

Projeto e construção de um filtro de tambor rotativo à vácuo em escala de laboratório

Design and construction of a rotary vacuum-drum filter in laboratory scale

Adjentina B. de Lima Spirandeli^{1*}; Amarílis Severino e Souza^{2*}; Camila Ferreira Pinto^{3*}; Jéssica Aparecida Apolinário de Paula^{4*}; Luana Eberharte Agassi^{5*}; Mariana Oliveira Alves^{6*}; Thessa Fuzaro Correa^{7*}, Davi Leonardo de Souza⁸

(*)Estudante; Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), Uberaba, Minas Gerais, Brasil.
E-mail: adjentina.lima@hotmail.com¹; amarilis.sev@gmail.com²; camilinha_2910@hotmail.com³; jessyap_92@hotmail.com⁴; luana.eberharte@hotmail.com⁵; mariana17-04@hotmail.com⁶; thessafuzaro@hotmail.com⁷

⁸ Professor do Departamento de Engenharia Química; Universidade Federal do Triângulo Mineiro; Uberaba, Minas Gerais, Brasil. E-mail: davi.souza@uftm.edu.br

RESUMO: O filtro de tambor rotativo é um equipamento grande e cilíndrico, utilizado em aplicações industriais para filtrar líquidos que transportam alta concentração de sólidos em suspensão. O objetivo deste trabalho foi projetar um filtro de tambor rotativo a vácuo e sua montagem em escala laboratorial. Testes de filtro folha foram realizados com equipamentos distintos e aprimorados com o objetivo de refletir a realidade de filtros de tambor rotativo utilizados nas indústrias de açúcar e álcool em suspensões com alta concentração de sólidos. Os resultados dos testes em laboratório forneceram dados para a realização do scale-up e, assim, as dimensões adequadas para o filtro de tambor rotativo que foi construído, além do tamanho e espaçamento dos furos na superfície do tambor, do meio filtrante mais adequado para operação e da velocidade de rotação. Os aparatos utilizados também foram montados de acordo com as dimensões reais do filtro de tambor rotativo. O filtro construído gerou um vácuo de 30 mmHg, formou torta e produziu filtrado com baixa concentração de sólidos. Com a seleção de uma suspensão adequada pode-se utilizar o filtro em aulas de laboratório de operações unitárias, o que permitirá a observação do funcionamento do equipamento e das principais variáveis e gargalos que existem em seu projeto.

Palavras-chave: Filtração; Filtro folha; Módulo didático; Lodo de caldo de cana.

ABSTRACT: The rotary vacuum drum filter is a big cylindrical apparatus used in industrial applications to filter liquids with a high concentration of solids in suspension. In the work reported here, the aim was designing a laboratory scale rotary vacuum drum filter for its subsequent construction. Therefore, the performance of a leaf test was modified with different equipment in order to reflect the real rotary vacuum drum filter used in industries of sugar-cane and ethanol, which are used to filtration with high concentration of solids in suspension. The laboratory tests results provided data to perform the scale-up and hence suitable dimensions for the rotary drum filter that was built, aside from the size and spacing of the holes in the drum surface, the more suitable filter medium for this operation and the drum rotation period. Moreover, the apparatus used was also designed according to the real dimensions of a rotary drum filter. The filter built created a 30 mmHg of vacuum, which made up a cake and produced a filtrated with low concentration of solids. Except with a suitable suspension, this filter can be used at laboratory classes involving unit operations. Then, it can allow the students to check the operation of the equipment end the existing gaps.

Keywords: Filtration; Leaf test; Rotary vacuum drum filter; Laboratory scale.

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área filtrante, $M^0L^2T^0$	t_f	Tempo de filtração, $M^0L^0T^1$
I	Ângulo de imersão	t_r	Período de rotação, $M^0L^0T^1$
L	Largura do tambor, $M^0L^1T^0$	t_s	Tempo de secagem, $M^0L^0T^1$
M_f	Massa de filtrado, $M^1L^0T^0$	u	Umidade da torta (%)
M_s	Massa da torta seca, $M^1L^0T^0$	V_f	Volume do filtrado, $M^0L^3T^0$
M_u	Massa da torta úmida, $M^1L^0T^0$	ω	Velocidade angular, $M^0L^1T^{-1}$
N	Número de rotações, $M^0L^0T^{-1}$	ρ_f	Densidade do filtrado, $M^1L^{-3}T^0$
Q	Produção de filtrado, $M^0L^3T^{-1}$	θ	Tensão de operação, $M^1L^{-2}T^{-3}A^{-1}$
tc	Tempo de um ciclo de filtração, $M^0L^0T^1$	ψ	Fator de scale up do filtro de tambor rotativo

INTRODUÇÃO

Em todos os processos de filtração, a mistura flui devido a uma ação impulsora, tais como a gravidade, a pressão ou a força centrífuga. A filtração é uma ferramenta eficiente, capaz de realizar a separação de partes indesejáveis de um processo e se faz importante não somente em processos industriais, mas também na solução de problemas de poluição (POLONIO, 2006).

O filtro de tambor rotativo à vácuo é um dispositivo cilíndrico, utilizado em aplicações industriais para filtrar líquidos que transportam alta concentração de sólidos em suspensão. Através de um vácuo interno, a suspensão é filtrada na parte externa do tambor e o líquido clarificado segue para o seu interior. A torta contendo os sólidos fica presa à superfície do tambor, e também age como meio filtrante, sendo posteriormente raspada contra uma lâmina ou placa e coletada.

Na filtração o meio poroso recebe o nome de filtro ou meio filtrante, enquanto o fluido que abandona o filtro é reconhecido como filtrado. Dependendo da suspensão a ser processada, a fase particulada poderá acumular-se sobre o filtro atuando também como meio filtrante, sendo denominada torta de filtração. O produto desejado pode ser tanto o fluido clarificado, como por exemplo nas estações de tratamento de água e efluentes, ou então a própria torta lavada, seca e raspada pela lâmina pertencente ao filtro (CREMASCO, 2012).

Os filtros de tambor rotativo a vácuo substituíram rapidamente os filtros-prensa a partir de 1935, sobretudo por não necessitarem de um tempo para desmantelamento. (SPENCER; MEADE, 1967). De acordo com Perry et al. (1977) esse tipo de filtro processa mais toneladas de sólidos do que qualquer outro filtro combinado até o presente momento.

Os filtros de tambor rotativo à vácuo são aplicados nas indústrias sucroalcooleiras no Brasil, na etapa de clarificação do caldo de cana-de-açúcar, etapa denominada sulfitação. É estimado que para produção nacional de 320 milhões de toneladas de cana-de-açúcar sejam necessários 51.850 m² de área filtrante, mantendo a relação média de 0,7 m² de área de filtração por tonelada de cana moída por hora, com período médio de duração de safra de 180 dias (POLONIO, 2006).

