

BATCHPUMP: UMA ALTERNATIVA AO VASO DE PRESSÃO

Adriano Gomes de Freitas¹
Ricardo Borges dos Santos²
Vitor Furlan de Oliveira³
Yuri Oliveira Lima⁴
Luis Alberto Martinez Riascos⁵

Resumo

A busca de melhores soluções de eficiência energética por meio da tecnologia é constante em nosso mundo. Aqui apresentamos uma série de resultados obtidos durante o desenvolvimento de um equipamento para uso industrial, um alimentador de sólidos a granel chamado de Batchpump. Com a proposta de ser uma alternativa ao vaso de pressão convencional, tendo como principais diferenciais em eficiência energética; instalação; dimensão; e custo, este trabalho confronta resultados obtidos para o Batchpump e um vaso convencional aplicados em um sistema de transporte pneumático de calcário em pó em uma linha em escala industrial com 130m de extensão. Imposta uma pressão de entrada de 4 bar, o equipamento Batchpump obteve uma taxa de transporte na ordem de 75% e consumo de ar na ordem de 30% inferior com relação ao vaso tradicional, validando a hipótese sob a qual foi projetado: possuir maior eficiência energética com taxa de transporte similar. Apresentamos nos resultados os dados em ciclo estacionário de transporte em regime de fase densa.

Palavras-chave: Eficiência Energética; Transporte pneumático; Alimentador de sólidos; Inovação.

BATCHPUMP: AN ALTERNATIVE TO PRESSURE VESSEL

Abstract

The search for better energy efficiency solutions through technology is constant in our world. Here we present a series of results obtained during the development of an equipment for industrial use, a bulk solids feeder called Batchpump. With the proposal of being an alternative to the conventional pressure vessel, having as main differentials in energy efficiency; installation; dimension; and cost, this work confronts results obtained for Batchpump and a conventional vessel applied in a pneumatic limestone transport system in powder in an industrial scale line with 130m extension. At an inlet pressure of 4 bar, the Batchpump equipment obtained a transport rate of 75% and air consumption in the order of 30% lower than the traditional vessel, validating the hypothesis under which it was designed: to have a higher efficiency with similar transport rates. We present in the results the data in stationary transport cycle in dense phase regime.

Keywords: Energy efficiency; Pneumatic transport; Solids feeder; Innovation.

¹ Engenheiro de Gestão, Mestre em Engenharia e Gestão da Inovação, Doutorando em Energia, Universidade Federal do ABC -UFABC, Santo André, São Paulo, Brasil.

² Engenheiro Mecânico, Mestre em Engenharia Mecânica, Doutorando em Ciência da Computação, UFABC, Diretor da Zeppelin Systems Equipamentos Industriais LTDA, São Bernardo do Campo, SP, Brasil.

³ Bacharel em Ciência e Tecnologia, Graduando em Engenharia de Controle e Automação, UFABC, Santo André, SP, Brasil.

⁴ Engenheiro de Energia, Mestrando em Energia, UFABC, Santo André, SP, Brasil.

⁵ Engenheiro, Mestre e Doutor em Engenharia Mecânica, Professor na UFABC, Santo André, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Uma das mais importantes técnicas de manuseio de materiais na indústria, o transporte pneumático, consiste na movimentação de sólido particulado dentro de uma tubulação como resultado do deslocamento de ar por meio de um gradiente de pressão induzido. A concentração e comportamento do material no fluxo de ar pode ser utilizada para classificar os sistemas de transporte em geral entre fase densa ou diluída. Este tipo de transporte, já altamente difundido possui expectativa de crescimento de cerca de U\$ 30 bilhões até 2025 (1, 2).

As primeiras utilizações de transporte pneumático, em meados do século XIX (3), ocorreram em fase diluída e assim se manteve até meados dos anos 70, quando se deu o início das aplicações em fase densa (4). Entretanto, estudos já haviam sido realizados com o intuito de prever o comportamento deste tipo de sistema, como por exemplo o diagrama desenvolvido por Zenz na década anterior.

O transporte em fase densa tem como principal objetivo, um deslocamento de material particulado com menor gasto energético, redução na abrasividade do sistema e diminuição nos equipamentos de filtração de ar (1,2,5). Este tipo de transporte é caracterizado por alta pressão e baixa vazão de ar com um alto grau de complexidade, sendo subdivididos em outras caracterizações de transporte como por exemplo fluxo em *plugs* e leito móvel (5).

