

USO DO ARDUÍNO PARA AUTOMATIZAÇÃO DO ENSAIO DE SEDIMENTAÇÃO EM PROVETA USE OF ARDUINO FOR AUTOMATING THE SEDIMENTATION TEST IN A GRADUATED BEAKER

Fabrcio Thiengo VIEIRA¹; Rayra Millene Ribeiro LIMA²

1. Departamento de Engenharia Rural – Centro de Ciências Agrárias e Engenharias – Universidade Federal do Espírito Santo. Alto Universitário s/n – Alegre – ES. 29500-000.

E-mail: fabrcio.t.vieira@ufes.br

2. Departamento de Engenharia Rural – Centro de Ciências Agrárias e Engenharias – Universidade Federal do Espírito Santo. Alto Universitário s/n – Alegre – ES. 29500-000.

E-mail: rayra150798@gmail.com

RESUMO

A sedimentação é uma operação unitária capaz de isolar as fases sólida e líquida de uma suspensão em repouso. Dentre os métodos para projetar sedimentadores, estão os de Coe e Clevenger, Kynch, Biscaia Júnior, Roberts e Talmadge e Fitch, que necessitam do ensaio de proveta em batelada, indispensável para a construção da curva de sedimentação. A partir dessa curva, cada método apresenta suas peculiaridades e considerações para determinação das variáveis área, altura e diâmetro de um espessador contínuo. A coleta dos dados do teste de sedimentação é realizada de maneira manual, a partir de observações ao longo do tempo, da altura da interface sólido-líquido, e esse fator pode contribuir para que inconformidades e erros de leitura possam existir. Nesse sentido, este trabalho propõe uma configuração e metodologia do teste de proveta automatizado, utilizando sensores LDR (Light Dependent Resistor) acoplados ao Arduino para a coleta de dados e a biblioteca PySerial da linguagem Python para armazenamento. Para fins comparativos, o ensaio de proveta convencional foi executado e comparado aos dados coletados de forma automatizada, empregando-se a técnica de Kynch simplificada (Biscaia Júnior) para o dimensionamento de decantadores, obtendo similaridade entre as variáveis de projeto fornecidas pelos modelos convencional e automático.

Palavras-chave: Sedimentação; Arduino; Automatização; Python;

ABSTRACT

Sedimentation is a unit operation capable of isolating the solid and liquid phases of a suspension at rest. Among the methods for designing sedimentation tanks are those of Coe and Clevenger, Kynch, Biscaia Júnior, Roberts and Talmadge, and Fitch, which require batch settling tests, essential for constructing the sedimentation curve. From this curve, each method presents its peculiarities and considerations for determining the variables of area, height, and diameter of a continuous thickener. Data collection for the settling test is performed manually, based on observations over time of the height of the solid-liquid interface, and this factor may contribute to inconsistencies and reading errors. In this sense, this work proposes a configuration and methodology for automated settling tests using Light Dependent Resistor (LDR) sensors coupled with Arduino for data collection and the PySerial library of the Python language for storage. For comparative purposes, the conventional settling test was performed and compared to the data collected automatically, employing the simplified Kynch technique (Biscaia Júnior) for sizing settlers, achieving similarity between the design variables provided by the conventional and automated models.

Keywords: Sedimentation; Arduino; Automation; Python;

Recebimento dos originais: 01/03/2024.

Aceitação para publicação: 20/06/2024.

INTRODUÇÃO

O processo de sedimentação é uma operação unitária que utiliza a ação gravitacional, objetivando separar sólido e líquido a partir da diferença de suas respectivas densidades. Variáveis como concentração de sólidos e área disponível compõem, juntamente com densidade dos componentes, os principais parâmetros para o estudo de decantação. Suspensões muito concentradas assumem um comportamento muito peculiar, uma vez que tendem a assumir um perfil decrescente de velocidade, pois há maior chance das partículas descreverem trajetórias análogas e também há influência da resistência do fluido. Com relação à área disponível, tem-se que o “efeito de parede” é observado quando a área disponível é pequena, visto que as paredes funcionam como obstáculos para a decantação das partículas, desacelerando-as (FRANÇA; CASQUEIRA, 2007).

Sedimentadores, que também podem ser chamados de decantadores, espessadores e clarificadores, podem assumir diversas configurações, a depender do tipo de suspensão a ser tratada. Assumindo características como baixo custo e simplicidade operacional, esses equipamentos ganham destaque em diversos setores, como nas indústrias de alimentos, fármacos, química e beneficiamento de minério. Exemplos claros de aplicação desses instrumentos é no tratamento de diversos tipos de efluentes com alta concentração de partículas e também no tratamento de lamas obtidas nos processos de beneficiamento de minério (SOUZA, 2021).