Embora o equipamento tenha larga utilização em processos de separação sólido-líquido na indústria química, a presença de módulos didáticos que contemplem seu funcionamento, gargalos e parâmetros operacionais muitas vezes limitam-se a testes de filtro-folha com pequena área filtrante, não contemplando o funcionamento contínuo de um filtro de tambor rotativo, que envolve as etapas de filtração, secagem e descarga de torta.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi projetar e construir um filtro de tambor rotativo à vácuo em escala de laboratório, de modo que seja possível avaliar as principais variáveis envolvidas na sua operação, como área de filtração, pressão de vácuo, meio filtrante, ângulo de imersão e a qualidade da torta e do filtrado.

Para tal, foi feito o projeto do filtro de tambor rotativo tendo como base resultados de testes de filtro folha (*leaf test*) para dimensionamento e posterior construção do equipamento.

A motivação para construção do aparato foi a sua posterior utilização como módulo didático em laboratório e também devido à forte presença de usinas de açúcar e álcool na região sudeste.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Filtração

Segundo Foust (1982), a filtração é uma das aplicações mais comuns do escoamento de fluidos através de leitos compactos. O objetivo da operação é a separação de um sólido do fluido, e em todos os casos, a separação é realizada pela passagem forçada do fluido através de uma membrana porosa.

De acordo com França & Massarani (2004), a filtração pode ocorrer de duas maneiras distintas: na primeira, a suspensão percola uma matriz porosa - ou meio filtrante - rígida, que retém as partículas sólidas. Na segunda, ocorre a formação de torta, já que essas partículas se acumulam no exterior do meio filtrante, resultando na formação de um leito de partículas. Quando há formação de torta, o próprio meio poroso formado pelas partículas atua como meio filtrante para a suspensão.

Se o líquido passar pelo meio filtrante apenas pelo efeito da pressão hidrostática, a operação é chamada apenas de filtragem por gravidade. Se uma pressão diferente da atmosférica for usada para este fim, ela receberá o nome de filtragem sob pressão (pressões positivas) ou a filtragem a vácuo (subatmosférica). Há ainda a filtragem centrífuga, quando forças centrífugas são aplicadas ao meio filtrante (FRANÇA, 2005).

Filtração à vácuo

A filtração a vácuo é um método de separação por pressão, que utiliza como meio filtrante primário, tecidos de fibras naturais, metálicos (chapas perfuradas ou telas), fios sintéticos ou mistos. O meio filtrante secundário requer um meio poroso chamado de torta, formado pelo próprio material sólido que fica retido na tela metálica, o qual retém as partículas sólidas permitindo a passagem dos fluidos (SANTOS, 2009).

O filtro a vácuo possibilita uma taxa de filtração especialmente elevada. No entanto, a escolha do equipamento filtrante depende da economia do processo, e as vantagens econômicas serão variáveis de acordo com as seguintes características: viscosidade, densidade e reatividade química do fluido, dimensões e forma da partícula, distribuição granulométrica, concentração da suspensão de alimentação, quantidade do material que deve ser operado, grau de separação que se deseja obter, custos relativos de mão-de-obra, do capital e da energia (FOUST, 1982).

Um equipamento da indústria química que utiliza o princípio da filtração a vácuo para realizar separações do tipo sólido-líquido é o filtro de tambor rotativo.

Filtro de tambor rotativo à vácuo

Os filtros de tambor rotativo são utilizados em sistemas de tratamento de efluentes, desaguamento de lamas, separação de sólidos e líquidos em processos: químico, de mineração, alimentício, entre outros.

Um filtro de tambor rotativo à vácuo é apresentado na **Figura 1**. Nela, pode-se observar o equipamento cilíndrico presente sobre um tanque no qual a suspensão a ser filtrada é alimentada.

Figura 1. Filtro de tambor rotativo a vácuo.



Fonte: Soluções Industriais

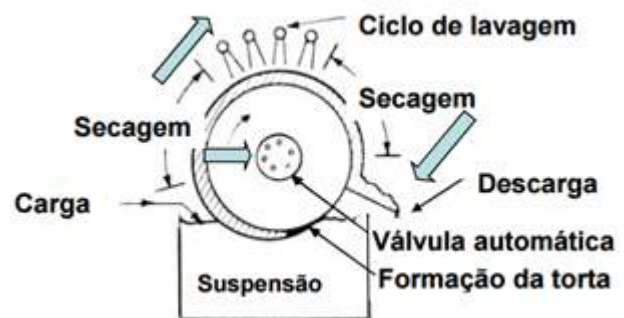
Segundo Santos (2009), a parte periférica do filtro é constituída de um tambor rotativo dividido em diversos setores que são imersos em uma bacia com agitador, contendo o lodo que será filtrado.

Cada setor é ligado ao cabeçote em suas extremidades por um feixe tubular que classifica os níveis de vácuo e a função de cada setor, ou seja, filtração, desidratação, lavagem e secagem da torta (POLONIO, 2004). Esses setores definem as etapas de filtração e são ilustrados pela **Figura 2**.

De acordo com Santos (2009), as etapas de filtração são:

- **Formação da torta:** Ocorre nos setores do filtro rotativo que estão imersos na bacia em contato com a solução a ser filtrada (vácuo baixo).
- **Desidratação da torta:** A parte líquida contida na torta é sugada pela ação do baixo vácuo e a torta fica exposta à atmosfera.
- **Lavagem da torta:** Submetido à pressão do alto vácuo, no qual ocorre a aplicação de água quente sobre a torta, melhorando a extração do produto desejado que nela se encontra. Nesta etapa, a eficiência da lavagem é mais importante do que a quantidade de água empregada, pois a torta não pode ser totalmente retirada, para evitar a perda de vácuo no filtro.
- **Secagem da torta:** O tambor continua girando e o líquido contido na torta é aspirado pela pressão do alto vácuo até o fim da filtração.

- **Figura 2.** Esquema de funcionamento de um filtro de tambor rotativo à vácuo



Fonte: SANTOS (2009).

De acordo com Figueiredo & Rodrigues (2010), é imprescindível a formação de uma torta permeável durante a operação do filtro. Portanto a suspensão a ser filtrada precisa apresentar algumas características: deve ser concentrada a uma porcentagem de sólidos superior a 1%, as partículas não devem ser muito pequenas, devendo ter um diâmetro acima de $5\mu\text{m}$, e o sólido filtrado deve ter a propriedade de formar uma torta permeável. Porém suspensões fora das especificações citadas também podem ser utilizadas como, por exemplo, misturas de baixa concentração, partículas com diâmetro menor que $5\mu\text{m}$ e sólidos que não formam tortas permeáveis. Nesses casos a parte externa do filtro pode ser recoberta de uma torta inicial (filtração auxiliada) composta, por exemplo, de terra diatomácea, perlita ou pó de celulose.

Os principais fatores que interferem no desempenho de qualquer filtro são: ciclo de operação, temperatura de alimentação do lodo, viscosidade de alimentação, concentração de sólidos no lodo, distribuição granulométrica dos

sólidos, velocidade do agitador, pH do lodo, adição ou dosagem de floculante, tempo de formação da torta, tipo de meio filtrante, vácuo aplicado, lavagem e secagem da torta e produtos auxiliares de filtração (POLONIO, 2004).

Quando é utilizada a suspensão de caldo de cana, a torta de filtro formada é um composto orgânico e apresenta grandes quantidades de minerais, podendo ser empregada como fertilizante (SANTOS, 2009).