As características do material correspondem ao fator principal na escolha da fase de transporte que será utilizada no transporte e, uma vez determinada, estabelece requisitos para o projeto do sistema físico, sobretudo com relação à tubulação (tamanho, diâmetro e caminho a ser percorrido) e ao alimentador de sólidos a ser utilizado (6).

Vasos de pressão são equipamentos intermediários em uma linha de transporte, feitos para inserir o material na linha de transporte pneumático. Esta deposição de material na linha se dá de maneira intermitente, isto é, durante um intervalo de tempo, por meio de uma válvula aberta na saída do equipamento do vaso de pressão, o material é depositado na tubulação. No intervalo seguinte, a saída do vaso é fechada, o equipamento é novamente alimentado e o material da linha é transportado. Quando dois vasos de pressão são associados em uma mesma linha, é possível fazer com que o sistema opere em regime contínuo de transporte, embora cada um dos equipamentos continue operando de maneira intermitente (6, 7).

Vasos de pressão possuem aplicabilidades necessárias para sistemas de transporte pneumático que outros equipamentos mecânicos não possuem. Materiais com formatos irregulares podem causar travamentos nestes alimentadores, além da utilização de diversos mecanismos de confiabilidade que aumentam a complexidade deste tipo de equipamento (7).

Os equipamentos do tipo vaso ejetor geralmente possuem capacidade de reter algumas centenas de litros de material a ser inserido na linha. Por esta razão, podem possuir dimensões que, se somadas ao tamanho das válvulas que fazem o controle da entrada e saída de material, podem chegar a alguns metros de altura. Para serem inseridos em uma planta fabril pré-existente, por exemplo abaixo de um silo ou moega, exigem que o dispositivo de alimentação seja elevado ou que seja feito um rebaixo no solo para acoplamento do vaso (8, 9)

Ao identificar a possibilidade de inserir no mercado um alimentador de sólidos que permitisse a redução de custos e complexidade de um sistema de transporte, a empresa Zeppelin Systems Latin America desenvolveu um protótipo de uma versão alternativa de vaso de pressão. Projetado para operar especificamente em fase

- Pressão de entupimento (PSHH) – valor de pressão ajustável correspondente ao que se considera linha entupida e se encerra o transporte. Este valor foi imposto até 4 bar, mesmo valor utilizado como pressão máxima da fonte.
- Pressões para ar auxiliar (PSL1 e PSL2) – pressões para as quais há abertura (PSL2) e fechamento (PSL1) da válvula de ar auxiliar
- Pressões para ar de transporte – pressões em que há abertura (PSH1) e fechamento (PSH2) da válvula de alimentação de ar para transporte.
- Pressão para final de ciclo (PSLL) – pressão para a qual as válvulas de ar auxiliar são fechadas. Final do ciclo de transporte. Obs: para os testes com o Batchpump, variou-se apenas a pressão de final de ciclo

As variáveis de saída utilizadas como base para avaliação de desempenho foram: pressão de transporte; vazão de ar injetado (posteriormente corrigida para vazão em descarga livre); massa transportada. Todas estas variáveis foram mapeadas em uma base de tempo e através delas foi possível definir os indicadores de desempenho do sistema pneumático. São eles:

Taxa de transporte (\dot{m}): Quantidade total de massa (M_T) transportada pelo sistema durante o intervalo de tempo avaliado (Δt). Em termos matemáticos, é dada pela equação (1) abaixo apresentada:

$$\dot{m} = \frac{M_T}{\Delta t} \quad (1)$$

Taxa mássica (Φ): A taxa mássica foi obtida com base nos dados coletados de massa total medida em kg, volume total de ar medido em m^3 e densidade do ar a $25^\circ C$, $1,1839 \text{ kg}/m^3$. O cálculo para obter a taxa mássica está descrito em (2);

$$\phi = M_{total}/(V_{total}\rho) \quad (2)$$

2.2 Procedimento experimental

Durante a realização deste experimento, realizou-se múltiplos ciclos de transporte com ambos os alimentadores, ou seja, o vaso de pressão convencional e o vaso de pressão desenvolvido - Batchpump. O material escolhido para os testes foi o calcário calcítico, pois é utilizado largamente no mercado brasileiro pelo setor agrícola para controle de pH e estabilização do solo; em construção civil; mineração; e etc. O calcário calcítico é composto de minérios que implicam em alta abrasividade, de maior unicidade de componentes dificultando a formação de aglomerados, porém devido a cargas eletrostáticas pode-se mostrar com alta coesividade (10, 11). Estas características do material testado, são alguns dos motivos pela seleção do comparativo entre equipamentos que podem operar em fase densa, como o vaso de pressão ou o Batchpump.

