras, a densidade imposta de 1,86 g/cm<sup>3</sup> teve a seguinte Equação 7 definida:

$$\theta = (0.9471 * \theta_{sensor}) - 10.404 \quad (7)$$

Já para a densidade calculada de 2,35 g/cm<sup>3</sup> foi definida a Equação 8:

$$\theta = (1.0189 * \theta_{sensor}) - 27.204 \quad (8)$$

Para o rejeito Flotação Cianita, a densidade imposta de 1,51 g/cm<sup>3</sup> teve a seguinte Equação 9 definida:

$$\theta = (1.0058 * \theta_{sensor}) - 9.643 \quad (9)$$

A densidade calculada de 1,86 g/cm<sup>3</sup> formou uma reta muito similar (levemente para a direita) à da reta gerada pela densidade de 1,51 g/cm<sup>3</sup>, definida pela Equação 10:

$$\theta = (1.0763 * \theta_{sensor}) - 11.62 \quad (10)$$

Na Figura 15 estão apresentados os dados e as equações obtidas.

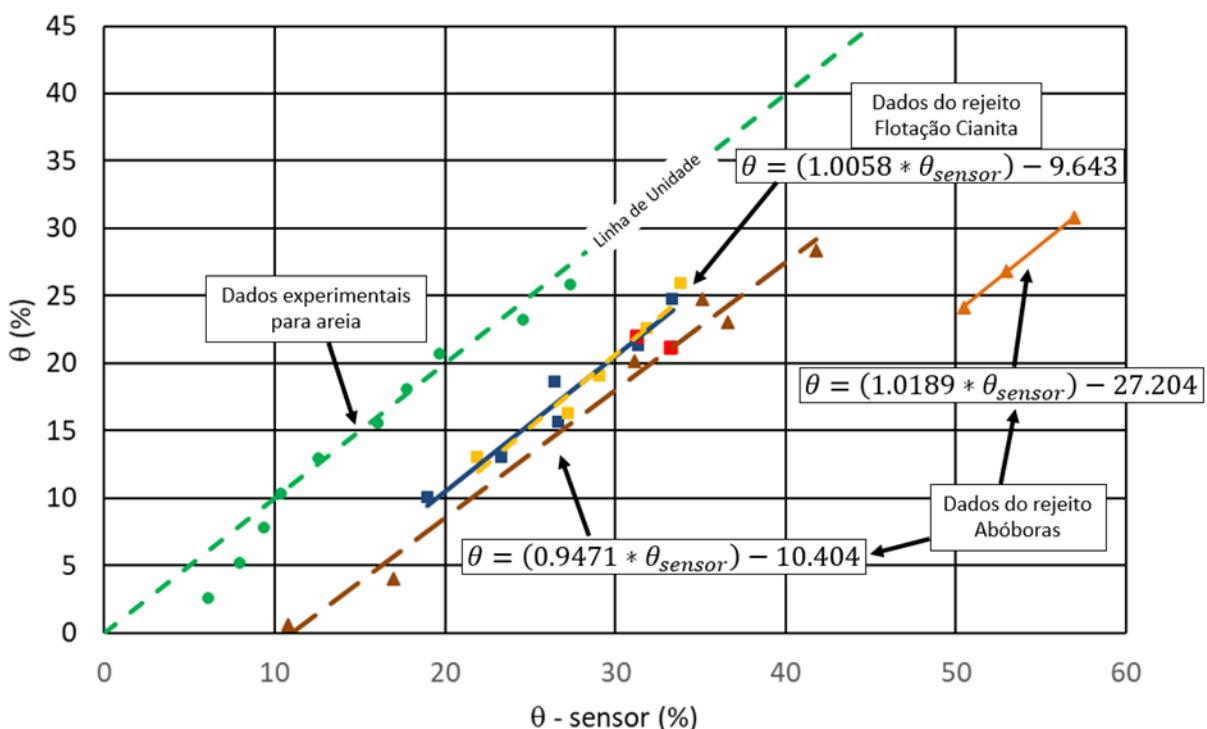


Figura 15: Gráfico de dispersão com dados de  $\theta$  medidos por amostragem direta no eixo y e dados de  $\theta$  lidos pelo sensor TEROS 12 no eixo x.