De acordo com Santos (2009), para controlar o processo de filtração à vácuo de suspensão de lodo de caldo de cana de açúcar, presente nas usinas sucroalcooleiras, é recomendável analisar algumas variáveis, tais como:

- Disponibilidade de área de filtração;
- Temperatura do lodo não seja menor que 80°C, pois a essa temperatura, a viscosidade é menor, o que facilita sua filtração;
- Temperatura da água de lavagem: superior a 80°C;
- Velocidade de rotação do tambor: de 4 a 6 minutos por volta (0,17 a 0,25 rpm);
- Espessura da torta entre 7 a 10 mm;
- Umidade da torta deve estar compreendida entre 65 a 80%;
- Pressão do alto-vácuo: 18 a 20 polegadas de mercúrio (460 a 500 mmHg);
- Pressão do baixo vácuo: 7 a 10 polegadas de mercúrio (180 a 250 mmHg).

Ainda conforme o autor, a capacidade de filtração e a eficiência da operação dependem, até certo ponto, da velocidade de rotação do tambor do filtro, podendo ser expressa em voltas por hora. Em geral, quanto menor a rotação do tambor do filtro, melhor será a eficiência na redução da *pol* da torta [quantidade de sacarose que resta na torta] e na umidade, e mais baixa a capacidade de remoção do lodo.

A quantidade de água a ser aplicada para lavagem da torta também é um fator determinante para a eficiência do processo de filtração (SANTOS, 2009).

Nos filtros rotativos a vácuo, a torta é caracterizada como seca de pequena espessura (inferior a 1 cm) e o filtro opera continuamente sob queda de pressão reduzida (inferior a 0,8 atm ou 600 mmHg). A filtração é feita sobre o meio filtrante, que recobre a superfície cilíndrica do equipamento.

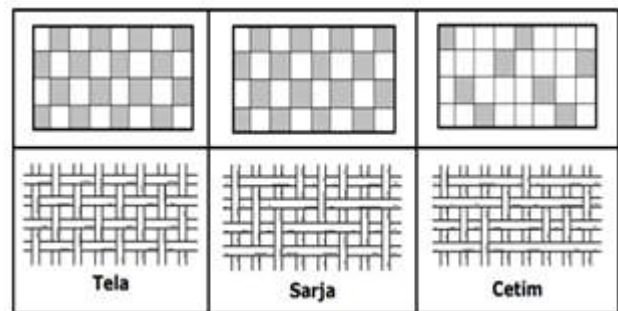
Ainda sobre essa torta formada, a retirada nunca é total por duas razões: primeiro, para não haver o risco de rasgar a lona ou a tela do filtro no contato com o raspador e segundo, para não “perder” o vácuo. Muitas vezes é realizado trabalho com pré-revestimento (MOREIRA, 2004).

Meios filtrantes

Embora nas indústrias químicas e metalúrgicas sejam empregados materiais como telas metálicas, plásticos porosos, vidros sinterizados e membranas porosas, podem ser usados outros tipos de tramas que são os tecidos. A seleção é muito ampla e não abrange somente a natureza química das fibras, mas também a maneira como elas são tecidas (FRANÇA; CASQUEIRA, 2007).

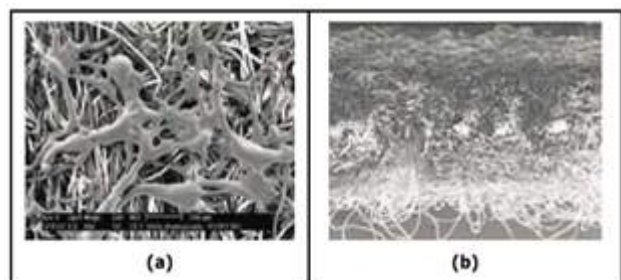
A tessitura do pano, que se refere à sua textura e composição, pode ser feita de muitas maneiras. Destacam-se a trama simples ou tela (plain), sarjas (twill) e cetim (satin), conforme mostrado na **Figura 3**. O uso do feltro também é comum em filtros por causa de sua alta resistência mecânica. Além disso, sua eficiência também depende do tipo de acabamento, conforme ilustra a **Figura 4** (FRANÇA; CASQUEIRA, 2007).

Figura 3. Tessituras básicas dos tecidos usados na filtração.



Fonte: Chaves (1996)

Figura 4. Acabamento chamuscado do feltro: (a) vista frontal com aumento de 60 vezes e (b) vista lateral com aumento de 20 vezes.



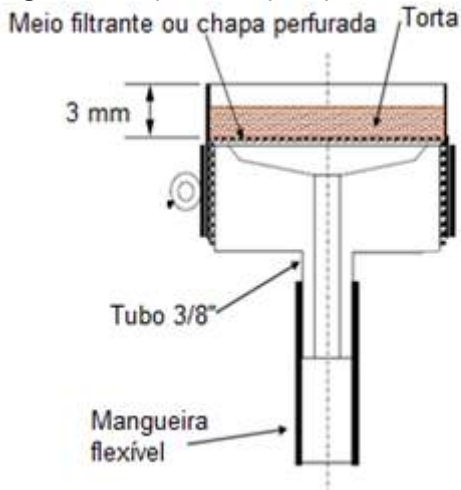
Fonte: Pacheco (2002)

Testes de filtro-folha

Conforme França e Casqueira (2007), o teste de filtro-folha é o método de filtração em escala de bancada, empregado universalmente para o dimensionamento de filtros de tambor rotativo contínuos industriais, com a utilização de equipamentos relativamente simples de pequena escala e de fácil montagem.

O ensaio de teste-folha deve ser feito usando-se um suporte de filtragem padrão, com o meio filtrante adequado à polpa que se quer filtrar. Esse suporte deve ser ligado por meio de mangueiras de plástico a um kitassato, a uma bomba de vácuo e a um rotâmetro (CHAVES, 1996). A **Figura 5** ilustra o dispositivo típico para o teste-folha.

Figura 5. Dispositivo típico para o teste-folha.



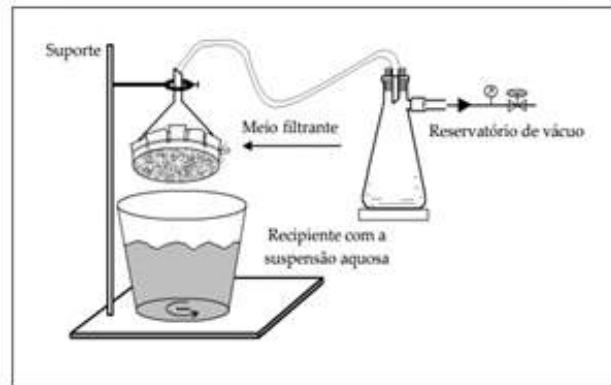
Fonte: POLONIO, 2006.

A série de ensaios de filtragem deve ser iniciado após investigações preliminares para se observar a ordem de grandeza do tempo de formação de torta, o tempo de desaguoamento ou secagem, o nível ou pressão de vácuo e a seleção do meio filtrante, que possam fornecer os resultados desejados.