2.2.1 Ciclo de transporte: Batchpump

O material inicia na moega pulmão acima do Batchpump, este material é inserido no Batchpump por duas válvulas para dosagem, a superior com função de retenção de material e a inferior com função de estanque de ar. Depois da dosagem, inicia-se o denominado “ciclo de transporte” com a abertura de ar de transporte, que insere ar à pressão da fonte (ajustada em 4 bar) no sistema e posterior fechamento da válvula

quando a pressão da linha é inferior ao valor ajustável PSL, determinando o fim de “ciclo de transporte”. Repete-se este ciclo de transporte até que haja uma quantidade de material pré-definida na moega de recebimento e então se reinicia o processo devolvendo este material para a moega pulmão a partir da moega de recebimento. Este ciclo completo é definido como “ciclo de massa”.

2.2.2 Ciclo de transporte: Vaso de pressão

O material presente na moega pulmão sobre o vaso de pressão é inserido no vaso de pressão com a abertura das válvulas sobre o vaso, a superior com função de retenção de material e a inferior com função de estanque de ar. Depois de realizada esta transferência de massa inicia-se o denominado “ciclo de transporte” com a abertura de respectivamente: válvula de alimentação de ar, que insere o valor de pressão da fonte (ajustada em 4 bar) no sistema, válvula de pressurização e válvula de ar suplementar constante.

Com a abertura destas válvulas inicia o transporte de material pela tubulação. Caso a pressão se exceda de um valor de PSL2 abre-se a válvula de ar suplementar, caso a pressão continue a subir excedendo o valor de PSH2 fecha-se a válvula de pressurização, caso a pressão exceda o valor de PSHH fecha-se todas as válvulas envolvidas no transporte. Caso a pressão baixe o valor de PSH1 abre-se a válvula de pressurização, caso a pressão baixe de PSL1 fecha-se a válvula de ar suplementar V-22 e caso a pressão baixe de PSL fecha-se a válvula de alimentação de ar.

Depois de atingir o valor mínimo de pressão considera-se o transporte realizado com sucesso, finalizando o “ciclo de transporte”. Este material é devolvido para a moega pulmão a partir da moega de recebimento e reinicia-se novamente o processo. Este ciclo completo é denominado de ciclo de massa.

2.2.3 Definição dos testes

Os testes foram realizados variando-se a variável de entrada PSL para ambos os ciclos diferentes de transporte. Para os testes, a variável de pressão da fonte foi fixada em 4 bar, foi considerado enchimento total do alimentador e foi mantido o mesmo material e não se alterou a linha de transporte. Os testes realizados estão descritos na Tabela 1 para o Batchpump e na Tabela 2 para o vaso de pressão convencional.

Tabela 1. Parâmetros utilizados nos testes com o Batchpump

Teste	PSL (bar)
1	0,5
2	0,75
3	1
4	1,25
5	1,4
6	1,5
7	1,6
8	1,65
9	1,75
10	2

Tabela 2. Parâmetros utilizados nos testes com o vaso de pressão

Teste	PSHH (bar)	PSH1 (bar)	PSH2 (bar)	PSL1 (bar)	PSL2 (bar)	PSLL (bar)
1	4	2	1,8	1,5	1,2	0,5
2	4	2,5	2,3	2	1,7	1
3	4	3	2,8	2,5	2,2	1,5

Para o transporte com o vaso de pressão, além das válvulas pneumáticas existem válvulas manuais para controle de fluxo de ar para: pressurização do vaso, fluidização do material, transporte do material e ar auxiliar. Para aumentar o limite superior da coleta de dados, todas as válvulas manuais foram abertas 100%, de forma a facilitar ao máximo a obtenção dos pontos.

Para simplificação, adotou-se um incremento constante em todas as variáveis do vaso de pressão (com exceção da pressão de entupimento que foi mantida constante e igual ao valor de pressão da fonte). Para a nomenclatura de cada teste será considerada apenas a pressão de fim de ciclo (PSLL) em ambos os casos.