Na atualidade, existem diversos métodos para projetar esse tipo de equipamento, visto que se trata de uma das operações mais antigas para separação sólido-líquido. O estudo de Coe e Clevenger (1916) consolidou-se e, em alguns casos, é empregado para o dimensionamento, especificamente quando considera-se que a velocidade de sedimentação é dependente da concentração e que não existem modificações nas propriedades da suspensão ao inseri-la em instrumentos de tamanhos variados (SOUSA, 2012). Coe e Clevenger serviram como apoio aos variados métodos mais tarde estabelecidos, como os métodos de Kynch, Roberts e Talmadge e Fitch. Uma característica comum a esses métodos, trata-se da necessidade de teste em escala laboratorial, chamado de teste (ou ensaio) de proveta, crucial para construções gráficas responsáveis por modular todo o projeto de decantadores (GUIMARÃES, 2010).

Comumente, os dados coletados em laboratório são realizados de maneira manual, a partir da observação da altura da interface sólido-líquido no decorrer do tempo, o que pode contribuir para a interferências no dimensionamento, a depender do operador do teste. A automatização de processos industriais possibilita, desde o século passado, o monitoramento de certos tipos de atividades por meio de sistemas com algoritmos. Hoje, é notória a presença de computadores capazes de desempenhar funções que antes eram realizadas por trabalhadores. Toda essa mudança favoreceu o surgimento de um conjunto integrado de processos físicos e de computadores e que, quando aplicados na indústria, consegue garantir a redução de supervisão humana (SANTOS; MORAIS; SIMÕES, 2019).

O ensaio de sedimentação em escala de laboratório destaca-se por sua simplicidade, demandando de poucos recursos e possuindo facilidade de reprodução. No entanto, poucos trabalhos foram encontrados tratando o teste de proveta como um instrumento de estudo, não existindo ainda nenhuma proposta de melhoria. Não obstante, os recursos empregados para automatização possuem baixo custo e simplicidade de implementação. A partir do contexto exposto, ponderando que se refere a uma das operações unitárias mais antigas, simples e barata e, destacando sua vasta aplicação nos setores industriais, tem-se a importância do estudo da operação e dos métodos de projeto, bem como

da busca por melhorias no processo de construção gráfica dos ensaios de sedimentação, cruciais para desenvolver projetos de dimensionamento. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo principal trazer uma configuração alternativa para o teste de proveta, utilizando a plataforma Arduino, comparar as coletas manual e automática de dados, bem como aplicar o método de Biscaia Jr. para projetar espessadores industriais.

MATERIAL E MÉTODOS

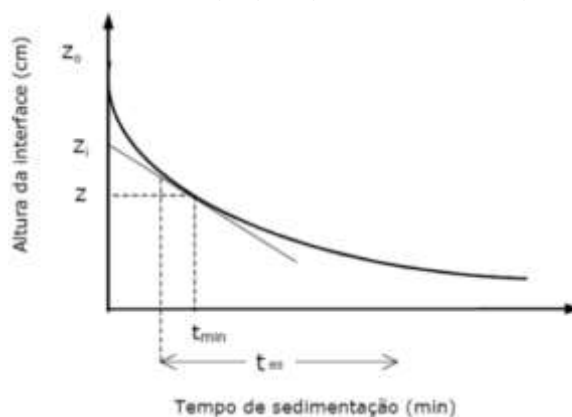
Dimensionamento do sedimentador: método de Kynch

O projeto de sedimentadores comumente é realizado em escala laboratorial, a partir de ensaios de tubo de vidro ou de proveta. Durante os ensaios, uma curva é construída, relacionando a altura da interface sólido-líquido em vários instantes de tempo. Essa curva é denominada curva de decantação (ou sedimentação), que possibilita que o projeto de sedimentadores em escala industrial seja possível de ser realizado, utilizando métodos como os apresentados por Coe e Clevenger, Kynch, Roberts e Talmadge e Fitch, que são os comumente empregados e consideravelmente mais eficientes (SMANIOTTO, 2017). Neste trabalho será utilizado o método de Kynch.

Em 1952, Kynch estabeleceu um modelo matemático simples, baseado na equação da continuidade, para projeto de sedimentadores, usando um único teste de proveta, possibilitando a determinação de concentração (C_s) e velocidade de sedimentação (v_s). Algumas hipóteses foram adotadas, tais como: considera-se a sedimentação unidimensional; a concentração no fundo da proveta aumenta com o decorrer do tempo; desconsideram-se os efeitos de parede; quando a concentração no fundo da proveta tende a um valor máximo, a velocidade de sedimentação tende a diminuir; a velocidade de sedimentação é dependente apenas da concentração local de partículas (CREMASCO, 2012).

Biscaia Júnior introduziu uma simplificação ao método de Kynch, facilitando a obtenção de variáveis de projeto a partir de determinação gráfica. Essa metodologia, também conhecida como método das tangentes, reduz-se no traçado de uma reta tangente à curva de sedimentação, como observado na Figura 1.