As equações de calibração do rejeito também foram geradas com a utilização dos dados brutos do sensor. Na Figura 16 são apresentados os resultados obtidos e as equações correspondentes. As equações para as duas densidades são apresentadas nas Equações 11 e 12 ( $\rho_d = 1,86$  g/cm<sup>3</sup> e  $\rho_d = 2,35$  g/cm<sup>3</sup>, respectivamente):

$$\theta = (0.0367 * RAW) - 76.29 \quad (11)$$

$$\theta = (0.0395 * RAW) - 98.02 \quad (12)$$

E as equações do rejeito Flotação Cianita são apresentadas nas Equações 13 e 14 ( $\rho_d = 1,51 \text{ g/cm}^3$  e  $\rho_d = 1,86 \text{ g/cm}^3$ , respectivamente):

$$\theta = (0.0369 * RAW) - 79.60 \quad (13)$$

$$\theta = (0.0418 * RAW) - 86.49 \quad (14)$$

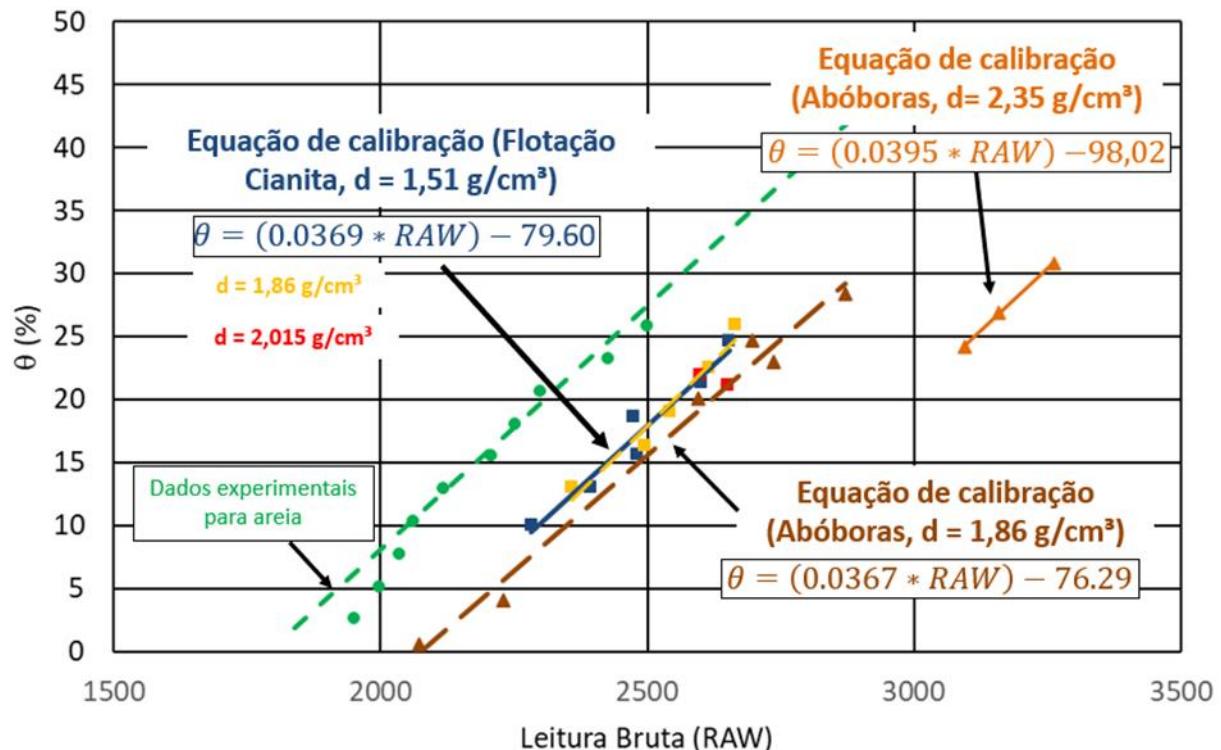


Figura 16: Gráfico de dispersão com dados de  $\theta$  medidos por amostragem direta no eixo y e dados brutos lidos pelo sensor TEROS 12 no eixo x.

