

Importância do monitoramento geotécnico em aterros sanitários. Comparativo entre modelos de piezômetros (Elétrico, Vector e Standpipe)

Abraão Cardoso Gonçalves da Silva; Bárbara Tyemi Edagi Fudaba; Bruno de Souza Lima; Emilly Barreto da Silva e Pamela Oxisque Cruz

Orientador: Prof.^a Dr.^a. Claudia Lucia de Moura

Resumo: Em decorrência do aumento demográfico no Brasil, e o crescente aumento relacionado a geração dos resíduos sólidos urbanos, aumenta-se gradativamente a necessidade cada vez maior dos aterros sanitários. Dessa forma, devido as dificuldades impostas para liberação de novas áreas para construção de aterros sanitários, faz com que cada vez mais haja otimização dos espaços, levando a verticalização dos atuais empreendimentos, para garantir a continuidade do atendimento de disposição de resíduos sólidos das cidades. A operação dos aterros sanitários, possuem graus de riscos variados a depender do modelo construtivo que seja executado, dessa forma é possível confirmar que para seja evitado situações de possíveis deslizamentos de taludes e consequentes impactos ambientais, torna-se cada vez mais necessário o aprimoramento das técnicas de controle geotécnico, como do uso de equipamentos específicos de medição dos maciços de resíduos sólidos, como marcos superficiais, piezômetros, inclinômetros, possibilitando prever possíveis riscos de deslizamentos desses empreendimentos. Neste artigo será abordado, a importância do monitoramento em aterros sanitários por meio de piezômetros e seus derivados tipos, especificações, singularidades e diferenças de leitura desses instrumentos nos aterros sanitários. De modo prático, este artigo também trará um estudo de caso direcionado a um estudo de caso, voltado para análise de um novo modelo de piezômetro, denominado de vector elétrico, desenvolvido e estudado pela equipe técnica da empresa Estre Ambiental, com apoio de parceiros técnicos, na tentativa de aprimorar o acompanhamento dos dados de poropressão, tão importantes tecnicamente para os atuais aterros sanitário implantados.

Palavras-chave: Aterros sanitários. Piezômetros. Monitoramento geotécnico

Abstract: As a result of the demographic increase in Brazil, and the growing increase related to the generation of urban solid waste, the need for sanitary landfills is gradually increasing. In this way, due to the difficulties imposed to release new areas for the construction of sanitary landfills, it causes more and more optimization of spaces, leading to the verticalization of current projects, to ensure the continuity of service for the disposal of solid waste in cities. The operation of sanitary landfills, have varying degrees of risk depending on the constructive model that is executed, in this way it is possible to confirm that in order to avoid situations of possible landslides of slopes and consequent environmental impacts, it becomes increasingly necessary to improve the geotechnical control techniques, such as the use of specific equipment for measuring solid waste masses, such as surface landmarks, piezometers, inclinometers making it possible to predict possible risks of landslides in these projects. This article will address the importance of monitoring in sanitary landfills through piezometers and their derivatives types, specifications, singularities, and differences in the reading of these instruments in sanitary landfills. In a practical way, this article will also bring a case study directed to a case study, focused on the analysis of a new piezometer model called electric vector, developed and studied by the technical team of the company Estre Ambiental, with the support of technical partners., in an attempt to improve the monitoring of pore pressure data, so technically important for the currently implemented sanitary landfills.

Keywords: Sanitary landfills. piezometers. Geotechnical monitoring.

1. INTRODUÇÃO

Conforme dados da Fundação do Sistema Estadual de Análise de Dados - SEADE, (2010), o Estado de São Paulo concentrou o maior contingente populacional do Brasil residindo em áreas urbanas (39.585 mil pessoas) e a sua taxa de urbanização (95,9%) situa-se em terceiro lugar no país, abaixo apenas do Rio de Janeiro (96,7%) e do Distrito Federal (96,6%).

A crescente urbanização, e aumento da densidade demográfica exigem desenvolvimento de infraestrutura à população. Seguindo as Diretrizes Nacionais para o Saneamento Básico instituída pela Lei nº. 11.445/07, os serviços de saneamento básico contemplam o conjunto de serviços públicos, infraestruturas e instalações operacionais. A limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos são caracterizadas pelas atividades e pela disponibilização e manutenção de infraestruturas e instalações operacionais de coleta, varrição manual e mecanizada, asseio e conservação urbana, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos domiciliares e dos resíduos de limpeza urbana (BRASIL, 2007).

Os aterros sanitários caracterizam-se por técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, diminuindo os impactos ambientais, é o método que utiliza princípios da engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível (ABNT, 1992).

Após a disposição dos RSU (Resíduos Sólidos Urbanos) em camadas, existe a responsabilidade de se estabilizar esses maciços no decorrer do tempo ao ar livre, ou seja, os aterros compõem a paisagem e necessitam de cuidados especiais a fim de se evitar cisalhamentos e recalques que causam impactos ambientais. Os maciços formados em aterros sanitários de RSU podem ser caracterizados em composição randômica e amorfa, ou heterogênea e anisotrópica. Portanto, para se efetuar o monitoramento geotécnico é definido pela maior quantidade e predominância dos tipos de resíduos que compõem o aterro em estudo (BENVENUTTO, 2011).

Ainda é definido pela ABNT NBR 8419/1997, item 5.2.7 que para um projeto de aterro sanitário de RSU, deve-se calcular a estabilidade apresentando as hipóteses, os parâmetros e as fórmulas utilizadas para o cálculo de estabilidade de taludes, bermas de equilíbrio e recalques diferenciais dos aterros sanitários (ABNT, 1997)

De acordo com Benvenuto (2004, p. 7), existem várias medidas mitigadoras contra impactos ambientais, como investigar, seguindo técnicas de monitoramento, no aterro sanitário, a estabilidade e recalques dos maciços. No que cabe em controle de emissão de gases provenientes das decomposições biológicas do aterro sanitário, adota-se o monitoramento de pressões neutras geradas pelo maciço.

Segundo Benvenuto et al. (2019), em um monitoramento geotécnico devem ser analisados os deslocamentos verticais (recalques); deslocamentos horizontais (afastamentos); poropressões de líquidos e pressões neutras; resistência ao cisalhamento de resíduos; vazões de lixiviados e gases; pluviometria local; inspeções com observação de não conformidades, como trincas, afundamentos, erosões, além de dados da geologia e geotecnia locais; dados primitivos de topografia do terreno anterior ao aterro; dados da geometria da disposição e alterações de projeto; aspectos históricos de qualidade de operação; ocorrência anteriores de rupturas locais e gerais dos resíduos; influência externa dos vizinhos, como pedreiras em funcionamento e vias de tráfego pesado.

Os piezômetros são os equipamentos que registram as pressões dos fluidos internos (pressões neutras) às disposições dos resíduos, seu sistema de funcionamento é caracterizado por um sensor e um transdutor de pressão. Portanto, o presente artigo técnico tem o intuito de apresentar comparativo entre modelos de piezômetros (Elétrico, Vector e Standpipe), ou seja, uma profunda análise de seus tipos mais usuais, especificações, singularidades e diferenças de leitura na análise do aterro. Através de um estudo de caso do Aterro de Ribeirão Preto, interior do estado de São Paulo.

1.1 Justificativa

As alterações ambientais provocadas devido ao modo de vida nas grandes cidades caracterizam-se, principalmente, pela geração maciça de resíduos. Obtendo-se, na verdade, um confronto entre meio ambiente e desenvolvimento, ao não se estabelecer patamares sustentáveis de produção e consumo.

Com a saturação e fechamento dos aterros sanitários surge a demanda por novas áreas, cada vez maiores e inevitavelmente próximas aos centros urbanos. Este fato gera conflito, pois a população tende a resistir à instalação de aterros, ou outras construções do gênero, próximas do local onde moram.

Para permitir o projeto e execução de aterros sanitários com cada vez mais capacidade de armazenamento, mais seguros e mais eficientes no tratamento do lixiviado e das emissões gasosas, aspectos geotécnicos dos resíduos sólidos urbanos (RSU) que influenciam no funcionamento do aterro sanitário têm que ser investigados com mais afinco.

O conhecimento das variáveis que influenciam o comportamento mecânico do RSU propicia melhorias no projeto de aterros sanitários, bem como avaliações mais precisas de riscos associados à operação de aterros sanitários e até mesmo a realização de retro análise de escorregamentos.

Diante desse cenário, torna-se essencial o estudo geotécnico dos aterros sanitários levando em consideração as peculiaridades dos resíduos sólidos e as particularidades de cada aterro sanitário, a fim de tornar possíveis medidas que visem aumentar a vida útil do empreendimento, por questões econômicas, logísticas e ambientais.