2.3 Resultados e discussão

Os resultados obtidos com os testes de transporte pelo ciclo do Batchpump estão descritos na Tabela 3. Os resultados para o vaso de pressão estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 3. Resultados dos testes de transporte com o Batchpump

PSLL (bar)	Taxa de transporte (kg/h)	Taxa mássica ($\text{kg}_{\text{mat}}/\text{kg}_{\text{ar}}$)
0,5	6045	16
0,75	7853	22
1	7686	26
1,25	8224	30
1,4	8645	32
1,5	8669	36
1,6	8670	38
1,65	8885	41
1,75	8624	42
2	8108	50

Tabela 4. Resultados dos testes de transporte com o Batchpump

PSLL (bar)	Taxa de transporte (kg/h)	Taxa mássica ($\text{kg}_{\text{mat}}/\text{kg}_{\text{ar}}$)
0,5	11625	26
1	13104	31
1,5	9695	38

Utilizou-se uma coleta mais extensiva do Batchpump em comparação com o vaso de pressão convencional, devidamente por causa deste equipamento ser não usual. Os valores tabelados foram plotados em curvas na Figura 2 e na Figura 3.

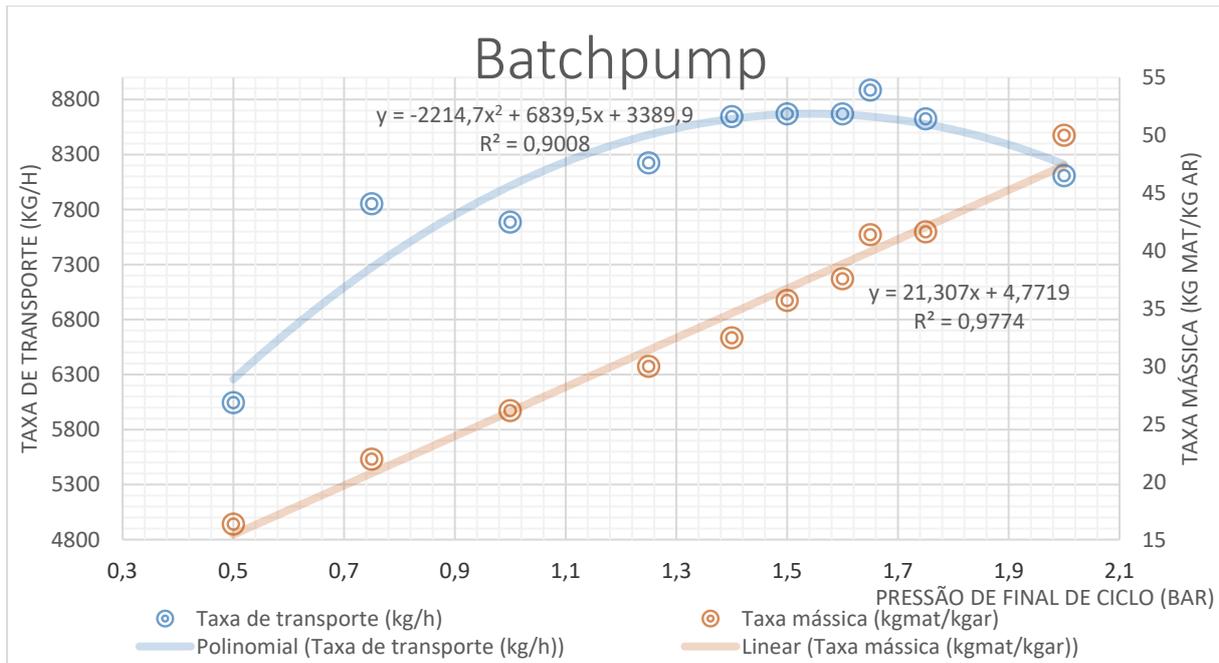


Figura 2 Curvas de taxa de transporte e de taxa mássica para o Batchpump

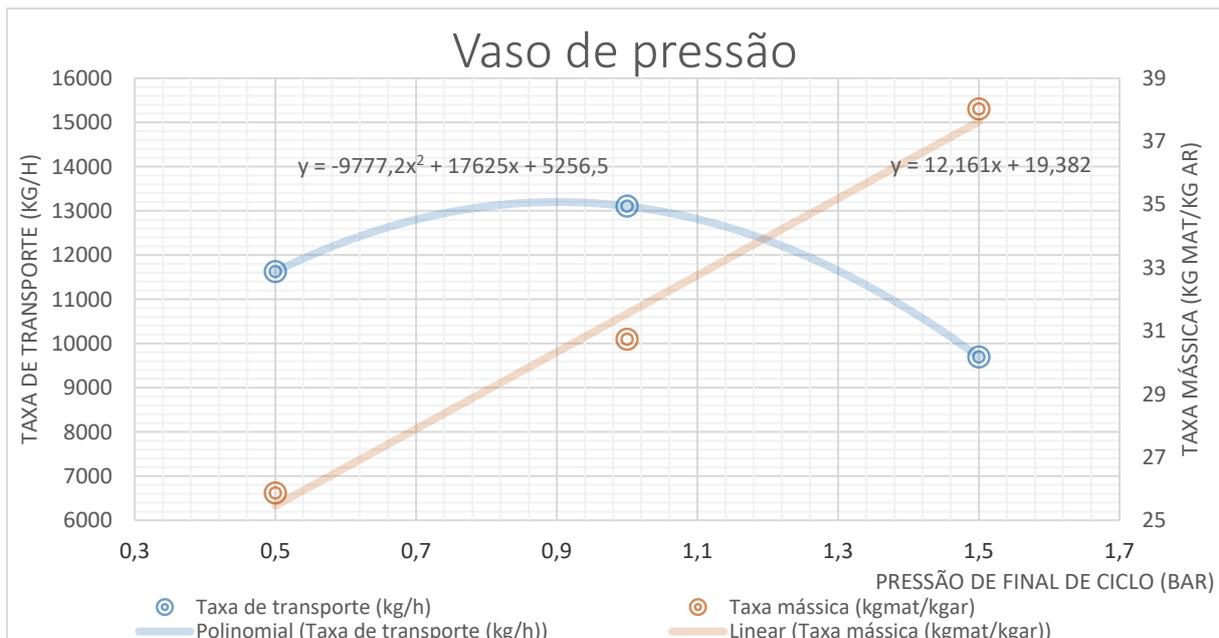


Figura 3. Curvas de taxa de transporte e de taxa mássica para o vaso de pressão de 0,6m³

Percebe-se que ambos os distintos ciclos de transporte possuem características similares de comportamento para ambas as variáveis de saída observadas. A taxa de transporte demonstra um comportamento quadrático com ponto ótimo de operação, enquanto a taxa mássica apresenta um comportamento linear para ambos os casos.

2.3.1 Limites de transporte

Partiu-se da hipótese que o vaso de pressão convencional deveria possuir limites de transporte superiores ao Batchpump, ou seja, seria possível a realização de testes cortando o ar em pressões superiores às apresentadas nos testes com o

Batchpump, visto que a operação foi realizada com o máximo de abertura possível de ar em todas as válvulas, porém isto não se mostrou verdadeiro. Os testes com o vaso de pressão apresentaram instabilidades em pressões inferiores às observadas com o Batchpump. Estas instabilidades são definidas a partir de uma alta variação na duração de transporte entre um ciclo e outro, tornando o transporte muito difícil de prever. A instabilidade encontrada no vaso de pressão pode ser vista na Figura 4.