Os dados do rejeito Flotação Cianita calculados para a densidade de  $2,015 \text{ g/cm}^3$  (Figura 16, em vermelho) mostram que o sensor apresenta uma variação na medição mesmo para valores de umidade muito próximos. Entretanto, essa variação é bem definida, uma vez que, tanto os dados com densidade mais baixa quanto os com densidade mais alta intercalam-se na mesma amplitude de valores. Sendo assim, com a utilização de todos os dados coletados para os rejeitos de mineração foi estabelecido uma única equação de calibração, definida pela Equação 15:

$$\theta = (0.9704 * RAW) - 9.7151 \quad (14)$$

Na Figura 17 são apresentados os dados e a equação obtida.

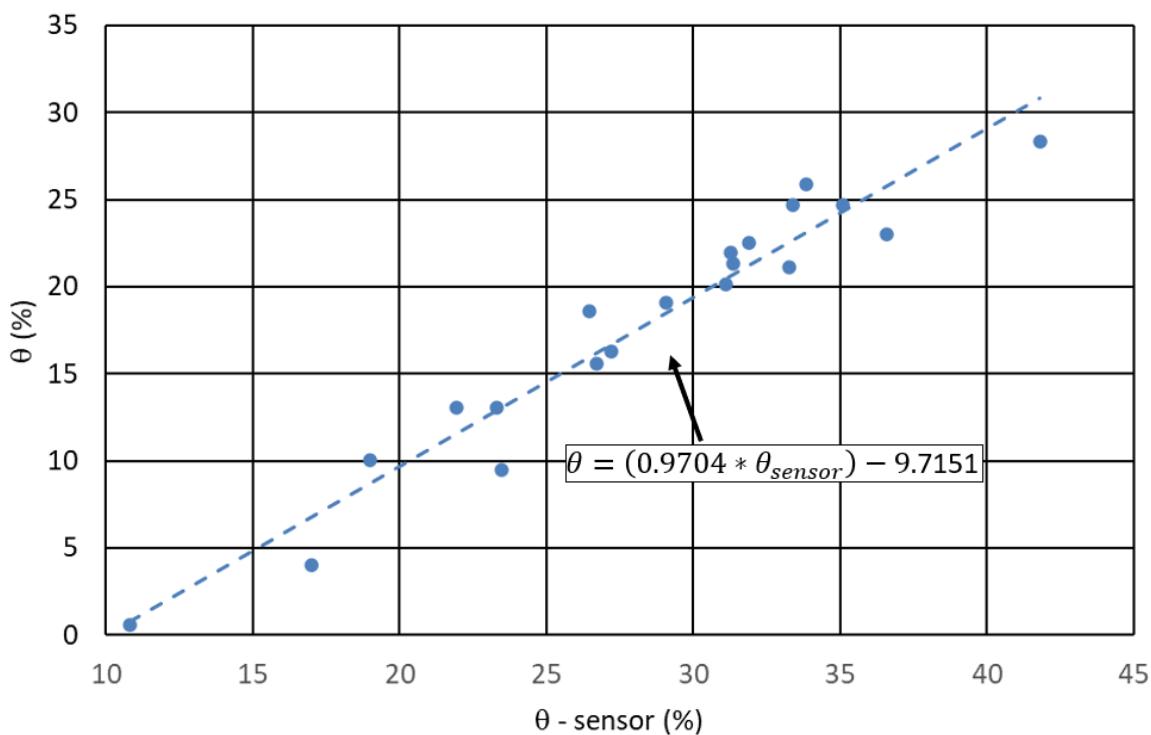


Figura 17: Gráfico de dispersão com os 20 dados coletados para os rejeitos de mineração estudados, definindo uma única equação de calibração.

Os dados gerados pelo rejeito Abóboras com densidade de  $2,35 \text{ g/cm}^3$  não foram considerados na confecção da equação única, uma vez que o procedimento de instalação do sensor foi diferente em relação aos outros dados coletados. Sendo assim, é possível que a diferença do método tenha influenciado os resultados.

## 7. CONCLUSÕES

Com base nos estudos realizados em laboratório foi possível obter as seguintes conclusões:

- A curva de calibração original do fabricante do TEROS 12 é válida para solos arenosos;
- A curva de calibração do fabricante não é válida para rejeitos de minério de ferro que contenham uma grande quantidade de hematita;
- Foi detectada uma variação da equação de calibração em função da densidade do material;
- Mesmo com a variação observada em função da densidade determinou-se uma única equação de calibração para o rejeito estudado;

Com base nos estudos realizados podemos ainda apresentar as seguintes considerações finais:

- Para o projeto: “Avaliação da retenção de água em rejeitos filtrados por meio de colunas instrumentadas” que está sendo desenvolvido pelo professor Dr.