No começo do ensaio, o vácuo é ligado e o meio filtrante é totalmente imerso na suspensão a ser filtrada, a qual é mantida levemente agitada durante o tempo pré-determinado para a formação da torta, como mostrado na **Figura 6**. Depois desse período, retira-se o meio filtrante da suspensão, invertendo-a de modo a ser posicionada com o tubo de drenagem para baixo, iniciando a secagem da torta durante o tempo escolhido (**Figura 7**). Em seguida, a torta é descarregada, geralmente com o auxílio de um sopro de ar comprimido no tubo de drenagem (FRANÇA, 2005).

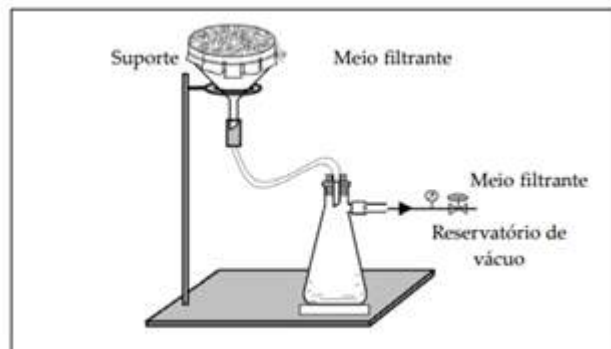
De acordo com França e Casqueira (2007), os principais dados obtidos nos testes de filtro-folha são: tempo total de filtragem, volume de filtrado, espessura e uniformidade da torta, como também o nível do vácuo, ou seja, a pressão utilizada. Ainda conforme os autores, os resultados obtidos nos testes são expressos em peso de sólido seco ou volume de filtrado, por unidade de área ou por ciclo, que é a razão de filtragem. Essa grandeza multiplicada pelo número de ciclos por dia permite o cálculo da área do filtro necessária para processar e obter uma capacidade diária de uma determinada escala de produção (CHAVES, 1996).

Figura 6. Primeira etapa do ensaio de teste de folha (formação da torta).



Fonte: FRANÇA (2005)

Figura 7. Segunda etapa do ensaio de teste de folha (secagem).



Fonte: FRANÇA (2005)

Na realização desse teste, as características do meio filtrante primário utilizado devem ser as mesmas que serão utilizadas na construção do filtro industrial, como número de furos por cm², diâmetro do furo, espessura da chapa, entre outras.

MATERIAL E MÉTODOS

Para construção e dimensionamento do filtro de tambor rotativo à vácuo, primeiramente, foram realizados testes de filtro folha e, posteriormente, o equipamento foi operado de acordo com metodologia proposta nesta seção.

Materiais e instrumentação do teste de filtro-folha

Foram necessários dois testes de filtro-folha, adaptados do método descrito por (FRANÇA; CASQUEIRA, 2007). Pelo teste 1, foram obtidos valores de referência que orientaram o teste 2. Pelo tratamento dos resultados, foram calculados os valores de projeto do filtro.

Para o teste 1, foi utilizada uma bomba a vácuo (Primatec®, ¼ CV), um kitassato de 1 L,

mangueiras de silicone, béquer de 2 L, funil de 5,5 cm de diâmetro e um tecido de algodão usado como meio filtrante. Ainda nesse teste, a suspensão foi preparada com água e bagaço de cana seco, previamente separado em uma peneira de 1,7 mm de abertura, na concentração de 2,5% (m/m).

O material utilizado no teste 2 foi o mesmo, contudo, o funil de plástico possuía 10,5 cm de diâmetro, uma tampa de tubulação de PVC (Cap) e a suspensão utilizada foi o lodo de caldo de cana (40% v/v), fornecido pela Delta Sucreenergia.

Procedimento experimental do teste de filtro-folha

No teste 1 bagaço de cana foi peneirado e misturado com água na concentração de 2,5% (m/m) e reservado. O aparato experimental foi montado conforme a **Figura 8**. O meio filtrante foi diretamente acoplado no funil.

Já que a torta formada possuía irregularidades, foram definidos tempos de filtração de 4, 8, 10 e 12 s. O tempo de secagem estipulado foi 56, 52, 50 e 48 s, respectivamente.

Para cada experimento, o funil foi inserido na suspensão e a bomba de vácuo foi ligada na pressão de 100 mmHg. Após o tempo de filtração, o funil foi retirado da suspensão e invertido durante o tempo de secagem da torta. A bomba foi desligada e a torta raspada e levada à estufa a 100 °C por 24 h para determinação da sua umidade por gravimetria, conforme equação 1. O filtrado coletado no kitassato foi pesado e teve o seu volume medido.

Com a área do funil (A_f) e o volume de filtrado (Q_f), foi calculada a relação de *scale-up* (Ψ_1) para o filtro de tambor rotativo em escala de laboratório, conforme equação 2 e avaliadas as possíveis dimensões.

Figura 8. Aparato experimental para o teste do filtro folha



$$U(\%) = \frac{m_{tu} - m_{ts}}{m_{tu}} \cdot 100 \quad (1)$$

$$\Psi_1 = \Psi_2 = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

No teste 2, com o intuito de aproximar a condição do teste de filtro folha da operação do filtro de tambor rotativo, foram feitas alterações na região de filtragem, com a utilização de um funil de maior diâmetro e do cap de PVC, além do uso de um meio filtrante com a malha contendo tramas mais fechadas que a utilizada no teste 1.

Cada experimento foi feito conforme descrito no teste 1, porém, com pressão de vácuo de 150 mmHg na bomba a vácuo e tempos de filtração de 12 s, com 48 s de secagem. O procedimento foi feito em triplicata.

Equipamentos utilizados na operação da unidade experimental

Para obtenção de vácuo no interior do tambor foi utilizada a mesma bomba de vácuo dos testes de filtro-folha. A bomba em questão é da marca Primatec®, modelo 121, possui deslocamento máximo de 2,2 m³/h, potência de 180 watts e funciona nas tensões de 127 e 220 volts.

Para rotacionar o tambor foi utilizado um motor da marca BOSCH®, de potência nominal de 12 volts, que trabalha em corrente contínua, originalmente utilizado como motor de para-brisa de carro (**Figura 9**).

O motor, trabalhando em sua tensão nominal, possui frequência de rotação de 30 rpm. Para o projeto, foi necessária uma rotação menor, portanto, foram feitos testes alterando a tensão e corrente fornecidas ao motor utilizando uma fonte DC modelo *Power Supply* FA-3005 e observou-se a velocidade de rotação do seu eixo e o período (t_r), como indicado na **Tabela 1**.

Figura 9. Motor utilizado para rotacionar o tambor do filtro.