Figura 1. Determinação de variáveis de projeto pelo método de Kynch modificado.



Fonte: França e Casqueira (2007)

A partir da reta tangente traçada, é possível calcular a concentração e a velocidade de sedimentação por meio das Equações (1) e (2), respectivamente.

$$C_s = \frac{C_{s0} \cdot Z_0}{Z} \quad (1)$$

$$v_s = \frac{Z_i - Z}{t_{min}} \quad (2)$$

onde:

C_{s0} = concentração inicial da suspensão (kg/m^3);

Z_0 = altura inicial da suspensão na proveta (m);

Z = altura da zona de compactação (m);

Z_i = altura da suspensão na posição i (m);

t_{min} = tempo mínimo para a zona de compactação ser formada (h).

Com isso, a capacidade do sedimentador pode ser calculada partindo da consideração de que as velocidades de sedimentação são respeitadas, implicando numa vazão máxima de suspensão sendo alimentada em uma determinada área de seção transversal. As Equações (3) e (4) referem-se aos cálculos da capacidade de projeto e a vazão da alimentação do sedimentador, respectivamente.

$$\left(\frac{Q}{A}\right)_{projeto} = \frac{Z_0}{t_{min}} \quad (3)$$

$$v_s = \frac{Q}{A} \quad (4)$$

onde:

Q = vazão de alimentação da suspensão (m^3/h);

A = área da seção transversal do sedimentador (m^2);

Z_0 = altura inicial da suspensão na proveta (m);

t_{min} = tempo mínimo para a zona de compactação ser formada (h);

v_s = velocidade superficial de sedimentação (m/s).

O diâmetro do decantador pode ser obtido tendo em conta a determinação da vazão de alimentação da suspensão e dos dados adquiridos do teste de proveta. Já a altura (H) é determinada pela soma de três regiões distintas, compreendidas entre: altura da zona de líquido clarificado (H_1), altura da zona de compactação (H_2) e altura da zona de compactação final (H_3). É convencional que H_1 varia entre 0,45 e 0,75 m, em contrapartida, para H_2 e H_3 as relações matemáticas estabelecidas pelas Equações (5) e (6) são propostas:

$$H_2 = \frac{4}{3} \left(\frac{Q}{A}\right) \frac{C_{s0} \cdot t_{res}}{\rho_s} \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_{esp} - \rho_f}\right) \quad (5)$$

$$H_3 = 7,3 \cdot 10^{-2} \cdot D \quad (6)$$

onde:

t_{res} = tempo de residência da partícula na zona de compactação (h);

ρ_s = massa específica da partícula (kg/m^3);

ρ_f = massa específica do fluido (kg/m^3);

ρ_{esp} = massa específica do espessado (kg/m^3);

D = diâmetro do sedimentador (m).

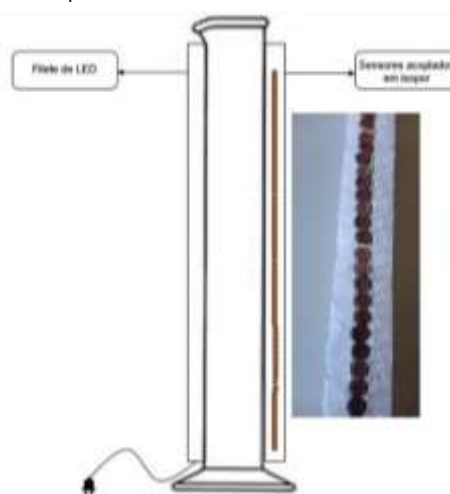
Materiais

Para a montagem do ensaio de bancada do presente trabalho, foram necessários: papel milimetrado, papel alumínio, cronômetro, 4 placas de Arduino UNO, 4 módulos *multiplexer*, 64 sensores LDR, 64 resistores de 10k ohms, 1 barra de LED, 2 provetas de 1 L, poliestireno (isopor) para acoplar os sensores, além de fios, fita isolante, papel cartão e tecido não tecido (TNT) de cor preta. Para realização dos ensaios, foi coletada uma amostra de 2L de efluente de pó de mármore da marmoraria Cajuram – Granitos e Mármore, localizada no município de Cachoeiro de Itapemirim (ES).

Montagem dos sensores LDR na proveta

Para adaptação de uma proveta de 1 L para o teste de proveta automatizado, foram acoplados à proveta uma barra de LED e um filete de poliestireno (isopor) contendo 64 sensores anexados. A Figura 8 apresenta de forma esquemática a disposição dos filetes de LED e de poliestireno (isopor) na proveta. O acoplamento dos sensores em isopor foi feito de modo a deixá-los em paralelo entre si e preencher toda a altura correspondente ao volume de 1 L da proveta. A Figura 2 apresenta o esquema de construção.