Fernando A. M. Marinho com o apoio da VALE S.A, a equação definida na Figura 17 pode ser utilizada para a determinação do teor de umidade.;

- O processo de instalação do sensor (somente as hastes cravadas e todo o sensor dentro do solo) parece ter influência nos resultados, por conta disso, para o projeto da Vale o sensor deve ser instalado estando totalmente dentro do solo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Boccamino, G.D., 2017, Desenvolvimento de Geometria para Empilhamento de Rejeitos Desaguados de Minério de Ferro [Dissertação de Mestrado]: Ouro Preto, Universidade Federal de Ouro Preto.
- Dasberg, S. & Hopmans, J.W., 1992, Time domain reflectometry calibration for uniformly and nonuniformly wetted sandy and clayey loam soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49:293-297.
- Davies, M.P., 2011, Filtered Dry Stacked Tailings: The Fundamentals, Vancouver, University of British Columbia Library, doi: 10.14288/1.0107683.
- Davis, J.L. & Chudobiak, W.J., 1975, In situ meter for measuring relative permittivity of soils. *Geol. Surv. Can., Part A Paper*, 75:75-79.
- Evett, S.R., Heng, L.K., Moutonnet, P., Nguyen, M.L., 2008, Field Estimation of Soil Water Content: A Practical Guide to Methods, Instrumentation and Sensor Technology, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, ISSN 1018-5518, p. 7-14.
- Gitirana Junior, D.D.F.N., Marinho, F.A. and Soto, M.A., 2015, A curva de retenção de água de materiais porosos, in Solos não saturados no contexto geotécnico, São Paulo.
- Gitirana Junior, D.D.F.N., Marinho, F.A. and Soto, M.A., 2015, Instrumentação de laboratório e campo e a medição da curva de retenção, *in* Solos não saturados no contexto geotécnico, São Paulo, p. 231-256.
- ICT International, 2014, Which soil moisture sensor should I choose?: [http://www.ictinternational.com/case-study-pdf/?product\\_id=1483](http://www.ictinternational.com/case-study-pdf/?product_id=1483) (acessado Agosto 2022).
- Irmak, S., Irmak, A., 2005, Performance of frequency-domain reflectometer, capacitance, and pseudo-transit time-based soil water content probes in four coarse-textured soils, *Applied engineering in agricultura*, 21(6), 999-1008, doi: 10.13031/2013.20035.
- Jesus, M.H.D., 2021, Definição da envoltória de resistência para um rejeito de minério de ferro saturado e não saturado [Trabalho de Conclusão de Curso]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências.
- Manual TEROS 11/12, 2021, METER Group Inc. USA: 20587\_TEROS 11-12\_Manual \_Web.pdf (acessado Abril de 2022).
- Mokarighahroodi, E., Shukla, M.K., 2019, Field Evaluation of TEROS 12 Sensor for Estimating Saturated Extract EC in a Clay Soil, Abstract H53N-1980 presented at 2019 Fall Meeting, AGU, San Francisco, California, 9–13 Dezembro.
- Pinto, C. S., 2006, Curso básico de Mecânica dos Solos, 3<sup>a</sup> edição, São Paulo: Oficina de Textos, p. 77 - 80.
- Robinson, D.A.; Bell, J.P. & Batchelor, C.H., 1994, Influence of iron and titanium on water content determination by TDR. In: TIME DOMAIN REFLECTOMETRY APPLICATIONS IN SOIL SCIENCE HELD AT THE RESEARCH CENTRE FOULUM, Dinamarca, Anais. Tjele, Danish Institute of Plant and Soil Science, p.63-70.
- Roth, C.H.; Malicki, M.A. & Plagge, R., 1992, Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR. *J. Soil Sci.*, 43:1-13.

Silva, L. C., 2021, Disposição de Rejeitos Granulares Via Dry Stacking: Uma Alternativa à Disposição em Barragens, Centro Federal De Educação Tecnológica De Minas Gerais, Unidade Araxá Engenharia De Minas, Araxá - MG.

Topp G.C.; Davis, J.L. & Annan, A.P., 1980, Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. *Water Res. Res.*, 16:574-582.

Villwock, R., Tavares, M.H.F. & Vilas Boas, M.A., 2004, Calibração de um equipamento TDR em condições de campo. *Irriga*, 9:82-88.