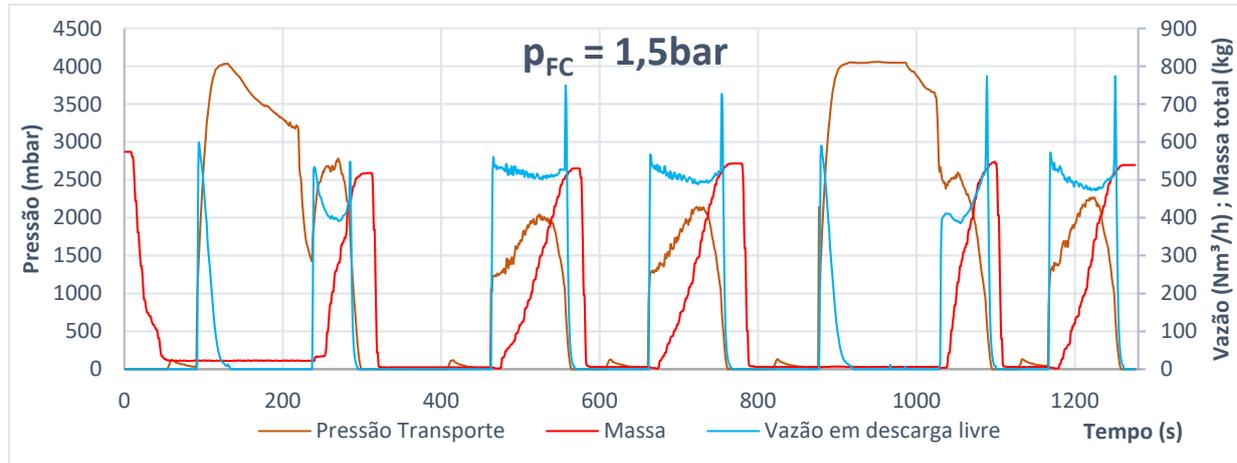


Figura 4. Curva de transporte para vaso de pressão com abertura em 1,5bar

Observando os 5 ciclos de transporte na Figura 4 nota-se que existe uma similaridade entre o comportamento dos ciclos 2, 3 e 5, porém percebe-se que os ciclos 1 e 4 possuem uma alta discrepância em relação aos outros. Esta diferença é definida como uma instabilidade de transporte, a qual impacta negativamente na taxa de transporte média.

2.3.2 Curvas de transporte

Percebeu-se distinção clara entre as curvas de massa obtidas para o vaso de pressão e pelo Batchpump. Para realizar este comparativo, primeiramente se viu a necessidade de confirmar se há repetitividade no comportamento de cada ciclo de transporte. Para esta avaliação desta fonte de incerteza, os inícios das curvas de ciclo de transporte foram trazidos à um mesmo instante de tempo e obteve-se a incerteza expandida das correspondentes taxas de transporte. Isto pode ser visto na Figura 5.

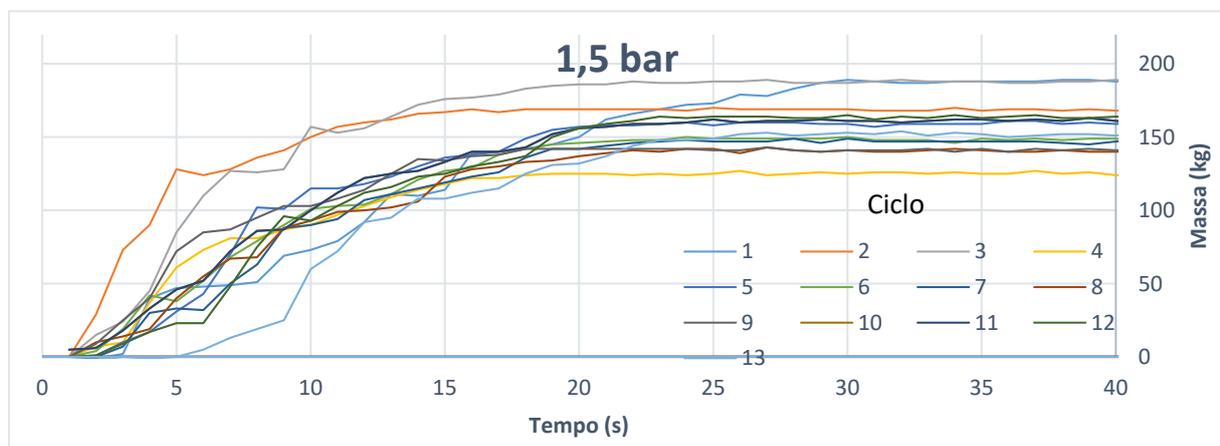


Figura 5. Curvas de massa no tempo inicial para o Batchpump

A satisfatória repetitividade (5.93%) aponta para a constância entre os ciclos de transporte do Batchpump. A diferença associada aos ciclos iniciais em relação aos demais é decorrente do fato de que, no início, não há a mesma resistência ao transporte observada nos ciclos subsequentes devido ao acúmulo de massa na tubulação. Portanto afirma-se que é possível a escolha de um único ciclo representativo para descrever o transporte de cada teste definido pela pressão de fim de ciclo. Para o transporte com o vaso de pressão, utilizou-se da mesma metodologia e o valor obtido foi de 12.73%. Pode-se ver as curvas utilizadas para avaliação da repetitividade na Figura 6.