Como instrumento primordial para controle geotécnico dos aterros sanitários os piezômetros têm papel fundamental no processo de monitoramento no que se refere a elevação das pressões internas, gerado principalmente pela decomposição da matéria orgânica, do qual gera líquidos percolados (chorume) e gases (biogás), que sem o acompanhamento correto dessa elevação pode levar a um cenário de instabilidade, gerando rupturas abruptas que levam sérios riscos ambientais e humanos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Geral

Apresentar de maneira sistemática a importância do monitoramento geotécnico dos aterros sanitários, mostrando os principais instrumentos utilizados para esse fim no Brasil.

1.2.2 Objetivos Específicos

Em relação aos objetivos específicos deste trabalho, é focar prioritariamente nos métodos de monitoramento para poropressões nos maciços de aterros sanitários.

Dessa forma será apresentado um estudo de caso relacionado a um modelo de piezômetro protótipo adaptado pelo corpo técnico formado pela Estre, Cepollina, Helicebras e Eng. Consultoria, em um dos centros de gerenciamento de resíduos da Estre, localizado em Guatapará, região metropolitana de Ribeirão Preto, sendo objeto de estudo do grupo o enfoque nos seguintes pontos comparativos:

- I. Durabilidade entre os modelos de piezômetros;
- II. Vantagens e Desvantagens de cada modelo;
- III. Método Construtivo de cada modelo;
- IV. Comparativo dos dados de Coluna de Chorume (Registro Aberto e Fechado) e Pressão de gás de cada instrumento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O crescimento da população aliado ao desenvolvimento socioeconômico provocou mudanças nos hábitos da população, principalmente no que se refere ao consumismo exacerbado trazendo problemas relacionados aos rejeitos provenientes das atividades humanas.

Segundo o IBGE (2010), a porcentagem de resíduos sólidos coletados nos domicílios aumentou mais de 20% nos últimos 17 anos. Porém, no ano de 2000 ainda se estimava que em 64% dos municípios brasileiros, todo o lixo produzido era disposto em terrenos que não passam por nenhum tipo de controle, ou seja, em lixões. Em contrapartida, após 19 anos da criação do projeto de lei, a câmara dos deputados aprovou em 2010 a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) que obriga aos municípios planejar e executar a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos gerados.

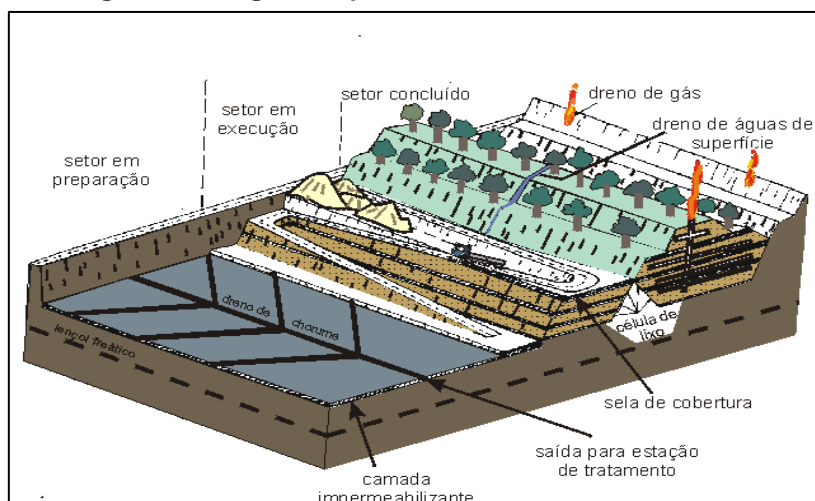
De maneira mais atualizada, pode-se observar segundo o Panorama dos resíduos sólidos no Brasil de 2021 que:

“A geração de RSU no país sofreu influência direta da pandemia da COVID-19 durante o ano de 2020, tendo alcançado um total de aproximadamente 82,5 milhões de toneladas geradas, ou 225.965 toneladas diárias. Com isso, cada brasileiro gerou, em média, 1,07 kg de resíduo por dia. Como já mencionado, uma possível razão para esse aumento expressivo foram as novas dinâmicas sociais que, em boa parte, foram quase que totalmente transferidas para as residências, visto que o consumo em restaurantes foi substituído pelo delivery e os demais descartes diários de resíduos passaram a acontecer nas residências”. (ABRELPE,2021)

2.1. Caracterização de Aterro Sanitário de RSU

Diante desse cenário necessário para a correta destinação de resíduos, a normalização desta atividade foi criada a NBR 8419 (ABNT, 1992), da Associação Brasileira de Normas Técnicas. Na norma, é definido aterro sanitário como “técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde e à sua segurança, minimizando impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos”. Este condicionamento é definido pelo empilhamento de camadas dos maciços de resíduos sólidos, otimizando o espaço e minimizando os custos de implantação e operação, conforme pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Imagem esquemática de um aterro sanitário



Fonte: (UNESP, 2022)

A falta de planejamento e investimentos em saneamento nos últimos 30 anos no Brasil fez com que grande maioria dos resíduos sólidos acabasse indo diretamente para lixões. Na última década, muitos municípios vieram a adequar os antigos lixões, a condição de aterros controlados, como é o caso do aterro estudado. A solução de adequar antigos lixões a condição de aterros controlados não resolve o problema da disposição final dos resíduos, porém adequa as melhores condições ao local de despejo dos rejeitos.

As grandes metrópoles são as que mais sofrem para adequar áreas para disposição dos resíduos, o que exige a otimização da capacidade dos atuais aterros sanitários ou aterros controlados, exigindo alturas cada vez maiores. Com o aumento da geração de resíduos pelo consumo humano, aumentam-se as cargas e volumes diários que chegam até os aterros.

Como consequência, muitos locais têm exigido o monitoramento constante, por sempre estarem no limite de suas capacidades de operação. A partir deste ponto, o problema dos aterros de RSU deixou de ser um problema sanitário para se tornar um problema geotécnico. As sobrecargas excessivas podem ocasionar processos de instabilidade, oferecendo riscos aos operários, catadores, construções irregulares no seu entorno, causando prejuízos socioeconômicos e ambientais, além de oferecer riscos de vida à população local.

Dessa forma a preocupação com o estudo do comportamento de aterros sanitários, quanto a estabilidade de taludes tem crescido nas últimas décadas, como resultado da ocorrência de rupturas em aterros de todo o mundo. Várias rupturas de aterros de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) têm ocorrido nos últimos anos, dentre as quais se destacam: o Aterro Rumpke, em Ohio (Eid et al., 2000), Aterro Dona Juanna, na Colômbia (HENDRON ET AL., 1999), Aterro Payatas, nas Filipinas (MERRY ET AL., 2005), Aterro em Bandung,

Indonésia (KOLSCH, 2005) e Aterro Bulbul em Durban, África do Sul (BLIGHT, 2008). No Brasil, o primeiro caso de ruptura de um aterro sanitário aconteceu em 1991, em São Paulo, no Aterro Sanitário Bandeirantes com o deslizamento de 65.000 m² de resíduos (BENVENUTO e CUNHA, 1991). Reddy e Basha (2014), Oliveira et al. (2015), Peng et al. (2016), Xu et al. (2017) e Morgenstern (2018) também relatam rupturas de aterros sanitários com perdas físicas e financeiras.

Há uma grande dificuldade em analisar a estabilidade dos maciços sanitários, uma vez que, ainda não existem teorias e modelos que representem de forma realista o comportamento dos RSU em aterros sanitários. Parte dessa dificuldade se deve aos diversos fatores internos, como características dos resíduos e processos biodegradativos, e externos, como operação do aterro sanitário e condições meteorológicas, que influenciam na dinâmica dos maciços sanitários e que não são considerados para a realização dessa análise. Além desses fatores, os RSU são constituídos por materiais heterogêneos e cada componente trabalha de uma forma diferente e sofrem alterações no decorrer do tempo (NORBERTO et al., 2020).

Como já se faz de conhecimento disseminado entre as empresas gestoras de centros de disposição final de resíduos, é sabido que os aterros sanitários são no resumo um “ser vivo”, que altera sua forma diariamente devido ao avanço operacional das unidades, bem como pelo processo físico/biológico que ocorre principalmente na matéria orgânica, mudando frequentemente sua forma devido a degradação da matéria.

A alteração gerada pela decomposição da matéria orgânica que faz com que haja uma alteração do resíduo sólido (saindo de matéria sólida e transformando-se em gás (biogás) e líquidos percolados (chorume), faz com que os locais onde a matéria foi disposta sofra movimentações (recalques e deslocamentos horizontais), devido ao processo de pressão gerada nos locais (poropressão), ocasionadas pelo aumento de fluidos internos, oriundos da degradação da matéria orgânicas.

2.2. Monitoramento geotécnico de aterros sanitários

Os aterros sanitários são projetados, implantados e monitorados durante muitos anos, de acordo com a NBR 13896/1997, um aterro deve ser projetado para uma vida útil de no mínimo 10 anos, e ainda após o seu encerramento o monitoramento de lixiviados deve permanecer por 20 anos, ou até que se prove que encerrou a produção de líquidos provenientes do maciço. Por isso, com as conseqüentes mudanças e a dificuldade de se implantar cada vez novos centros de disposição, existe a preocupação e a necessidade de

se manter um controle adequado para prolongar cada vez mais a vida útil desses centros, por isso o monitoramento geotécnico se torna indispensável.