Figura 2. Esquema de montagem da proveta



Fonte: o autor

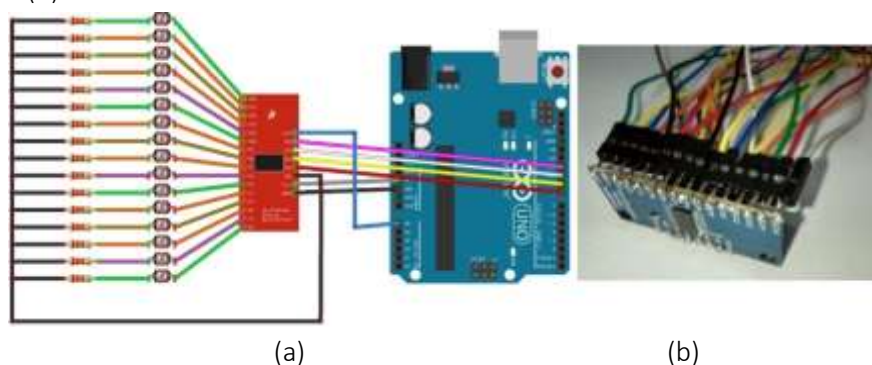
O sistema proposto, após a montagem, foi totalmente revestido com papel cartão e tecido não tecido na cor preta (TNT), para eliminar qualquer interferência luminosa do ambiente, de modo que os sensores LDR captassem apenas os feixes luminosos advindos da barra de LED. Além disso,

utilizou-se de papel alumínio para vedar a abertura superior da proveta e eliminar a interferência luminosa na parte superior da proveta.

Esquema de ligação dos sensores LDR no Arduino

A conformação das ligações foi realizada para acoplar os 64 sensores LDR nas entradas das placas Arduino, empregando como auxílio um multiplexador (Figura 3a). O multiplexador permite que 16 entradas analógicas sejam analisadas, acoplando-o a um Arduino UNO, que contém apenas 6 entradas analógicas. Algumas soldagens foram feitas, conforme ilustrado na Figura 3b, para que os fios se fixassem aos multiplexadores, evitando mal contato durante o manuseio de todo o aparato experimental. Além disso, adotaram-se fios para sistematizar os polos negativos e positivos dos sensores, vinculados à placa Arduino.

Figura 3. Esquema de ligação dos sensores LDR ao multiplexador e Arduino (a) e soldagem no multiplexador (b)



Fonte: o autor

Preparo da suspensão

A suspensão foi preparada a partir do processo de filtração do efluente proveniente da empresa Cajuram - Granitos e Mármore, objetivando quantificar a massa de sólidos presentes em um volume de 2 L coletados. Foram obtidas cinco tortas, que foram submetidas a um processo de secagem ao ar livre, utilizando a luz solar durante um período de dois dias, a fim de eliminar qualquer teor de umidade nas amostras.

As massas dos filtros que continham os sólidos foram registradas antes da etapa de filtração e, posteriormente, esses valores foram subtraídos das massas obtidas após a secagem. Esse procedimento foi realizado objetivando aumentar a concentração da suspensão, uma vez que segundo França e Casqueira (2007), concentrações altas contribuem para fácil visualização da interface sólido-líquido, bem como para a configuração de um perfil de velocidade decrescente.

Teste de proveta convencional

Para o ensaio de sedimentação convencional, uma proveta de 1 L foi adaptada com papel milimetrado contendo marcações a cada centímetro, com o intuito de facilitar as anotações das alturas da interface ao longo do experimento. A suspensão previamente tratada foi inserida na

proveta até o menisco. A altura inicial da suspensão foi anotada e com o auxílio de um bastão de vidro, a mesma foi agitada. Imediatamente após a interrupção da agitação, um cronômetro foi acionado e, durante 73 minutos de experimento, valores de altura e tempo foram registrados.

Inicialmente, as alturas foram anotadas 20 em 20 segundos, por conta da sedimentação inicial ser rápida. Conforme a frente de sedimentação descia ao longo da proveta, o padrão de coletas de dados de altura passou para intervalos de 40, 60, 90, 120 e 300 segundos. Por fim, um último dado de altura foi observado após 10 minutos da última observação, ou seja, após decorridos 4370 segundos.

Determinação da densidade do espessado

Visando à especificar a densidade do espessado, uma proveta graduada de 50 mL foi colocada sobre uma balança analítica para o registro de sua massa. Em seguida, completou-se o volume dessa proveta com a suspensão, e 4370 segundos de decantação, o que correspondeu a um acréscimo de massa de 65,72 g. Com relação à densidade do sólido, admitiu-se o valor da literatura de 2,7 g/cm³, obedecendo a faixa estabelecida por Spala et al. (2017).