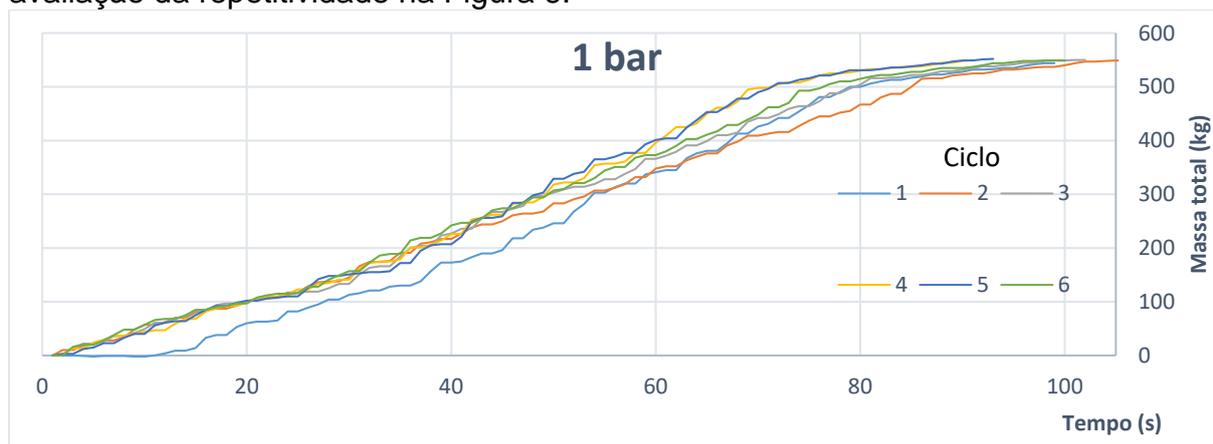


Figura 6. Curvas de massa no tempo inicial para o vaso de pressão.

Além disso, em cada descarregamento do Batchpump, percebe-se que há um comportamento exponencial para a transferência de massa, isto não é observado no vaso de pressão convencional devido a seu maior volume e sua maior complexidade pelo acionamento de diversas válvulas auxiliares de transporte. Com o aumento da resistência de transporte, há uma maior adição de ar para transporte que pode implicar em uma maior linearidade da massa transportada.

2.3.3 Curvas comparativas

As comparações entre as curvas características de cada equipamento e as respectivas taxas de transporte foram realizadas utilizando ciclos representativos de cada teste, escolhendo trechos dos ciclos de modo que fosse possível considerar regime estacionário. Tendo em vista que o sistema não dispõe de chaves de nível, o tempo de enchimento foi estimado experimentalmente em 20 s para o Batchpump e 40 s para o vaso de pressão. Considerando estes valores e os equipamentos inicialmente vazios, foi possível estimar o tempo que cada um dos equipamentos demora para transportar uma quantidade fixa de massa, 400 kg. A figura 7 ilustra estas comparações.

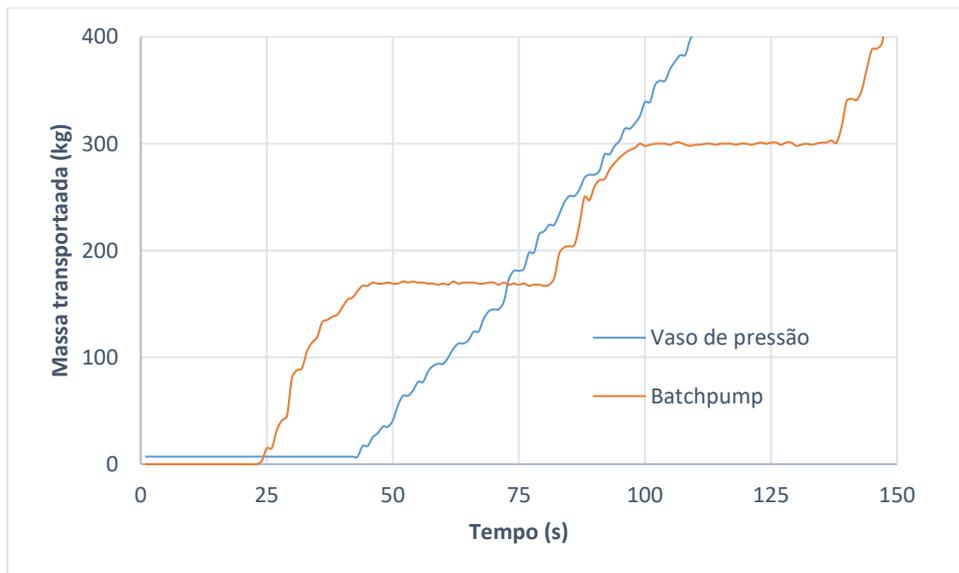


Figura 7. Comparativo das curvas de massa entre o vaso de pressão e o Batchpump.