Tabela 1. Relação entre tensão de operação e velocidade de rotação do eixo do motor

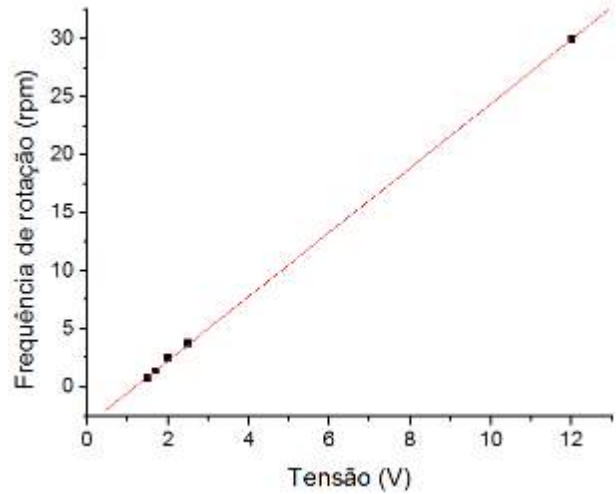
Tensão (V)	Corrente (A)	t _r (s)	Velocidade (rpm)
1,5	0,55	78	0,77
1,7	0,60	46	1,33
2	0,60	24	2,5
2,5	0,63	16	3,75
12	1,95	2	30

A partir dos dados obtidos pôde-se plotar uma curva da velocidade de rotação em relação a tensão, apresentada na **Figura 10**. Notou-se uma relação linear crescente dessas variáveis. A equação do ajuste linear apresentou um coeficiente de correlação R² de 0,9999 e é dada pela equação 3.

$$w = 2,7722\theta + 3,2526 \quad (3)$$

Em que w é a velocidade de angular em rpm e θ é a tensão em Volts.

Figura 10. Variação da velocidade angular em relação à tensão



Para succionar o filtrado no interior do tambor, foi utilizada uma bomba de limpador de para-brisa automotivo de corrente contínua, apresentada na **Figura 11**.

A bomba de limpador de para-brisa foi conectada a uma fonte DC juntamente com a bomba de vácuo. Na fonte, a tensão foi manipulada para controlar a vazão da bomba de acordo com o funcionamento desejado para o filtro de tambor rotativo à vácuo.

Figura 11. Bomba utilizada na sucção de filtrado do interior do filtro.

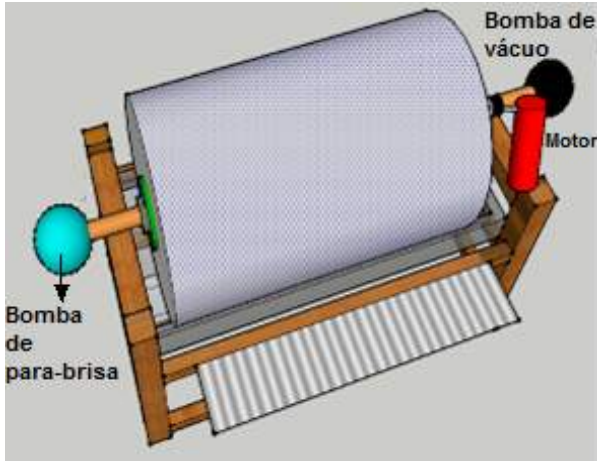


Projeto do filtro de tambor rotativo

A partir dos testes de filtro folha pode-se obter as dimensões adequadas para o tambor do filtro a ser construído, a dimensão e espaçamento dos furos na superfície do tambor, o meio filtrante mais adequado para operação, a velocidade de rotação do motor e a pressão de vácuo que deve ser exercida pela bomba.

Antes de realizar a construção do tambor, foi desenhado um esquema de modo a nortear sua montagem. A representação proposta para montagem do projeto está indicado na Error! Reference source not found., onde o projeto é constituído basicamente do tambor e meio filtrante, bombas, tanque de alimentação, motor, raspador e suporte.

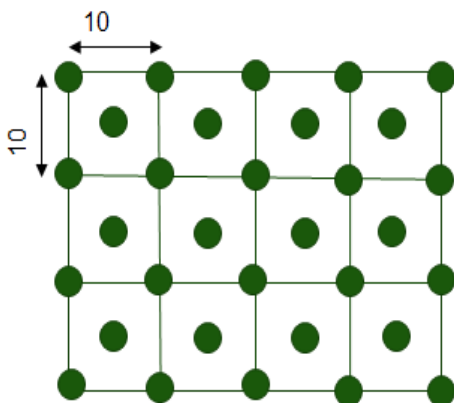
Figura 12. Esquema de montagem do filtro de tambor rotativo a vácuo em escala de laboratório



Construção da unidade experimental

O tambor foi construído a partir de uma tubulação de PVC de 0,30 m de comprimento e 0,30 m de diâmetro. Para a construção da área filtrante, foi necessário perfurar o tambor de PVC com brocas de 1,25 mm, a fim de obter furos com a mesma medida, de acordo com os testes de filtro folha realizados. Foram utilizados, também, uma furadeira Bosch (400 W), e papel milimetrado, para auxiliar na perfuração. Os furos seguiram a disposição indicada na **Figura 13**.

Figura 13. Disposição dos furos no tambor de PVC.



O tambor perfurado está representado pela

Figura 14.

Figura 14. Tambor perfurado



Posteriormente, o tambor teve toda sua superfície externa recoberta pelo meio filtrante, composto por um tecido de algodão (flanela), como pode ser visto na

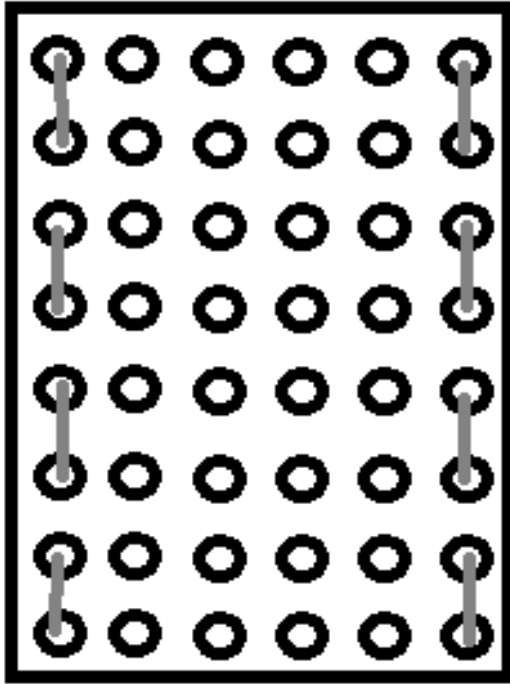
Figura 15.

Figura 15. Meio filtrante costurado ao tambor



A escolha do meio filtrante utilizado na construção do filtro, foi feita durante a etapa dos testes de filtro folha. A fixação do meio filtrante ao tambor foi feita por meio de uma costura com uma linha de nylon, reforçada com cola universal. As linhas foram entrelaçadas (**Figura 16**) nas perfurações da lateral do tambor.

Figura 16. Esquema de costura do meio filtrante ao tambor



Com o intuito de transferir o vácuo gerado pela bomba para o interior do tambor, foi fixada uma tubulação de PVC 1" e 95 cm de comprimento. Essa tubulação foi perfurada ao longo de 28 cm de comprimento com um total de 84 furos de 0,5 cm de diâmetro, dispostos de modo alternado e igualmente espaçados, como apresentado na **Figura 17**.