Implementação dos códigos no ambiente Arduino IDE e no Python

O ambiente Arduino IDE foi utilizado para a implementação do código em linguagem C++ para a leitura da tensão de cada sensor LDR, o qual que foi alimentado às placas Arduino UNO. Com o intuito de auxiliar as análises dos dados, um código em Python foi desenvolvido para viabilizar a captura das leituras simultâneas das quatro placas Arduino e a compilação dos dados em um arquivo no Excel. Para tal, foram utilizadas as bibliotecas *serial*, *pandas*, *numpy* e *time*.

Análise da estabilidade dos sensores

Antes da execução do ensaio automatizado, as leituras dos sensores LDR foram analisadas previamente, a fim de avaliar suas respectivas estabilidades. Para isso, foram coletados conjuntos de dados compostos por 5 leituras de cada sensor, considerando a proveta vazia e com a barra de LED conectada e ligada. A partir dos valores de tensão obtidos, foram calculados o desvio padrão amostral (s_x) e a média amostral (\bar{x}) para o cômputo do coeficiente de variação (C_v) (Equação 7), que considera o coeficiente baixo quando inferior a 10% (Gomes, 1990).

$$C_v = 100 \cdot \frac{s_x}{\bar{x}} \quad (7)$$

Teste de proveta automatizado

A proveta adaptada foi colocada sobre uma bancada de laboratório e seu volume total de 1 L foi preenchido com a suspensão preparada para este estudo. Inicialmente, empregou-se uma haste de metal com uma flange perfurada para a agitação da suspensão, com o objetivo de obter uma distribuição uniforme das partículas ao longo de toda a proveta. Imediatamente após a

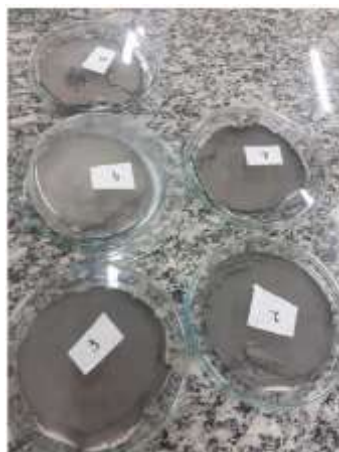
interrupção da agitação, a proveta foi vedada com papel alumínio para evitar interferências luminosas do ambiente sobre os sensores, e o código de programação desenvolvido em Python foi executado até um tempo total de ensaio de 70 minutos, tempo a partir do qual não se observa mais deslocamento da frente de sedimentação.

RESULTADOS e DISCUSSÃO

Preparação da suspensão de pó de mármore

O efluente proveniente do processo de serragem de blocos de mármore passou por um processo de filtragem, para posterior preparação de uma suspensão mais concentrada, como pode ser vista na Figura 4. Decorridos 2 dias, a pesagem das tortas foi realizada e obteve-se uma massa total de 152,34 g de pó de mármore. Entretanto, uma pequena quantidade de sólido ficou retida nos filtros e para o preparo da suspensão restaram-se 149,32 g. Essa massa foi diluída em um volume de 700 mL de água, seguida pela adição de 550 mL de uma solução de amido (coagulante), resultando em uma suspensão de concentração de sólido igual a 119,46 g/L.

Figura 4. Tortas de pó de mármore após filtração



Fonte: o autor

Aplicação do método de Biscaia Jr.: teste de proveta convencional

Com base nas informações obtidas durante o ensaio de proveta convencional, foi possível construir uma curva de sedimentação que estabelece uma relação entre a altura da interface sólido-líquido e o tempo decorrido do ensaio. Essa representação gráfica está ilustrada na Figura 5.

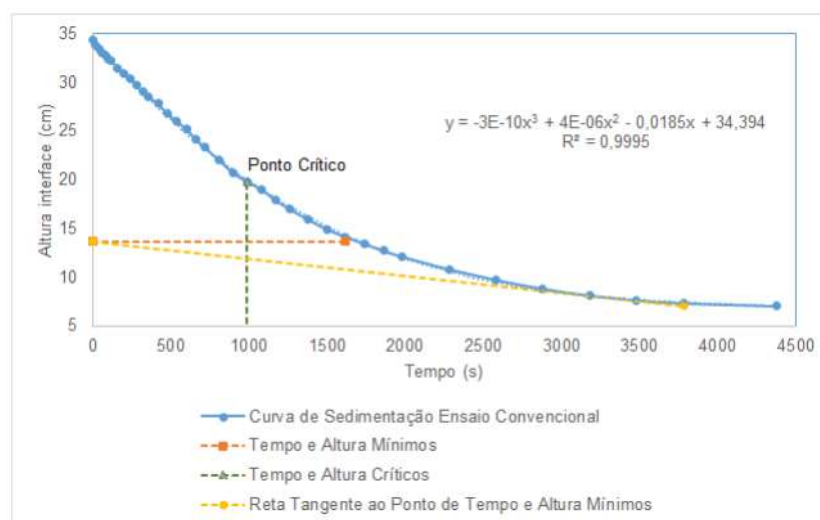
A curva de sedimentação obtida apresentou as zonas de sedimentação definidas, bem como uma evolução exponencial. Ademais, a demarcação do ponto crítico se deu através da averiguação da região de sedimentação livre, ou seja, a partir dos valores de R^2 da zona de tendência linear.