Percebe-se que, mesmo com o tempo de dosagem maior do vaso de pressão, este equipamento é capaz de atingir um valor pré-determinado de massa transportada maior, o que faz com que o mesmo tenha uma maior taxa de transporte em relação ao Batchpump, embora esta diferença não seja considerável para justificar a escolha de um equipamento com complexidade, tamanho e custo tão superiores que é o vaso de pressão.

3 CONCLUSÃO

A partir das comparações percebe-se que o Batchpump apresentou em seu melhor ponto obtido, um consumo de ar cerca de 25% e uma taxa de transporte de cerca de 30% menores a da apresentada pelo melhor ponto obtido no vaso de pressão convencional cujo volume é 6 vezes superior, de forma a comprovar que é possível a substituição deste vaso de pressão por um equipamento de menor tamanho sem uma perda significativa em sua taxa de transporte.

Nota-se também no Batchpump que, mesmo em taxas de transporte inferiores, apresenta o maior coeficiente angular na curva de massa. Espera-se nos próximos desenvolvimentos, a redução no tempo de dosagem a este equipamento, modelando o limite de transporte superior. Juntamente com testes de planejamento de experimentos e confiabilidade por meio das curvas de transporte obterem boas previsões de comportamento no sistema apresentada nos testes.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processo: 163815/2018-6, à Universidade Federal do ABC, em particular ao programa de Doutorado Acadêmico Industrial e Programa de Pós-graduação em Energia, e a empresa Zeppelin Systems Latin America pela assistência financeira e o suporte garantido durante o presente projeto.

REFERÊNCIAS

- 1 Klinzing GE. A review of pneumatic conveying status, advances and projections. Powder technology. 2018;333: 78-90.
- 2 Lavrinec, A, Orozovic O, Williams K, Jones MG, Klinzing G, Clark W, Wang Z. Observations of dense phase pneumatic conveying using an inertial measurement unit. Powder Technology. 2019 (acesso em 26 jun. 2019); 333:78-90. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2018.11.039>.
- 3 Klinzing, George E. Historical Review of Pneumatic Conveying. Kona Powder And Particle Journal. 2018 (acesso em 26 jun. 2019); 35:150-159. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14356/kona.2018010>.
- 4 Martinussen SE, phd Dissertation: The influence of the physical characteristics of particulate materials on their conveyability in pneumatic transport systems, Telemark University College, Porsgruun, Norway 1996.
- 5 Mills D, Jones MG, Agarwal VK. Handbook of Pneumatic Conveying Engineering. Florida: CRC Press; 2004.
- 6 Freitas AG, Santos RB, Lima YO, Oliveira VF e Riascos LAM. Energy efficiency in the development of an innovative industrial pressurized solids feeder for pneumatic conveying systems. International Journal Of Development Research, 2019;09(04):27147-27152.
- 7 Kus FT, Duchesne MA, Champagne S, Hughes RW, Ku DY, Macchi A, Mehrani P. Pressurized pneumatic conveying of pulverized fuels for entrained flow gasification. Powder Technology. 2016(KLINZING, George E. Historical Review of Pneumatic Conveying. Kona Powder And Particle Journal. 2018 (acesso em 26 jun. 2019); 287:403-411. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2015.10.028>.
- 8 Kumar, P. An Investigation into Blow Tank Performance and Solids Friction for Pneumatic Conveying of Fine Powders. Dissertação (Mestrado) - Curso de Thermal Engineering, Departament Of Mechanical Engineering, Thapar University, Patiala. 2015 (acesso em 26 jun. 2019); 1:1-71. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10266/3366>
- 9 Freitas AG, Santos RB, Lima YO, Oliveira VF e Riascos LAM. University-industry interaction for the development of innovations. International Journal Of Development Research. 2019;9(05):27738-27743.
- 10 Diederich P, Mouret M, De Ryck A, Ponchon F, Escadeillas G. The nature of limestone filler and self-consolidating feasibility—relationships between physical, chemical and mineralogical properties of fillers and the flow at different states, from powder to cement-based suspension. Powder technology. 2012;218:90-101.
- 11 Lumay G, Boschini F, Traina K, Bontempi S, Remy, JC, Cloots R, Vandewalle N. Measuring the flowing properties of powders and grains. Powder Technology. 2012;224:19-27.