Figura 17. Disposição dos furos na tubulação fixa de PVC 1"



Depois de perfurada a tubulação de PVC 1", 84 canudos feitos com material plástico resistente foram fixados nos furos de modo a aproximar, o vácuo gerado da parede do tambor, a fim de aumentar a eficiência da filtração e secagem (). Os canudos localizados na parte inferior, local em que o tambor fica imerso na suspensão, foram cortados com 10 cm de comprimento cada, de modo a evitar o seu contato com o líquido filtrado. Enquanto que os outros canudos foram cortados com 12 cm de comprimento

As laterais entre o furo e o canudo foram vedadas com cola de silicone. Posteriormente, para realizar o fechamento das extremidades do tambor, foram utilizados dois Caps de PVC.

Figura 18. Canudos acoplados na tubulação



Em seguida, a uma das extremidades da tubulação interna foram conectados redutores para conectar a mangueira na bomba à vácuo Primatec®, modelo 121, como pode ser visto na **Figura 19**.

Figura 19. Conexão da bomba à vácuo

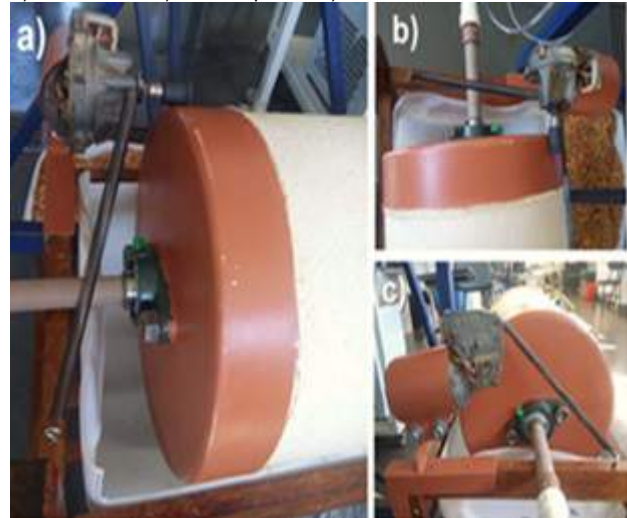


Na outra extremidade da tubulação interna foi conectada uma mangueira de $\frac{1}{4}$ " de diâmetro. Essa mangueira foi passada pelo centro do tambor e em seguida foi colocada em um dos furos do tubo central e desceu até a parte inferior do tambor de modo que ficasse em contato com o filtrado a ser succionado. Para coletar o filtrado, essa mangueira estava acoplada à bomba de limpador de para-brisa automotivo, cuja saída transferia o filtrado para uma proveta por meio de outra mangueira de mesmo diâmetro.

Para promover a rotação do tambor foi utilizado um motor da marca BOSCH®. Na obtenção da rotação desejada, o motor foi conectado a uma fonte DC modelo Power Supply® FA-3005 na qual a tensão e corrente foram manipuladas de acordo com o desejado.

A rotação do Filtro Tambor Rotativo à Vácuo foi efetuada a partir da tração direta entre o eixo do motor, no qual uma ponteira emborrachada foi acoplada à superfície do Cap. Para manter o eixo sempre em contato com a superfície do Cap foi utilizada uma mola, a qual ajustava o posicionamento do motor, como descreve a **Figura 20**. Como a tubulação interna (conectada a bomba de vácuo) deveria permanecer estática durante a operação do filtro em questão, optou-se pela utilização de mancais com rolamento interno com parafuso Allen, que foram acoplados centralmente em cada Cap e pelo interior dos rolamentos passou-se a tubulação que foi conectada à bomba de vácuo.

Figura 20. Acoplamento do motor
a) Vista lateral; b) Vista superior; c) Vista frontal



Uma bombona de plástico de dimensões 36x59 cm foi cortada ao meio a fim de atuar como tanque de armazenamento de suspensão, na qual o tambor rotativo ficou parcialmente imerso.

Para sustentar toda a estrutura necessária para construção do filtro, foi fabricado um suporte de madeira com dimensões apropriadas para o rente encaixe da bombona e disponibilidade para fixação do motor, tubulações, raspador (chapa metálica de zinco galvanizado) e acessórios, como ilustra a **Figura 21**.

Figura 21. Suporte com raspador e acessórios.



Metodologia de operação da unidade experimental

Apesar dos testes de filtro folha terem sido realizados com lodo de caldo de cana, os testes de operação do equipamento foram realizados com suspensão de partículas de maravalha devido ao

vácuo máximo gerado no equipamento durante operação e indisponibilidade de uma bomba mais potente. Por essa razão, foi realizada a troca da suspensão, já que para ser possível filtrar o lodo de caldo de cana, a pressão atingida no equipamento deveria ser de no mínimo 150 mmHg.

O tanque de alimentação foi preenchido com suspensão de maravalha na concentração 90 g/L até o nível correspondente ao ângulo de imersão (72°) do filtro. Em seguida o conjunto filtro e tubulação interna foram fixados ao suporte e o motor posicionado sobre o tambor. Uma das extremidades da tubulação de PVC 1" foi conectada à bomba de vácuo e a outra foi ligada à bomba de sucção de filtrado. Uma fonte DC modelo *Power Supply* FA-3005 com duas saídas forneceu corrente para o funcionamento do motor e da bomba de sucção de filtrado na tensão desejada para cada uma. Para o motor, foi selecionada a tensão de 6 V para 1 rpm. Para a bomba de sucção de filtrado, foi mantida a tensão de 4,3 V para obter uma vazão de 1 L/min.

Para início da operação, o motor foi acionado, mantendo o tambor sob rotação. Em seguida, a bomba de vácuo foi ligada e observou-se a diminuição do nível de líquido dentro do reservatório de alimentação devido à sua entrada no filtro, assim a tubulação de retirada de filtrado foi sifonada e a bomba de sucção foi ligada. O tempo de operação foi suficiente para no mínimo uma rotação do tambor (60 s). Foram coletadas amostras de filtrado e torta que foram encaminhadas para a estufa a fim de avaliar a concentração de sólidos no filtrado e a umidade da torta.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dados obtidos pelo teste de filtro-folha

Os resultados obtidos nos testes de filtro folha serão apresentados e analisados para posterior definição dos valores de projeto utilizados na construção do filtro de tambor rotativo.

Teste 1

Os resultados obtidos nos testes de filtro folha utilizando a primeira suspensão a ser testada, a solução de bagaço de cana peneirada, foram analisados para definir os valores de projeto para a construção do filtro de tambor rotativo. A **figura 22** mostra o resultado qualitativo da torta obtida no teste 1, onde foi usada uma mistura cuja as partículas em suspensão eram grandes e o cap era pequeno, ambas condições originaram uma torta irregular.

Figura 22. Torta formada no teste 1



A **tabela 2** apresenta os dados referentes ao filtrado e à torta obtidos para cada experimento. Também estão relacionados os valores de densidade de filtrado e umidade da torta.