O método de Biscaia Jr. comumente utiliza-se dos modelos linear e exponencial para análise, devido à facilidade do procedimento matemático empregado nos cálculos de projeto. No entanto, os dados experimentais mostraram um ajuste significativo a um polinômio de terceiro grau. Com base nisso, o cálculo da altura mínima foi realizado usando a Equação (1), considerando os valores iniciais de concentração da suspensão de 119,46 g/L e do espessado de 300,00 g/L,

resultando em uma altura mínima de 13,66 cm para a formação da zona de compactação. Além disso, determinou-se que o tempo mínimo correspondia a 1619 segundos. A vazão de projeto foi estimada em 15 m³/h e, utilizando a Equação (3), foi possível determinar a área do decantador como sendo 19,67 m², estabelecendo a hipótese de uma seção circular, o diâmetro teórico calculado foi de 5,00 m.

O ponto de tempo e altura mínimos foi atribuído como ponto de partida para construir uma reta tangente à curva de espessamento, na qual a interseção entre elas disponibiliza o tempo final requerido para alcançar um espessado com concentração de 300,00 g/L e, com base nisso, o tempo final foi estipulado em 2880 segundos, fornecendo um tempo de residência total de 1261 segundos. Ao empregar as Equações (5) e (6), além de adotar valor intermediário de 0,60 m correspondente à zona de líquido clarificado e densidades de 1,30 g/cm³ e 1,00 g/cm³ para o espessado e o fluido, respectivamente, tem-se que a altura total do projeto foi equivalente a 1,06 m.

Figura 5. Curva de sedimentação: teste de proveta convencional



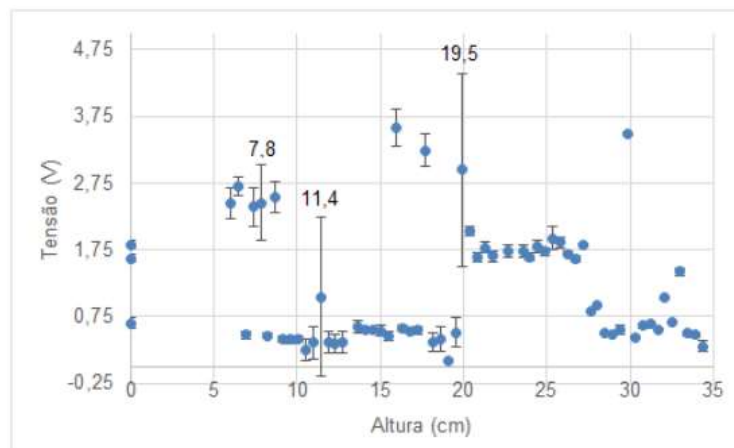
Fonte: o autor

Estabilidade de leitura dos sensores LDR

Os dados obtidos de tensão dos sensores LDR estão dispostos na Figura 6, considerando o valor médio e a barra de erro com desvio padrão. Preliminarmente, é imprescindível ressaltar que o gráfico estabelece uma correlação entre as variáveis de tensão e as respectivas alturas dos sensores acoplados à proveta. Observa-se que os sensores posicionados nas alturas de 7,8 cm, 11,4 cm e 19,5 cm manifestaram uma notável oscilação de sinal, o que levou à exclusão desses componentes durante a realização deste estudo. Além disso, os receptores que apresentaram média alta de tensão também foram dispensados, dado que o teste de estabilidade foi conduzido com o filamento de LED conectado, o padrão esperado consiste na exibição de valores de tensão aproximados de zero.

Por fim, nota-se que foram registrados três pontos localizados no eixo da variável tensão, ou seja, com alturas nulas e, sob a condição de algumas falhas de leitura de código de programação, estes pontos foram anulados para fins de análise.

Figura 6. Tensão *versus* altura do sensor na proveta



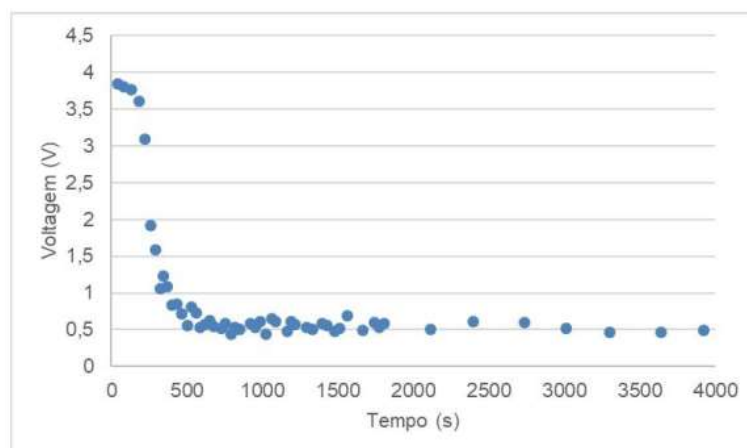
Fonte: o autor

Comportamento da tensão nos sensores LDR frente ao deslocamento da frente de sedimentação

O tratamento dos dados obtidos se deu por meio de observações do comportamento da voltagem dos sensores previamente validados, correlacionando as variáveis tensão e tempo total de experimento. A Figura 7 representa o cenário ideal para determinar o tempo exato em que a interface sólido-líquido encontra-se na altura correspondente a cada sensor.