Em relação ao modelo de acondicionamento, existe uma diretriz recomendada pela ABNT NBR 8419:1997, “ressalta que para o aproveitamento cada vez maior dos espaços, deve primordialmente realizar o empilhamento de camadas de resíduos, havendo a otimização do espaço, e principalmente reduzindo-os dos de implantação e operação.” (ABNT,1997).

Em contrapartida para se altear resíduos por camadas, necessariamente deve-se haver o compromisso de que a massa empilhada será estabilizada por longos anos, por isso o uso de instrumentação geotécnicas é essencial para acompanhar:

- I. Deslocamentos verticais (recalques) e horizontais (afastamentos) – uso de marcos superficiais;
- II. Poro pressões de líquidos e gases – pressões neutras – uso de piezômetros;
- III. Acompanhamento da estabilidade de diques de disparo – inclinômetros e marcos superficiais instalados no dique;
- IV. Inspeções com observações de não conformidades como trincas, afundamentos, erosões, resíduo exposto, vetores – visitas periódicas nas unidades.

Com a obtenção dos dados gerados por cada um desses instrumentos e ou acompanhamento de campo, é possível realizar a correlacionar as informações, sendo possível traçar os cenários estabilidade da massa de resíduo, e conjuntamente traçar planos de ações que visem recuperar, bem como intervir em regiões com estabilidade geotécnica fragilizada.

Diante da breve análise da necessidade do acompanhamento geotécnico dos aterros sanitários, pode se dizer que um parâmetro fundamental a ser acompanhado relaciona-se às medições de poropressões dos maciços, haja vista que, estes estão atrelados diretamente a dados de geração de líquidos percolados e gases gerados pela decomposição da matéria orgânica.

Dessa forma, o atual trabalho vem especificamente apresentar um estudo de caso, relacionado a um novo modelo de piezômetro desenvolvido e estudado pela equipe técnica da empresa Estre Ambiental, na tentativa de aprimorar o acompanhamento dos dados de poropressão, tão importantes tecnicamente para os atuais aterros sanitários implantados.

2.3. Piezômetros

Para este artigo, iremos abordar uma das principais ferramentas de monitoramento geotécnico, que é o Piezômetro. Através do estudo científico, podemos definir que os piezômetros (ou coluna piezométrica) são instrumentos de medição usados para o monitoramento e leitura de pressão hidráulica em seu local de instalação (NÓBREGA, 2017).

São classificados como manômetros (ferramentas para aferir pressão) e por serem instrumentos robustos, simples de manusear, com baixo custo e altamente duráveis, acabam por serem os mais utilizados no ambiente da engenharia para análise de carga de subpressões e poropressões dentro do solo, em nosso caso de estudo, o aterro sanitário.

De acordo com Nóbrega et al. (2008), os piezômetros são bastante utilizados no âmbito da engenharia para o monitoramento de poropressões. São instrumentos dos mais confiáveis para a mensuração das subpressões ou poropressões, em barragens de terra, em virtude de sua simplicidade, do seu custo moderado e da sua durabilidade (CASTRO, 2008).

Piezômetros Segundo Nóbrega (2017), é comum utilizar-se de piezômetros para aferir a pressão hidráulica no ponto em que são instalados. Antoniutti Neto, Val e Abreu (1995), relatam ainda que deve ser prevista a instalação de piezômetros com o intuito de analisar as poropressões dos líquidos e gases no interior dos maciços sanitários, subsidiando dessa forma, o diagnóstico da estabilidade dos aterros sanitários.

Segundo BRUNETTI (2008), a Coluna piezométrica consiste num simples tubo de vidro que, ligado ao reservatório, permite medir diretamente a carga de pressão. Logo, dado o peso específico do fluido, pode-se determinar a pressão diretamente.

O piezômetro apresenta três defeitos que o tornam de uso limitado:

- I. A altura, para pressões elevadas e para líquidos de baixo peso específico, será muito alta.

Exemplo: água com pressão de 105 N/m^2 e cujo peso específico seja 104 N/m^3 formará uma coluna $h=p/\gamma=105/104=10\text{m}$.

Logo, não sendo viável a instalação de um tubo de vidro com mais de 10 m de altura, o piezômetro não pode, nesse caso, ser útil. Nota-se então que esse aparelho só serve para pequenas pressões.

- II. Não se pode medir pressão de gases em espaço aberto, pois eles escapam sem formar a coluna h .

- III. Não se pode medir pressões efetivas negativas, pois nesse caso haverá entrada de ar para o reservatório, em vez de haver a formação da coluna h.

2.3.1. Modelo *Standpipe*

Com a necessidade de monitorar a pressão ocasionada pelos gases e líquidos (lixiviados) presentes nos aterros, foram criados equipamentos capazes de tais medições. O mais simples deles foi o piezômetro do tipo *standpipe*, que são chamados também de Casagrande.

Esse modelo consiste, basicamente, na perfuração do maciço, até a área de interesse, inserindo um tubo de PVC com um bulbo revestido de uma tela geotêxtil, onde o líquido pode percorrer, ao redor do bulbo é colocado areia e o restante da perfuração é preenchida com solo. (CARVALHO, 2007)

Sua leitura é feita através de um equipamento chamado “pio”, que nada mais é do que uma trena com um sensor eletrônico na ponta, que em contato com líquido emite um som, com isso, é colocado esse pio no tubo PVC, e medida a altura de percolado nele, quando o som for emitido. Como é conhecido a profundidade do tubo, com a medida que extraímos do pio conseguimos saber qual o nível de lixiviado naquela região do aterro. (COUTINHO et al., 2008)

Porém, além do percolado, o maciço gera biogás, que também precisa ser medido, e esse modelo de piezômetro não abrange essa leitura. Outro problema que ocorre com o *standpipe* é que por conta do biogás gerado, é causado um “borbulhamento” que pode gerar espuma e jatos de percolado, que podem comprometer uma leitura confiável do equipamento, já que o sensor dispara em contato com líquido, causando um falso nível de chorume (CEPOLLINA et al, 2004).

2.3.2. Modelo *Vector*

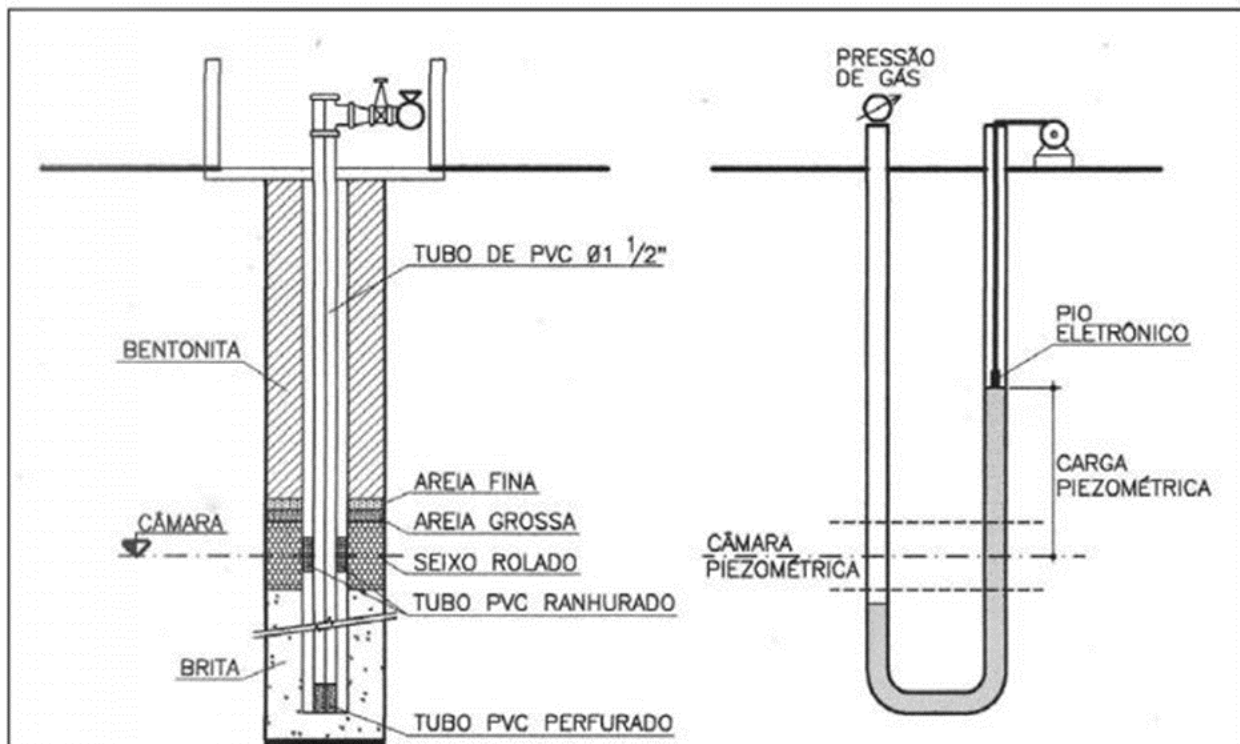
Como uma forma de corrigir alguns problemas técnicos que foram encontrados no modelo apresentado anteriormente, surgiu um novo modelo de piezômetro, chamado “Vector” (DO VAL & ANTONIUTTI, 1994).