Tabela 2. Valores do volume de filtrado e umidade da torta obtidos no teste 1.

t_f (s)	4	6	8	10
t_s (s)	56	54	52	50
V_f (ml)	422	447	580	685
M_f (g)	413,88	436,09	566,70	677,38
ρ_f (g/cm ³)	0,981	0,976	0,977	0,989
M_u (g)	1,86	10,08	15,42	19,29
M_s (g)	0,52	2,56	4,39	5,25
u (%)	72	75	72	73

No teste 1, foi possível observar que a massa de filtrado aumentou à medida que o tempo de filtração foi mais longo, contudo, a umidade de torta estimada não sofreu alterações significativas em relação ao tempo de secagem. A densidade do filtrado permaneceu entre valores próximos ao da água e foi observado que o mesmo, se encontrava com baixa quantidade de partículas de bagaço de

cana. A fim de obter uma estimativa do tamanho do filtro para essa suspensão, foi selecionado o tempo de filtração de 6 s, que resultou em valores intermediários de formação de torta e produção de filtrado. Isso permitiu o cálculo dos respectivos para diferentes períodos de rotação do tambor como segue na **Tabela 3**.

Tabela 3. Resultados de *scale-up* para diferentes períodos de rotação do filtro em escala laboratorial pelo teste 1

N (rpm)	I (graus)	ts (s)	ψ_1 (cm ³ /cm ² s)
1	36	54	0,3136
1,5	54	34	0,4703
2	72	18	0,6271
3	108	14	0,9406
4	144	9	1,2542

Dos valores calculados, a rotação de 3 rpm foi inicialmente selecionada por fornecer um maior tempo de secagem e um ângulo de imersão viável. A área do tambor foi calculada de modo a fornecer um valor que não preenchesse o recipiente de contenção do filtrado, de volume máximo de 20 L, sem antes completar no mínimo, uma rotação. Os valores referentes ao primeiro projeto feito para o tambor estão relacionados na **tabela 4**. Seus valores foram utilizados somente para nortear o teste 2.

Tabela 4. Valores de projeto do filtro de tambor rotativo com suspensão de bagaço de cana-de-açúcar estipulados no teste 1.

Rotação do motor (N)	3 rpm
Tempo de um ciclo (tc)	20 s
Tempo de filtração (tf)	6 s
Tempo de secagem (ts)	14 s
Ângulo de imersão (I)	108°
$\psi_1 = \psi_2$	0,941 cm ³ /cm ² .s
Área filtrante (A₂)	628 cm ²
Diâmetro do tambor (D)	20 cm
Largura do tambor (L)	10 cm
Produção de filtrado (Q₂)	591 cm ³ /s

Na **tabela 4**, pode-se observar que a alta produção de filtrado e a limitação existente para o volume do recipiente de contenção resultaram num filtro com dimensões restritas de diâmetro e largura, que operará por no máximo 34 s. Assim, o teste 2 foi desenvolvido a fim de utilizar a suspensão realmente filtrada na indústria, que possui concentração maior de sólidos e necessita de um meio filtrante como o tecido de malha mais fechada, de modo a diminuir a quantidade de filtrado produzida e resultar em valores de projeto com maior viabilidade para o filtro de tambor rotativo.

Teste 2

No teste 2, valores de pressão da bomba acima de 150 mmHg não foram utilizados a fim de evitar que a bomba a vácuo disponível não consiga atingir essa pressão ao ser conectada ao filtro em escala de laboratório, ou seja, após realizar o *scale-up*.

A suspensão utilizada nesse teste possuía alta concentração de sólidos em suspensão (lodo de caldo de cana a 40% v/v), portanto, a torta tem formação quase instantânea assim que a bomba de vácuo é acionada. Os valores de tempo de filtração e secagem foram definidos a fim de obter um baixo tempo de filtração e um alto tempo de secagem, com o cuidado de não inviabilizar o ângulo de imersão. Como a rotação mínima do motor disponível era 1 rpm, optou-se por um tempo de filtração de 12 s, com uma secagem de no máximo 48 s. Dessa forma, o ângulo de imersão do tambor será de aproximadamente 72°. Como a solução empregada era mais homogênea e o diâmetro do Cap era maior do que o previamente usado, a torta teve uma melhor aderência na junção meio filtrante-cap, como mostrado na **figura 23**.

Figura 23. Torta obtida no teste 2



A **Tabela 5** apresenta os dados referentes ao filtrado e à torta, dados que foram obtidos em triplicata. Também estão relacionados alguns parâmetros que caracterizam os produtos do experimento, como valores de densidade de filtrado e umidade da torta.

Tabela 5. Valores do volume de filtrado e umidade da torta obtidos no teste 1.

t_f (s)	1	2	3	Média
t_s (s)	21,5	13	14	16,2
V_f (ml)	20,68	11,75	13,31	15,25
M_f (g)	0,982	0,904	0,951	0,939
ρ_f (g/cm ³)	24,05	16,39	21,96	20,80
M_u (g)	5,18	2,84	4,62	4,21
M_s (g)	78	83	79	80

O volume de filtrado apresentou valores consideravelmente baixos em relação aos obtidos no teste 1. Isso ocorreu devido à concentração da suspensão, ao meio filtrante e à resistência promovida pelo cap de PVC.

O valor médio de densidade apresentou valor inferior ao da água, já que a suspensão consistia numa mistura que havia sofrido fermentação alcoólica, possuindo, portanto, certa quantidade de etanol (densidade de 0,789 g.cm⁻³) em sua composição.

Observa-se um valor médio de umidade da torta de cerca de 80%, o que é justificado pela restrição da pressão máxima utilizada no processo, já que, com pressões de vácuo maiores, seria esperado uma maior remoção de umidade da torta ao final da filtração.

De posse do volume de filtrado, foi possível calcular o valor de ψ_1 para posterior *scale-up*, dado que o tempo de um ciclo é de 60 s, resultando em 0,003 cm³/cm².s.

Optou-se pela área de filtragem do filtro em escala de laboratório que fosse a mínima possível de acordo com POLONIO (2004). Assim, pela relação de equivalência do *scale-up* entre o diâmetro do tambor foi de 30 cm e sua largura foi de 30 cm, totalizando uma área A_2 de 2827 cm². Com essa área, foi possível estimar o volume de filtrado produzido pelo filtro, igual a 8,8 cm³/s.

A **Tabela 6** sumariza os valores de projeto do filtro de tambor rotativo a vácuo em escala de laboratório.

Tabela 6. Valores de projeto do filtro de tambor rotativo com suspensão de lama de bagaço de cana

Rotação do motor (N)	1 rpm
Tempo de um ciclo (tc)	60 s
Tempo de filtração (tf)	12 s
Tempo de secagem (ts)	48 s
Ângulo de imersão (I)	72°
$\psi_1 = \psi_2$	0,003 cm ³ /cm ² .s
Área filtrante (A₂)	2827 cm ²
Diâmetro do tambor (D)	30 cm
Largura do tambor (L)	30 cm
Produção de filtrado (Q₂)	8,8 cm ³ /s
Umidade da torta	80%

Operação da unidade experimental

Na operação do equipamento montado, foi utilizada a suspensão de maravalha devido à limitação encontrada no vácuo máximo gerado dentro do filtro. A maravalha foi utilizada como substituição da suspensão do lodo de cana de açúcar que seria a mais indicada a ser aplicada, pois esta por sua vez, não foi fornecida a tempo pela empresa para a realização dos testes.