Diante do exposto, é evidenciado um declínio drástico dos valores de voltagem, seguido de um comportamento estável e contínuo até o término do ensaio experimental. Nessa perspectiva, a oscilação é justificada pelo deslocamento da interface sólido-líquido na altura correspondente do sensor, de 30,75 cm, e o tempo em que essa variação se mostrou evidente foi deliberado para a elaboração da curva de sedimentação.

Figura 6. Tensão no sensor LDR frente ao deslocamento da frente de sedimentação

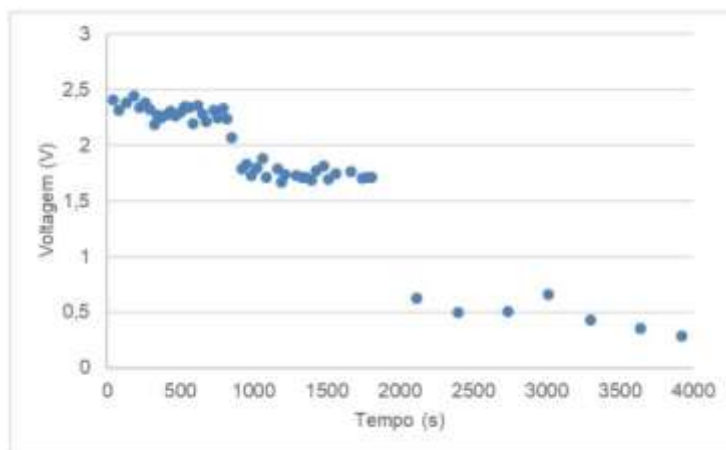


Fonte: o autor

Contudo, alguns detectores de luz revelaram um comportamento da variação de voltagem não tão bem definida, como exemplificado na Figura 8. Constata-se que os dados exibiram alternâncias acentuadas ao longo do experimento, o que representou um desafio na determinação do tempo de passagem da interface. Ademais, os valores iniciais de voltagem não se adequaram ao esperado, uma vez que o valor nominal estabelecido foi de 5 V. Sob esse aspecto, os elementos de

detecção de luz que adquiriram este desempenho foram desconsiderados para as especificações das variáveis envolvidas na estruturação da curva de assentamento. Além disso, não foi possível elucidar porque tais sensores não partiram de um sinal próximo a 5V.

Figura 7. Tensão anômala no sensor LDR frente ao deslocamento da frente de sedimentação



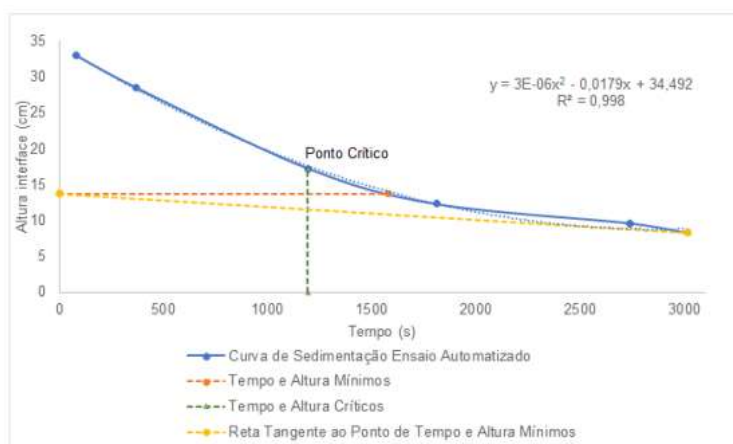
Fonte: o autor

Aplicação do método de Biscaia Jr.: teste de proveta automatizado

A Figura 8 apresenta os dados da curva de sedimentação para o teste automatizado. De maneira similar à aplicação do método de Biscaia Jr. ao teste de proveta convencional, estabeleceu-se para as variáveis vazão de projeto e concentração final de espessado de 15 m³/h e 300,00 g/L, respectivamente, bem como os dados de densidades do espessado, do sólido e do fluido e concentração inicial da dispersão sólido-líquido, favorecendo a aplicação da metodologia para o ensaio automatizado.

De igual modo, a altura inicial foi assumida como 34,49 cm, em conformidade com a equação do modelo. Assim, obteve-se para as dimensões do clarificador uma área de 19,05 m², diâmetro correspondente a 4,92 m e altura total de 1,07 m.