Esse tipo de equipamento, também conhecido como sifonado, funciona com dois tubos concêntricos, que permitem que a parte gasosa e líquida seja separada. Dessa forma, além de solucionar o problema da espuma criada pelo biogás, ele possibilita a leitura de líquido e gases, separadamente (FIGURA 2).

Quando o sifão é preenchido pelo percolado, ele permite que seja feita a leitura do biogás presente naquela célula piezométrica e do chorume, pelo tubo interno, por vasos

comunicantes, sem que haja a interferência de líquido e do gás misturados. A pressão do percolado é medida, através do “pio”, quando aberto o tubo externo (GONÇALVES et al, 2004).

Figura 2 - Piezômetro Vector e detalhe de funcionamento



Fonte: Cepollina, (2004)

2.3.3. Modelo elétrico (corda vibrante)

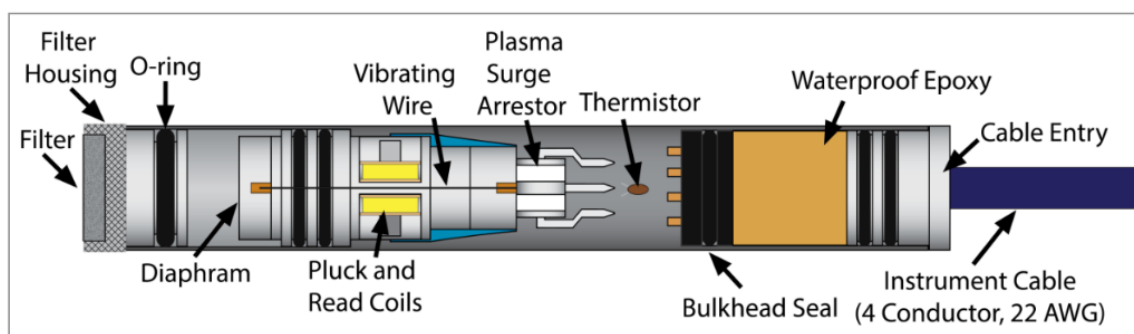
O piezômetro elétrico, também chamado de piezômetros de corda vibrante, possui um sistema de leitura diferente dos outros dois apresentados. Nesse modelo, a leitura exibe resultados imediatos, que podem ser transmitidos online, para sistemas de tratamento de dados. Ele consegue ler as poropressões, não distinguindo a pressão de gás e líquido.

No geral, este piezômetro tende a ser mais caro que os outros modelos, por se tratar de um equipamento que só é fabricado no exterior, e ser uma tecnologia mais complexa, que necessita tanto do equipamento, quanto da leitora eletrônica. (BENVENUTO et al, 2016).

O piezômetro elétrico funciona da seguinte forma: a pressão do lixiviado é transmitida através da pedra porosa para um diafragma interno, no qual a deflexão é calculada por um transdutor de corda vibrante, que fica instalado perpendicularmente ao plano do diafragma.

Hoje, podemos encontrar esses equipamentos sendo amplamente utilizados em barragens e aterros sanitários, por possuírem alta sensibilidade e por possibilitar a leitura a distância.

Figura 3 - Modelo 4500S Piezômetro corda vibrante



Fonte: Geokon (2019)

3. METODOLOGIA

O presente artigo possui sobretudo uma vertente bibliográfica, porém bem alinhada a aspectos de cunho prático, e tem por fundamentação avaliar dados reais de piezômetros dos modelos vector, elétrico e do protótipo (vector elétrico), disponibilizados pela empresa Estre Ambiental, de uma de suas unidades de gerenciamento, localizadas em Guatapará, município pertencente a região Metropolitana de Ribeirão Preto.

Para tanto como forma de concretizar a o referencial teórico, o grupo buscou focar nos seguintes questionamentos para o estudo:

- I. Qual a importância do uso de piezômetros para os aterros sanitários, e onde os dados fornecidos por esses instrumentos podem ser usados?
- II. Quais os principais piezômetros utilizados nos aterros sanitários do Brasil?
- III. Pesquisa detalhada do método construtivo de cada um dos modelos;
- IV. Método para leitura de cada um dos modelos, e quais os dados fornecidos por cada um destes.

Após a consolidação dos dados bibliográficos o grupo de pesquisa, passou para etapa de avaliação do modelo conceitual implantado no CGR (centro de gerenciamento de resíduos) Guatapará avaliando:

- I. Como foi realizado o método de comparativo entre os piezômetros do tipo elétrico, vector e protótipo vector elétrico;
- II. Como foi fundamentado o desenvolvimento técnico científico para a realização do protótipo

- III. Quais são os resultados iniciais do estudo;
- IV. Quais são as próximas etapas de desenvolvimento para consolidação do modelo;

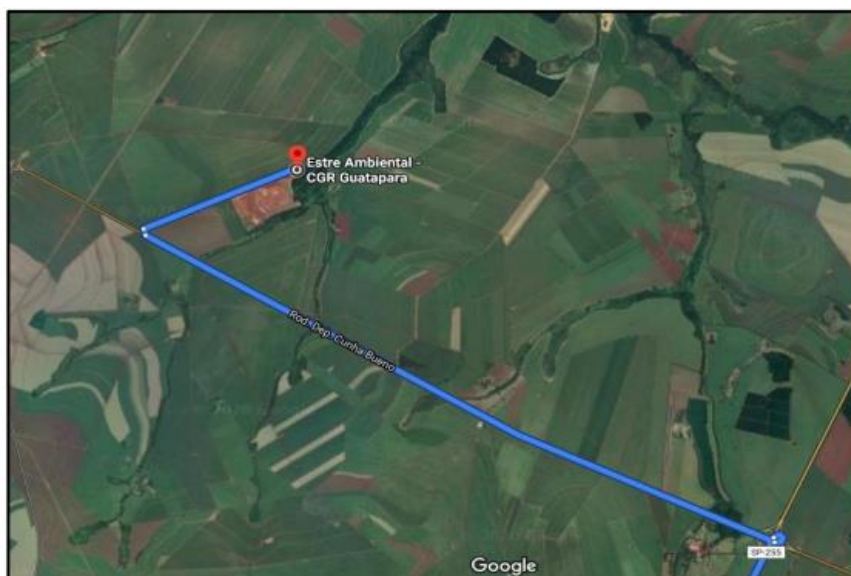
Diante disso, foram apresentadas as informações dos levantamentos realizados em campo pela equipe técnica do CGR Guatapar, referente às leituras dos piezômetros vector, elétrico e protótipo, e os comparando de maneira organizada a fim de atingir os objetivos específicos deste trabalho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Localizao e Informaes do empreendimento

Este empreendimento, localizado na cidade de Guatapar, a sudoeste do município de Ribeirão Preto (Figura 4 e Figura 5), encontra-se em operao desde 2006.