Embora a pressão de vácuo determinada no projeto tenha sido de 150 mmHg, o vácuo máximo formado foi de 30 mmHg. A partícula utilizada aderiu à superfície do tambor, formando torta de pequena espessura. Deve-se levar em conta que as características da suspensão aplicada geram grande influência nas condições de operação do filtro de tambor rotativo, além da limitação dos próprios equipamentos. A **Figura 24** apresenta a fotografia da torta sobre o filtro durante a operação do filtro de tambor rotativo à vácuo, onde nota-se que algumas partículas da maravalha ficaram fixas na superfície do tambor, gerando a torta. Como a suspensão utilizada não é tão concentrada e a maravalha é também muito leve, não foi possível a formação de uma torta uniforme e que recobrisse toda a superfície do tambor sem deixar espaços vazios.

Figura 24. Formação de torta na superfície do filtro de tambor rotativo à vácuo



Deve-se levar em conta também que, à medida em que o tambor rotacionava, parte desta torta era coletada quando passava pelo raspador, como mostra a **Figura 25**. Além disso o tanque com a suspensão não tinha uma alimentação contínua e nem agitação, sendo assim a suspensão sedimentava. Dessa forma, não foi possível ter uma torta constante e de espessura mensurável durante

a filtração, pois, de acordo com a literatura, a formação da torta auxilia na filtração da suspensão dependendo da sua espessura. A umidade inicial da serragem em suspensão foi de 91%, caindo para 43% após filtrada e descarregada no raspador.

Figura 25. Coleta da torta após passar pelo raspador



O líquido filtrado, que foi retirado do interior do tambor por uma bomba de sucção de limpador de para-brisa automotivo, que é o conteúdo das provetas apresentadas na **figura 26**, foi praticamente isento de sólidos: sua concentração foi de 0,09% (m/m); pode-se notar que sólido obtido após a secagem do filtrado em uma estufa à 90° C durante 48 horas, correspondia a corantes de madeira já contidos inicialmente nas amostras de serragem.

Figura 26. Coleta de filtrado pela tubulação de sucção.



Na operação do filtro, as condições apresentadas na **Tabela 7** foram observadas. Notou-se que a utilização de partículas que não sedimentem rapidamente e possibilitam a formação de torta devem ser priorizadas, já que não há agitação presente no tanque de suspensão.

Tabela 7. Parâmetros de operação do módulo didático: filtro de tambor rotativo à vácuo

Pressão de vácuo	30 mmHg
Rotação do filtro	Até 2 rpm
Ângulo de imersão	72°
Vazão de filtrado	0 a 34 cm ³ /s
Área de filtração	2827 cm ²

CONCLUSÃO

O projeto do filtro de tambor rotativo definiu o seu dimensionamento e condições de operação. Por meio do teste de filtro folha, foram estabelecidos ângulo de imersão, área de filtração, meio filtrante, período de rotação para suspensão de lodo de cana-de-açúcar.

Devido aos gargalos encontrados durante a montagem do equipamento, algumas mudanças

foram realizadas em relação ao que era previsto no projeto. Houve alterações na disposição dos furos no tubo de PVC – superfície do tambor -, na retirada do sistema para lavagem de torta e na suspensão de trabalho, alterando o lodo de caldo de cana de açúcar, que não foi utilizada nos testes finais com o equipamento, para uma suspensão de maravalha.

Para os testes realizados com a suspensão de maravalha, a bomba gerou um vácuo de 30 mmHg no filtro construído, houve discreta formação de torta, e produção de filtrado com baixa concentração de sólidos (0,09% m/m). A umidade final obtida para a torta foi de 43%. Com a geração de um vácuo maior, seria esperada uma maior secagem da torta ao final da filtração.

Com a seleção de uma suspensão adequada, cujas partículas não sedimentem rapidamente e possibilitem a formação de torta à pressão de vácuo atingida, o filtro pode ser utilizado como módulo didático, pois permite a observação do funcionamento do equipamento e das principais variáveis e gargalos que existem em seu projeto.

REFERÊNCIAS

- ARQUED, A. P. **Fabricación del azúcar**. Barcelona: Salvat Editores, 1955. 328 p.
- CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. São Paulo: Signus Editora, vol. 2., 1996, 424 p.
- CREMASCO, M.A. **Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidomecânicos**. São Paulo, Blusher, 2012.
- FIGUEIREDO, K. C. S.; RODRIGUES, G. M. **Filtro de Tambor Rotativo**. Disponível em <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABZNIAC/filtro-tambor-rotativo>>2010. Acesso em: 17 de jul 2016.
- FOUST, A.S., WENZEL, L. A., CLUMP, C.W., MAUS, L., ANDERSEN, L.B. **Princípio das Operações Unitárias**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1982
- FRANÇA, S. C. A. e MASSARANI, G. **Separação sólido-líquido**. In: Luz, A. B., Sampaio, J. A. e Almeida, S. L. M. (Ed.). Tratamento de Minérios. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004, p. 573-607.
- FRANÇA, S. C. A. **Ensaio e filtragem em filtro de folha (Leaf Test)**. Práticas laboratoriais CETEM-MCT, Rio de Janeiro, 2005.
- FRANÇA, S. C. A.; CASQUEIRA, R. G.. Ensaio de filtragem em filtro de folha (Leaf Test). IN: Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2007. p. 411-422.
- MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. Secretaria de segurança e saúde no trabalho. **Portaria nº 25 de 29 de dezembro de 1994**. p. 1987-1989.

PACHECO, T. A. **Como obter o rendimento máximo dos filtros de manga.** Revista Química e Derivados. N. 407, Agosto, 2002.

MOREIRA, M. P.F. **Apostila de Operações Unitárias de Quantidade de Movimento,** Centro Tecnológico: Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos Universidade Federal de Santa Catarina, 2004

PERRY, R. H., BENSKOW, L. R., BEIMESCH, W. E., et al. **Perry's Chemical Engineers' Handbook.** 8ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2008.

POLONIO, W, L. **Análise de diferentes meios filtrantes primários usados em filtro contínuo de tambor rotativo a vácuo para lodo de caldo de cana de açúcar.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Bauru.

POLONIO, W, L. **Avaliação de meios filtrantes primários em filtro contínuo de tambor rotativo a vácuo para lodo de cana.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.26, n.1, p.170-180, jan./abr.2006.

RODRIGUES, G. M.; FIGUEIREDO, K. C. S. **Filtro Tambor Rotativo, 2010.** Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABZNIAC/filtro-tambor-rotativo>>. Acesso em 20 de jul de 2016.

SANTOS, L. C. **Análise da variabilidade do processo de filtração em filtros de tambor rotativo contínuo a vácuo para lodo de cana-de-açúcar.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Bauru-SP.

SOLUÇÕES INDUSTRIAIS. **Galeria de Imagens Ilustrativas referente a Filtro a vácuo FVH: Filtro a vácuo de esteira.** Disponível em: <http://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/empilhadeiras_paleteiras_e_outros_veiculos/fnm-filtrans-filters-national-machine/produtos/filtracao/filtro-a-vacu-fvh>. Acesso em: 13 de nov 2015.

SPENCER, L. S. & MEADE, G. P. **Manual del azucar de cana.** Barcelona, Montaner y Simon, 1967. 946p.