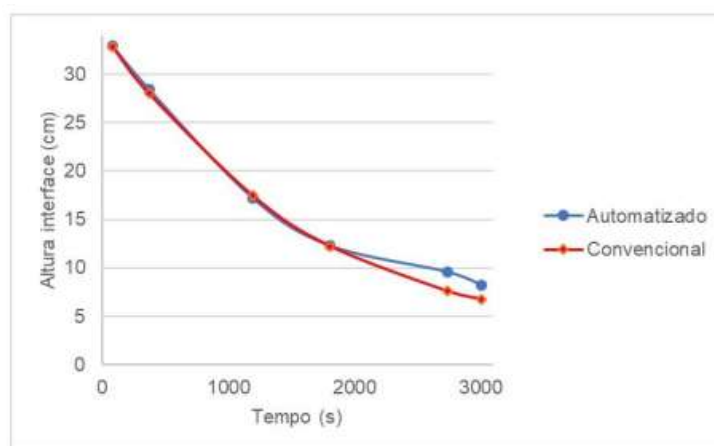
Figura 8. Curva de sedimentação: teste de proveta automatizado



Fonte: o autor

De posse dos dados do experimento convencional e do automatizado, os dados foram comparado, como mostra a Figura 9. Embora os dados apresentem uma ligeira diferença no fim do ensaio, onde a frente de sedimentação praticamente não se movimenta mais e está próxima a base da proveta, onde se encontra a torta de sedimento, o que dificulta uma leitura precisa da incidência de luz no sensor LDR, é perceptível que a configuração proposta do aparato experimental para coleta automatizada da altura da frente de sedimentação apresentou resultado bem similar ao obtido a partir do teste de proveta convencional, sustentando a validação do estudo realizado neste trabalho. Nesse sentido, os resultados forneceram um sólido embasamento para as considerações deste estudo, consolidando relevância e êxito da pesquisa executada.

Figura 9. Curva de sedimentação: comparativo do resultado do teste de proveta convencional e do automatizado



Fonte: o autor

CONSIDERAÇÕES FINAIS

De modo geral, obteve-se sucesso na validação do arranjo do aparato experimental proposto, dado que as variáveis envolvidas apresentaram alternâncias significativas quando submetidas ao processo de precipitação do sólido contido na suspensão. Entretanto, alguns sensores de intensidade luminosa apresentaram falhas de leituras não identificadas, dificultando os registros de dados de determinadas alturas da proveta.

O estudo executado para correlacionar os parâmetros tensão e tempo permitiu concluir que, para as fotocélulas previamente validadas, a tendência gráfica possui apenas uma única diminuição acentuada, motivada pela passagem da interface sólido-líquido. Em contrapartida, a configuração gráfica dos sensores com inconsistências de dados foi definida com múltiplas reduções drásticas dos valores de voltagem, inviabilizando a determinação precisa do tempo de passagem da interface.

Ao efetuar a comparação dos testes convencional e automatizado, concluiu-se que houve conformidade considerável dos modelos obtidos. Conseqüentemente, ao empregar o método de Biscaia Jr. (Kynch modificado), foram fornecidas variáveis de projeto semelhantes. Obteve-se para área, diâmetro e altura os valores de 19,67 m², 5,00 m e 1,06 m referente ao ensaio de proveta convencional e 19,05 m², 4,92 m e 1,07 m correspondente ao ensaio de proveta automatizado.

REFERÊNCIAS

- COE, H. A.; CLEVENGER, G. H. Methods for Determining the Capacities of Slime-Settling Tanks, *Trans. AIME*, 55, p356, 1916.
- CREMASCO, M. A. Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidodinâmicos. Ed. Blucher, 2012.
- FRANÇA, S. C. A.; CASQUEIRA, R. de G. Ensaio de sedimentação. IN: Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, p. 393-408, 2007.
- GUIMARÃES, F. A. V. Revisão nos métodos de dimensionamento de espessadores e comparação dos modelos industriais. 2010. 235 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.
- SANTOS, G. T.; MORAIS, P. L. A.; SIMÕES, R. S. Construção e automatização de um reator CSTR para práticas de controle de sistemas online. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.
- SMANIOTTO, A. L. A. Aplicação de sedimentadores de fluxo vertical na separação sólido-líquido de água de processo em usinas de beneficiamento de carvão mineral na região sul de Santa Catarina. 83 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2017.
- SOUSA, P. A. Espessamento de Polpas. 59 f. Monografia de Especialização (Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012.
- SOUZA, M. D. T. Projeto de um sedimentador a ser implementado em uma estação de tratamento de efluentes. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2021.
- SPALA, S. T. et al. Caracterização tecnológica de resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais para seu uso em concreto. XXV Jornada de Iniciação Científica em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação. p.1, 2017.