Figura 4 - Vias de acesso para o empreendimento



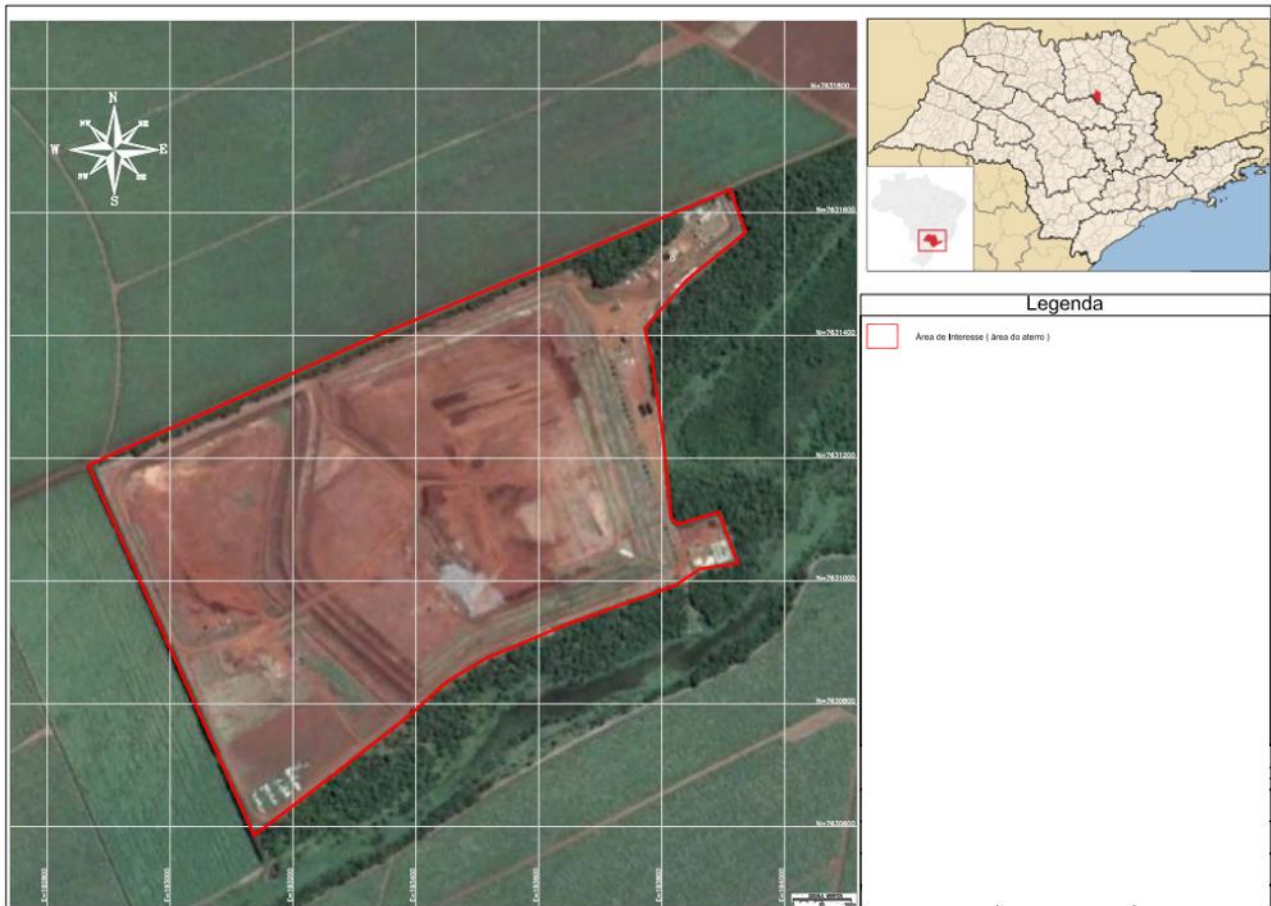
Fonte: Grupo Estre, 2021

Tabela 1 - Levantamento e *status* dos piezômetros instalados na Estre

Razão Social	Estre Ambiental S/A
C.N.P.J.	08.463.831/0001-01
Empreendimento	CGR Guatapar - Centro de Gerenciamento de Resíduos Ltda.
Localizao	Rodovia SP 253, Km 183, zona rural, 14115-000
Município	Guatapar/SP

Fonte: Grupo Estre, 2021

Figura 5 – Visualização do empreendimento



Fonte: Grupo Estre, 2021

4.2. Planejamento e desenvolvimento para criação do protótipo

Como visto durante o tópico de revisão bibliográfica deste relatório, foi apresentado as motivações fundamentais para que os aterros sanitários sejam bem instrumentados e que, principalmente, resultem em dados de campo confiáveis para serem usadas para análise da estabilidade geotécnica do aterro sanitário.

Diante disso, como foco de estudar o modelo desenvolvido em 2020 pela Estre Ambiental, ficou evidente através da coleta de dados de campo, que o intuito da criação do modelo intitulado de piezômetro vector elétrico, tem por objetivos principais atender os seguintes objetivos:

- I. Automatização das leituras;
- II. Instrumentos que realize a separação entre líquido e gás;
- III. Resistência e durabilidade dos instrumentos.

A motivação pelo desenvolvimento deste protótipo se deve principalmente a situações observadas nos piezômetros das unidades pertencentes ao grupo Estre, do qual

desde as primeiras instalações de piezômetros (optando-se na época por piezômetros do tipo vector) sofreu-se com quebra nesses instrumentos em períodos próximos a 6 meses após a suas instalações, não sendo um período satisfatório para acompanhamento das pressões internas registradas nesses equipamentos.

Dessa forma foi estudado um novo modelo pela equipe técnica da Estre durante o início de 2018, seguindo a premissa de que o instrumento a ser instalado deveria ser durável, bem como possibilitar um processo de automação das leituras, evitando-se erros humanos, ocorridos nesse caso nos piezômetros do tipo vector, além da importância de se considerar um modelo com facilidade de se alrear devido o avanço das operações no maciço, evitando sua quebra.

O modelo escolhido e adotado desde então, refere-se a piezômetros do tipo elétrico (corda vibrante), do qual possibilita medir as poropressões locais, não havendo a distinção entre gases de lixiviados.

Em relação a perspectiva de durabilidade dos piezômetros elétricos foi feito um levantamento dos instrumentos instalados na Estre, podendo ser verificado na Tabela 2.

Tabela 2 - Levantamento e *status* dos piezômetros instalados na Estre

Tipo	Quantidade Piezômetros Instalados	Inoperante	% perda
Elétrico	74	4	5%
Vector	47	8	17%
Casagrande	6	2	33%

Fonte: Grupo Estre, 2021

Diante de toda a evolução cronológica apresentada a equipe técnica da Estre juntamente com um comitê de consultores parceiros e profissionais técnicos das empresas G5 Engenharia (representante comercial da GEOKON) e a Helicebras (empresa especializada em perfuração e instalação de instrumentos geotécnicos), deram início a um projeto de piezômetro que mesclassem o piezômetro vector (devido a possibilidade de realizar medições separadas de líquido e gás, requisito importante para monitoramento dos aterros sanitários), com o piezômetro elétrico (nesse caso, com o intuito de proporcionar uma maior durabilidade do equipamento, como também pela possibilidade de automatização das leituras).

4.3. Modelo Conceitual, Componentes Utilizados, Instalação de Campo

4.3.1 Planejamento e desenvolvimento do modelo conceitual

Como observado no tópico acima o modelo desenvolvido para criação do protótipo vector elétrico baseou-se em unir dois modelos de piezômetros, que contém algumas restrições técnicas entre eles, para desenvolvimento de um modelo que trouxesse todas as necessidades técnicas, já discutidas neste relatório, em um único instrumento.

Com isso como forma de embasar o estudo e realizar o entendimento da composição do modelo estudado, foi realizado uma entrevista com os funcionários responsáveis pela implementação do modelo, para que fossem respondidos certos questionamentos acerca das etapas de desenvolvimento do protótipo, além da solicitação para composição do relatório das etapas de instalação em campo.

Para entendimento da elaboração do modelo conceitual, a entrevista realizada, contou com as seguintes perguntas e respostas:

A. Qual modelo de tubo utilizado para confecção das câmaras interna e externa, pensando em relação a durabilidade?

Usualmente para confecção de piezômetros do tipo vector, o uso de PVC (marrom) é frequentemente usado, devido sua facilidade de se encontrar nas diversas lojas de materiais hidráulicos, bem como pelo custo-benefício, além de possuir uma gama de conexões mais apropriadas para desenvolvimento de piezômetros. Entretanto como observado na Estre sua durabilidade em regiões com grandes deslocamentos anuais, acabam diminuindo sua vida útil.

Dessa forma, para definição de um modelo de tubo mais resistente, foi preciso identificar um tipo que fosse adequado para suportar as constantes movimentações ocorridas no maciço de resíduos, como também em relação as temperaturas internas. Como escolha, foi adotado o tubo industrial Schedule 80, que se trata de um PVC mais reforçado, e que por característica suporta maiores pressões além de reagir melhor ao aumento de temperatura. É sabido que empresas operadoras de aterros e consultores geotécnicos utilizam os convencionais tubos de PEAD e PP, principalmente para drenagem de chorume. A vantagem está em relação a aguentar mais os raios UV, porém o custo é elevado.

B. Para as medições de gás e lixiviado, como foram planejadas pensando no processo de automatização?

Nesse sentido com apoio da G5 Instrumentos, foi verificado que ambas as medições poderiam ser realizadas utilizando sensores específicos para cada caso, podendo ser visto com mais detalhe na Figura 5

Figura 5 - Sensor de pressão interna (esq.) e Sensor de gás (dir.)



Fonte: Autores, 2021

C. Qual a metodologia utilizada para comparação dos dados fornecidos pelo protótipo, em relação aos demais instrumentos?

Para comparativo dos dados obtidos pelo protótipo vector/elétrico, foi realizado a instalação de um vector convencional, devidamente alinhados com mesma profundidade saliência, câmara de carga e utilizando os mesmos materiais de preenchimento.

Figura 6 - Modelo Vector convencional (esq.) e Protótipo Vector/Elétrico (dir.)



Fonte: Autores, 2021

D. Como foi a escolha da válvula de gás utilizada para encaixe do sensor utilizado na medição

Pelo fato de o sensor de gás possuir um sistema rosca de encaixe, foi necessário adaptar a válvula esfera, comum em piezômetros vector para medição de gás, com um *niple* de alumínio com redução de $\frac{3}{4}$ " para $\frac{1}{4}$ ", para realização do encaixe do sensor 4500H da Geokon.

Figura 7 - Válvula esférica para medição de gás, com plug metálico para encaixe do sensor de gás



Fonte: Autores, 2021

E. Como foi realizado a fixação da altura do sensor por dentro da câmara de carga para medição da coluna de lixiviado?

Para instalação do sensor responsável por realizar as medições de pressão interna na região do piezômetro, isto é, pressão considerando lixiviado e gás exercido sobre a pedra porosa do sensor, foi necessário realizar uma adaptação, do qual dentro da câmara interna (Tubo com diâmetro de $1 \frac{1}{2}$ ") foi introduzido uma tubulação de $\frac{3}{4}$ " de polegada, fixando o sensor a uma profundidade de 17 metros.

Para evitar que o piezômetro acabasse descendo por dentro da câmara (visto que está a 2,50 metros do fundo), foi adaptado um fixador encaixado no cabeçote, além de ser realizado a marcação exata em 17 metros, para conferência visual, conforme pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 - Fixador sensor elétrico com aço inoxidável (esq.), Tubo encaixado e detalhe de funcionamento do fixador (dir.)

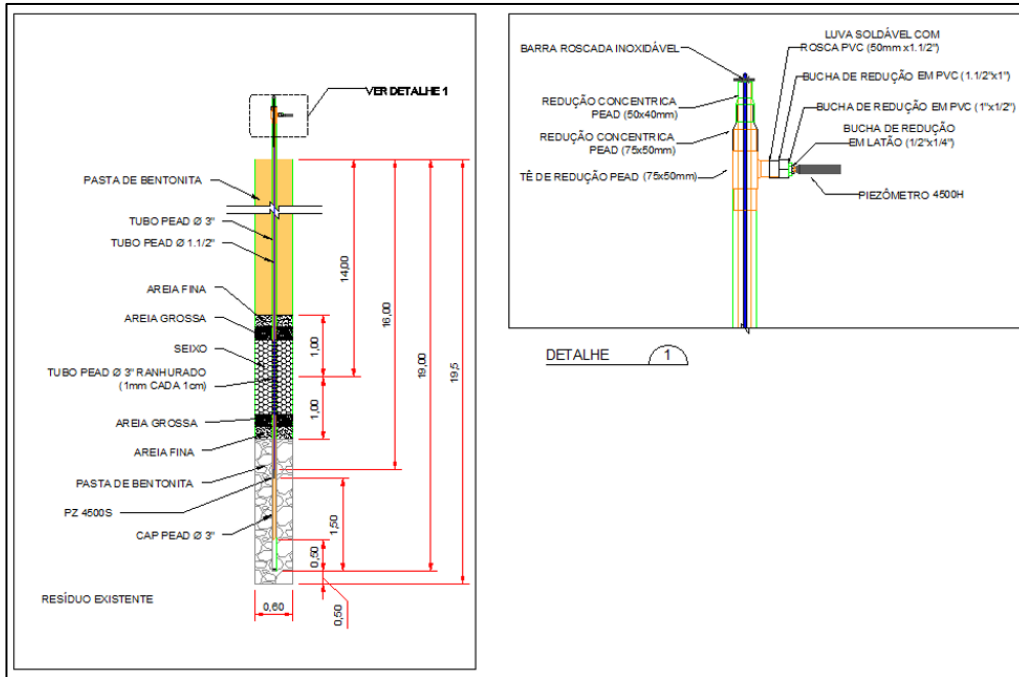


Fonte: Autores, 2021

F. Qual o intuito da elaboração dos croquis e detalhamento de cada um dos modelos de piezômetros instalados para comparativos. Eles foram usados para registros futuros da instalação? Ou foram evoluindo com o passar da melhoria do modelo conceitual?

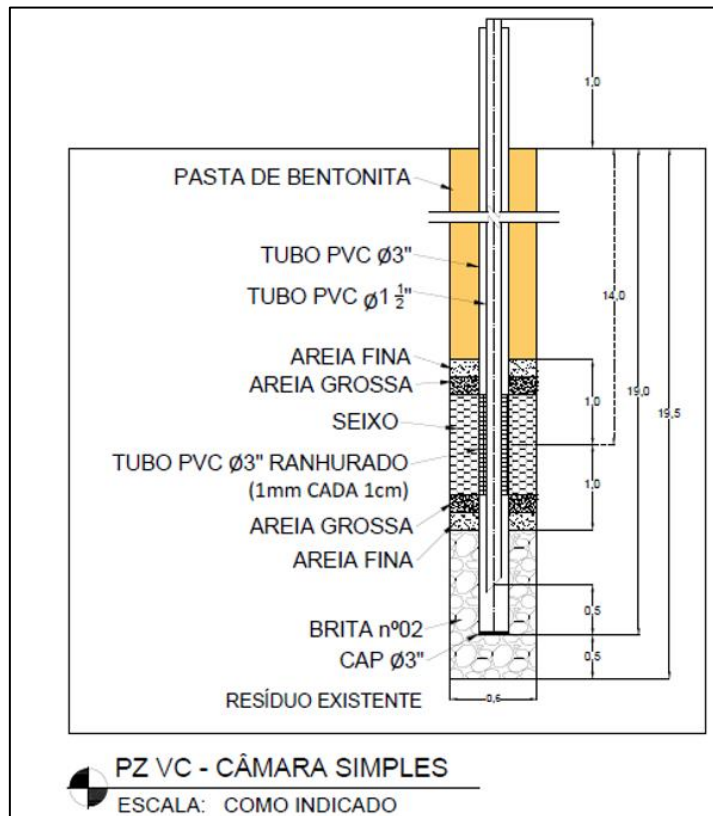
O croqui desenvolvido foi realizado com o intuito de orientar e nortear a equipe operacional e técnica no momento da instalação, identificar qual o quantitativo de cada material a ser utilizado, qual a altura exata de preenchimento de cada material, além de indicar profundidade total de perfuração e da câmara de carga. Dessa forma o modelo desenvolvido (protótipo), como também o croqui do vector convencional, pode ser visto com mais detalhe na Figura 9 e Figura 10.

Figura 9 - Modelo Vector/Elétrico - detalhamento preenchimento



Fonte: Grupo Estre, 2021

Figura 10 - Modelo Vector Convencional - detalhamento preenchimento



Fonte: Grupo Estre, 2021

4.3.1 Detalhamento da instalação de campo

A instalação do piezômetro vector elétrico (protótipo) foi iniciada no dia 09 de novembro de 2021, sendo dividido em duas partes: no período da manhã a equipe de perfuração realizou o preparativo dos materiais de instalação, sendo executado a ranhura do tubo, colagem do cap e realização da proteção com tela telcon (conforme pode ser visto na Figura 11), além de realizarem o posicionamento da máquina no local de perfuração. No período da tarde, foi dado início a perfuração, sendo concluído 10 metros (Figura 12).

Figura 11 - Etapas de montagem – 1. Realização de Ranhura, 2. Colagem de cap (vedação do tubo) e 3. Ranhura protegida com tela telcon branca.



Fonte: Grupo Estre, 2021

Figura 12 – Perfuração piezômetro vector elétrico (esq.) e Retirada dos trados pós perfuração (dir.)



Fonte: Grupo Estre, 2021

No dia 10 de novembro, com a finalização da perfuração e a retirada dos trados, foi realizado a instalação do tubo externo (schedule 80 de 3”), e dado o acabamento inicial, conforme pode ser visto na Figura 13.

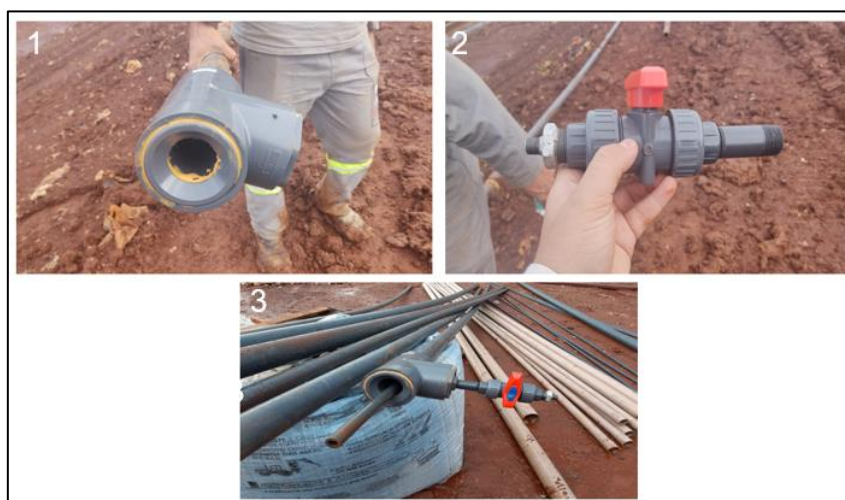
Figura 13 - Etapas de montagem – 1. Colocação do tubo externo (3”), 3. Conferência de profundidade sendo realizada e 3. Instalação Tubo externo instalado, e apresentação de distância do vector convencional.



Fonte: Grupo Estre, 2021

No dia 11 de novembro, com a instalação do tubo externo, a equipe de perfuração deu andamento a instalação da camara interna, para leitura de percolado, bem como a instalação do cabeçote e válvula esferica, utilizados para leitura de gás. A ilustração de cada componente e forma de instalação pode ser visto nas Figura 14 e Figura 15.

Figura 14 - Etapas de montagem – 1. Colocação do tubo externo (3”), 3. Conferência de profundidade sendo realizada e 3. Instalação Tubo externo instalado, e apresentação de distância do vector convencional.



Fonte: Grupo Estre, 2021

Figura 15 - Etapas de montagem – 1. Cabeçote montado, 2. Válvula esfera com plug metálico utilizado para leitura de gás para o piezômetro protótipo e 3. Apresentação de cabeçote válvula e tubo de ¾ interno que ficará com o sensor de nível Geokon



Fonte: Grupo Estre, 2021

Para conclusão da instalação, no dia 12 de novembro, foi realizado a colocação do sensor elétrico, posicionado na profundidade de 17,0 metros, como também do sensor de gás, fixado na válvula esférica para coletar os dados de pressão de gás no piezometro.

Além disso para evitar que o tubo do sensor elétrico caia ou mude de profundidade, foi realizado uma adaptação com rosca inoxidável, do qual foi fixada na extremidade de 1½” do cabeçote. Os acabamentos finais para finalização da instalação do piezometro vector/elétrico pode ser visto na Figura 16.

Figura 16 - Etapas de montagem – 1. Sensor elétrico instalado, 2. Medição inicial do sensor, antes da instalação 3. Apresentação de peça adaptada para fixação do tubo do sensor elétrico 4. Piezômetro vector elétrico devidamente finalizado.



Fonte: Grupo Estre, 2021

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Levando em consideração a complexidade que o monitoramento geotécnico tem atualmente para os aterros sanitários, é de extrema importância que novas pesquisas a respeito do aperfeiçoamento de instrumentos como o piezômetro vector elétrico apresentados nesse trabalho, justamente para que seja possível ter cada vez mais o entendimento do comportamento geotécnico dos maciços de resíduos, haja vista que, diferentemente do solo, são estruturas extremamente heterogêneas, não sendo possível entender seu comportamento de movimentação por completo.

Deste modo, este artigo objetivou apresentar a importância do monitoramento geotécnico para os aterros sanitários, além de apresentar um estudo de caso avaliando um novo modelo de piezômetro, denominado de vector elétrico, do qual foi instalado no centro de gerenciamento de resíduos da Estre Ambiental, localizado em Guatapar (CGR Guatapar), pertencente a região metropolitana de Ribeirão Preto

Este estudo com um viés bem prático, voltando para análise do estudo de caso, também possui cunho bibliográfico, o qual foi elaborado a partir de materiais já publicados em plataformas de pesquisas academicamente relevantes, como teses, monografias, dissertaoes e outros materiais disponíveis na internet. Diante do vasto número de artigos publicados que discorrem sobre o tema de monitoramento geotécnico e também acerca do estudo e da importância do uso de piezômetros para o monitoramento de poropressões em aterros sanitários, foi possível realizar a compreensão teorica sobre os temas, possibilitando ao grupo realizar uma análise sistemática sobre o estudo de caso.

Ainda que tenha sido um desafio selecionar textos relevantes para a construao deste trabalho seguindo o tema proposto, muito se é falado sobre o uso de piezômetros para medioes de poropressão nos aterros sanitário, dada a importância desses dados para gestão dos atuais centros de tratamento de resíduos sólidos urbanos.

A correta interpretaao dos resultados desses instrumentos pode gerar avaliaoes acerca do maciço, principalmente relacionadas as drenagens de chorume e gás de forma local, sendo possível averiguar se existe algum problema pontual na rede ou até se há necessidade de melhorar a rede atual. Visto que o aumento de poropressão no maciço é totalmente indesejado, para o que diz respeito ao bom equilíbrio geotécnico os maciços de resíduos. A respeito da analise realizada pelo grupo sobre o funcionamento do modelo protótipo estudado, e o comparativo entre os modelos de piezometros existentes no CGR Guatapar foi possível ter um histórico de leituras de Pressão de Gás, Pressão de Chorume (com e sem a influência do gás), disponível na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados Iniciais de comparativos entre as medições de pressão de coluna de chorume e gás entre os piezômetros

COMPARATIVO ENTRE PIEZOMETROS - PROTÓTIPO X VECTOR CONVENCIONAL - PRESSÃO (mca)													
DATA	Registro Fechado			Diferença Prototipo x Vector (m)	Variação (%)	Registro Aberto		Diferença Prototipo x Vector (m)	Variação (%)	Registro de gás		Diferença Prototipo x Vector (m)	Variação (%)
	Protótipo	Vector Convencional	Piezometro elétrico			Protótipo	Vector Convencional			Protótipo	Vector Convencional		
	Pressão de chorume (mca)					Pressão de chorume (mca)				Pressão de gás (mca)			
20/12/2021	3,78	3,53	-	0,25	6,55%	2,91	3,03	-0,12	4,11%	1,71	2,07	-0,37	17,65%
21/12/2021	3,83	3,53	2,77	0,30	7,82%	3,03	3,30	-0,27	8,10%	1,67	1,24	0,43	25,84%
22/12/2021	3,83	3,58	-	0,25	6,49%	2,99	3,03	-0,04	1,23%	1,66	2,06	-0,40	19,37%
27/12/2021	3,68	3,48	-	0,20	5,55%	2,77	2,92	-0,15	5,05%	1,65	2,11	-0,45	21,59%
31/12/2021	3,74	3,41	2,75	0,33	8,79%	2,80	2,63	0,17	6,10%	1,55	2,19	-0,64	29,16%
06/01/2022	3,75	3,33	2,65	0,42	11,11%	2,79	2,28	0,51	18,29%	1,69	2,16	-0,47	21,69%
13/01/2022	3,77	3,35	2,65	0,42	11,24%	2,86	2,30	0,56	19,64%	1,74	2,17	-0,43	19,73%
17/01/2022	3,78	3,03	-	0,75	19,89%	2,90	3,03	-0,13	4,33%	1,74	2,17	-0,43	20,01%
19/01/2022	3,82	3,28	-	0,54	14,16%	2,94	2,38	0,56	19,14%	1,72	2,02	-0,30	14,88%
21/01/2022	3,78	3,23	2,64	0,55	14,53%	2,89	2,25	0,64	22,13%	1,72	2,13	-0,42	19,57%
25/01/2022	3,78	3,13	2,55	0,65	17,25%	2,75	2,69	0,06	2,25%	1,73	1,46	0,27	15,47%
26/01/2022	3,78	3,28	2,80	0,50	13,28%	3,05	2,38	0,67	22,01%	1,73	2,01	-0,28	13,91%
27/01/2022	3,80	3,33	2,53	0,47	12,40%	3,09	2,38	0,71	22,99%	1,69	2,08	-0,40	18,99%
04/02/2022	3,71	2,75	3,69	0,96	25,91%	2,98	1,13	1,85	62,08%	1,69	2,19	-0,50	22,81%
09/02/2022	3,67	2,98	2,67	0,69	18,77%	2,99	1,23	1,76	58,85%	1,66	2,03	-0,37	18,38%
16/02/2022	3,66	2,93	2,72	0,73	19,85%	3,01	1,08	1,93	64,09%	1,58	2,09	-0,51	24,21%
Média de Pressão	3,71	3,43	2,76	0,28	7,66%	2,90	2,51	0,39	13,44%	1,66	2,01	-0,35	17,23%

Embora os resultados tenham apresentado desvios percentuais bem significativos em relação aos valores de pressão de chorume, os resultados esperados entre o prototipo e o vector convencional, estão dentro da ordem de grandeza que o grupo esperava, haja vista a heterogeneidade do meio onde esses instrumentos estão instalados pode variar o recarregamento hidráulico de forma diferente.

Os resultados em média para registro fechado (considerando a influencia do gás no sistema), foi de menos que 30 centímetros, valor que pode estar muitas vezes atrelado ao sistema de carregamento hidráulico local, ou até mesmo por influência da variação de pressão de gás no piezômetro, fazendo com que o carregamento de chorume no tubo interno seja mais lento.

Em relação as variações observadas no registro aberto e no comparativo das medições da pressão de gás observado em cada um dos instrumentos, a justificativa encontrada pelo grupo, está na relação do método construtivo de cada modelo. A variação de diâmetros das válvula de medição de gás entre os modelos vector e protótipo são diferentes, sendo que a saída do vector elétrico, por possuir uma redução do tipo *Niple* pode estar gerando uma retenção de gás no sistema de vasos comunicantes do piezômetro, além do fato devido a necessidade de manter acoplado o sensor elétrico, não se consegue, de forma imediata liberar o gás do sistema, diferentemente do que se realiza no modelo vector convencional, do qual para medição o uso do manômetro é pontual no ato da leitura, e além disso não se possui nenhum tipo de redução de válvula no cabeçote.

Embora os resultados estudados tenham ficado com uma margem de diferença (em %) relativamente elevada, o que se percebe nos resultados numéricos, são valores médios ficando em torno de 30 centímetros na correlação, que dificilmente causaria alguma influência em futuras análises utilizando esses dados, dado que a diferença de altura da coluna de chorume em comparação com a altura da massa de residuos desses maciços, torna a diferença praticamente irrisória do ponto de vista analítico.

Outro ponto de vista importante a ser observado, foi que através das visitas de campo realizadas durante o mês de setembro de 2022 foi possível obter um registro da durabilidade do instrumento protótipo em comparação ao vector convencional, do qual ao longo de quase um ano após a instalação, o mesmo continua de maneira intacta, sem avarias em relação a ressecamentos do tubo, geralmente ocasionados pela incidência dos raios UV, além de não apresentar deformidade na estrutura externa e interna (profundidade total e seção do tubo em perfeito estado), sendo possível ver nas Figura 17 e Figura 18.

Figura 17 – Piezômetro protótipo vector elétrico durante visita técnica realizada em setembro de 2022 (



Fonte: Autores,2022

Figura 18 – Piezômetro vector convencional visita técnica realizada em setembro de 2022 (avarias de ressecamento do tubo de PVC)



Fonte: Autores,2022

Dessa forma, é possível concluir que a utilização do Tubo Schedule 80, tem sido um fator preponderante para manter as boas condições do instrumento, como foi possível notar certas condições de ressecamento no tubo de pvc do vector convencional. Fato esse que corrobora com o apontado já neste trabalho, do qual a taxa de perda de piezômetros do tipo vector na empresa estudada era de 17% (mais comuns nos aterros sanitários pela possibilidade de se obter as pressões de líquidos percolados e gás, de forma separada), e os elétricos que eram de 5% de perda (porém ineficaz para o propósito de dados do instrumento, do qual só é possível medir pressão da coluna de choro).

Dessa forma o grupo conclui as seguintes condições, baseadas nos dados coletados para formulação do trabalho.

- I. Em relação a durabilidade entre os tipos de piezômetros, o prototipo vem apresentando excelentes resultados, principalmente comparando-se com o modelo vector convencional;
- II. Em relação as desvantagens do prototipo, pode-se apresentar a válvula de redução no cabeçote de medição de gás, que pode estar sendo preponderante para a retenção de gás no instrumento, quando a válvula é aberta;
- III. Em relação as vantagens principais do instrumentos se tem: maior durabilidade, processo automatizado de medição, visto que em ambas as medidas são utilizados sensores elétricos bem mais precisos do que a medição humana.

A titulo de conclusão e recomendações, pelo processo de coleta ter sido baseado em visitas de campo, entrevistas e busca ativa em referencias bibliograficas ao tema, como ponto de contribuição do grupo para futuros trabalhos recomenda-se as seguintes propostas de acrescimo no estudo.

Para avaliação da influência da válvula de redução no cabeçote de gás, dois estudos podem ser realizados :

Primeiro um teste de bancada com ar comprimido simulando a saída de gás com e sem a válvula de redução, efetuando os devidos cálculos de perda de carga para essa metodologia,

Em um segundo teste efetuar uma adaptação com um “tê”, sendo possivel medir a pressão de gás com o sensor de gás (na válvula de redução) e com manometro na saída originada pela instalação do “tê”, sendo possivel também analisar a perda de carga pontual desse instrumento.

Por fim, embora seja necessário uma amostragem ainda maior em relação aos resultados obtidos inicialmente, sobre o novo modelo de piezômetro, o grupo conclui que os resultados são satisfatórios até o momento, principalmente nos quesitos de durabilidade e credibilidade de medição, já que o novo modelo é totalmente automatizado com sensores, sem relação de influência humana durante o processo de monitoramento, sendo esse um fator importantissimo a cerca da confiabilidade dos resultados.

6. AGRADECIMENTOS

Com a conclusão desse trabalho, é inegável o orgulho e o mais belo agradecimento a empresa Estre Ambiental pela confiança no desenvolvimento deste trabalho tão importante para o desenvolvimento acadêmico dos integrantes desse grupo.

Os responsáveis para que esse trabalho fosse concluído são inumeros, mas de forma singela o grupo gostaria de agradecer a toda a equipe técnica da Estre (setor de geotecnia), aos engenheiros da empresa Cepollina, bem como as empresas parceiras Helicebrás, G5 instrumentos e Eng Consultoria, fundamentais durante todo esse processo de construção do protótipo avaliado pelo grupo, o nosso muito obrigado.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTONIUTTI NETO, L.; VAL, E. C.; ABREU, R. C. Desempenho de Piezômetro Vector em aterro sanitário. Anais do III Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos, v. 2, p. 593-601, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8.419:1992**: Apresentação de projetos de aterros sanitários e resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 01 p.06.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 13896:1997**: Aterros de resíduos não perigosos -Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 09 p.

BENVENUTO, C. **Resíduos Sólidos Domiciliares em Pequenas Comunidades: Aspectos Construtivos e Ambientais: Vantagens e Desvantagens**. Anais... In: SEMINÁRIO SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS, 2., 2004, São Paulo. Anais... São Paulo: ABGE, 2004.

BENVENUTO, Clovis et al. Instrumentação Geotécnica e Monitoramento da Estabilidade de Aterros Sanitários. **Revista Limpeza Pública. Artigo técnico**, Minas Gerais, ed. 101, p. 22-23, 2019.

BENVENUTO, C.; CUNHA, M. A. Escorregamento em massa de lixo no aterro sanitário Bandeirantes em São Paulo. In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITO E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS, 2. 1991, Rio de Janeiro. Anais..., Rio de Janeiro: ABMS, 1991, v. 2, p.55-66.

BRASIL, **Lei nº 11.445/07**, de 05 de janeiro de 2007, dispõe sobre **Diretrizes Nacionais para o Saneamento Básico**. Brasil: Planalto Federal, [2007]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm

BRUNETTI, Franco Mecânica dos fluidos / Franco Brunetti. — 2. ed. rev. — São Paulo : Pearson Prentice Hall, 2008.

CEPOLLINA, Mario; KAIMOTO, Luis Sérgio Akira; MOTIDOME, Mario. **Monitoramento em Aterros Sanitários Durante a Operação: Desempenho Mecânico e Ambiental**. In: Seminário Sobre Resíduos Sólidos, 2004, São Paulo. Seminário. São Paulo: ABGE, 2004.

CARVALHO, Pedro de. **Estudo das condições de fluxo pela barragem de terra da margem esquerda de Itaipu**. 2007. 33p. Publicação acadêmica – Pontifícia universidade católica do rio de janeiro – PUC-Rio. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.pucRio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=11080@1> Acesso em: 27 set. 2022

CASTRO, L. V. P. de. Avaliação do comportamento do nível d'água em barragem c de contenção de rejeito alteada a montante. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

COUTINHO, Roberto Quental et al. **Elaboração das diretrizes para monitoramento**. 2008. 05p. Publicação acadêmica - Convênio prefeitura de Olinda – UFPE. Pernambuco. Disponível em: https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNPU/Biblioteca/ReabilitacaoAreasUrbanas/Olinda_Produto5_Elaboracao_Diretrizes_Monitoramento.pdf Acesso em: 27 set. 2022

GONÇALVES, Alexandre et al. **Monitoramento em aterros sanitários nas fases de encerramento e recuperação: Desempenho mecânico e ambiental**. In: Seminário Sobre Resíduos Sólidos, 2004, São Paulo. Seminário. São Paulo: ABGE, 2004.

NÓBREGA, B. M. A. Estudo de caso sobre a instrumentação geoambiental instalada no aterro sanitário no município de Campina Grande/PB. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.)

NÓBREGA, C. C.; FERREIRA, J. W. O.; ATHAYDE JR., G. B.; GADELHA, C. L.; COSTA, M. D. Monitoramento de chorume no antigo Lixão do Roger em João Pessoa – Paraíba – Brasil. In: SIMPOSIO IBEROAMERICANO DE INGENIERÍA DE RESIDUOS, 1., 2008, Castellón. Anais... Castellón: Redisa, 2008, p. 1-8.

SEADE, Fundação do Sistema Estadual de Análise de Dados. **Portal de estatísticas do Estado de São Paulo**. São Paulo, [2010]. Disponível em: <http://produtos.seade.gov.br/produtos/retratosdesp/view/index.php?indId=20&temald=1&oclid=1000>