



LEITO DE JORRO COM DIFERENTES AGITADORES MECÂNICOS: FLUIDODINÂMICA, SECAGEM DE PASTA E DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO PRODUTO

JOÃO P. A. A. BARROS^{1*}, FÁBIO B. FREIRE¹, JOSÉ T. FREIRE¹

¹Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
*e-mail: joaopedroaab@gmail.com

RESUMO – Os leitos de jorro agitados mecanicamente têm ganho cada vez mais atenção devido aos seus benefícios frente aos equipamentos convencionais. Tendo isso em vista, o objetivo desse trabalho foi fazer uma análise comparativa entre essas configurações, empregando diferente tipos de agitadores mecânicos (Pás-retas, pás-inclinadas e parafuso). A inserção dos agitadores dentro do leito proporcionou uma redução nos parâmetros fluidodinâmicos, principalmente em relação a vazão de ar necessária para agitar o leito, mas o agitador tipo parafuso apresentou os piores resultados. A velocidade de rotação dos agitadores teve influência na cinética de secagem, umidade e granulometria do produto, além de apresentar um efeito positivo no comportamento fluidodinâmico devido a redução da vazão de ar e da queda de pressão. Já no processo de secagem foi observado diferenças somente no regime transiente. De modo geral, o uso de agitadores no leito pode favorecer novas aplicações além de ampliar as faixas de operação do equipamento, uma vez que não há problemas de colapso do jorro e grandes instabilidades.

INTRODUÇÃO

O processo de secagem de alimentos ocorre desde os tempos antigos com o objetivo de reduzir a umidade e assim conservá-los por mais tempo. Como é comum da evolução, novas tecnologias, processos e equipamentos tem sido desenvolvido para facilitar e aprimorar o processo de secagem. Dentre esses equipamentos, o leito de jorro convencional (LJC) vem sendo estudado desde sua descoberta em meados de 1954, apresentando como principais vantagens o leito homogêneo e alta circulação de partículas, na qual promove elevadas taxas de transferência de calor e massa (Mathur e Epstein, 1974). Devido essas características, o leito de jorro é utilizado para diversas aplicações, como secagem de sólidos, pastas e suspensões (Brito et al., 2020; Freire et al., 2012), revestimento de partículas, como alimentador de sólidos em linhas de transporte pneumático, reatores catalíticos e pirólise

(Barcelos et al., 2020; Bilbao; et al., 1987; Liu et al., 2020; Sousa e Ferreira, 2020).

Nas operações com leito de jorro, além dos benefícios apresentados, também existe o custo de aquisição, construção e manutenção que são relativamente baixos quando comparados com outros equipamentos. Apesar disso, existem algumas desvantagens que devem ser levadas em consideração, pois podem inviabilizar seu uso.

Para a secagem de pastas, os problemas operacionais mais comuns são: aglomeração e acúmulo de material no leito, instabilidade, elevada queda de pressão para iniciar a operação, além de dificuldades em projetar e operar equipamentos de grande escala (Barret e Fane, 1990; Barros et al., 2019; Pablos et al., 2019; Souza e Oliveira, 2005). Em relação aos custos, a maior desvantagem é a elevada demanda de ar necessária para manter o leito em regime estável, vazão essa muito maior do que o necessário para a própria secagem, reduzindo a eficiência energética (Brito et al., 2018; Kudra et al., 1989).

Nesse contexto, algumas modificações foram sendo propostas nesse equipamento com o objetivo de superar as limitações do equipamento convencional. As principais são a geometria cônica (leito de jorro cônico), o uso de dispositivos internos (*draft tube* e confinadores de fonte) e a inserção de agitadores mecânicos (leito de jorro mecânico) (Markowski e Kaminski, 1983; Olazar et al., 1999; Szentmarjay et al., 1996).

Dentre esses, o leito de jorro com agitador mecânico (LJAM) vem se destacando por apresentar melhorias significativas ao equipamento convencional. Ao contrário do LJC que utiliza exclusivamente a vazão de ar para movimentar as partículas, o LJAM emprega de forma simultânea a contribuição do agitador e da vazão ar. Desta forma, pode-se utilizar a vazão de ar somente para secagem propriamente dita, proporcionando uma redução nos custos de operação. Além disso, a presença do agitador mecânico em processos de secagem pode contribuir com a quebra de aglomerados e evitar o acúmulo de produto no leito.

Assim, os benefícios do LJAM impulsionam para que novos estudos sejam desenvolvidos ampliando as aplicações dessa nova configuração. Desta forma, esse trabalho tem como objetivo desenvolver novos tipos de agitadores mecânicos e testar um modelo já existente, analisando-os em relação ao comportamento fluidodinâmico das partículas no leito, distribuição granulométrica do material obtido na secagem de pastas e soluções. Para isso, experimentos foram conduzidos com três configurações de agitadores, pás-retas, pás-inclinadas e parafuso helicoidal, sob diferentes velocidades de rotação.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos realizados nesse trabalho foram desenvolvidos no laboratório do Centro de Secagem de Pastas, Sementes e Suspensões, localizado no Departamento de Engenharia Química (DEQ) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) em São Carlos – SP.

Unidade experimental

Foi utilizado um leito de jorro cônico-cilíndrico (LJC) de aço inoxidável com ângulo

externo de 60°. Após ter realizado os ensaios com o equipamento convencional, um agitador foi inserido no leito, modificando-o para leito de jorro com agitador mecânico (LJAM).

Na Figura 1 é apresentado a unidade experimental e na Figura 2 os detalhes das diferentes configurações dos agitadores.

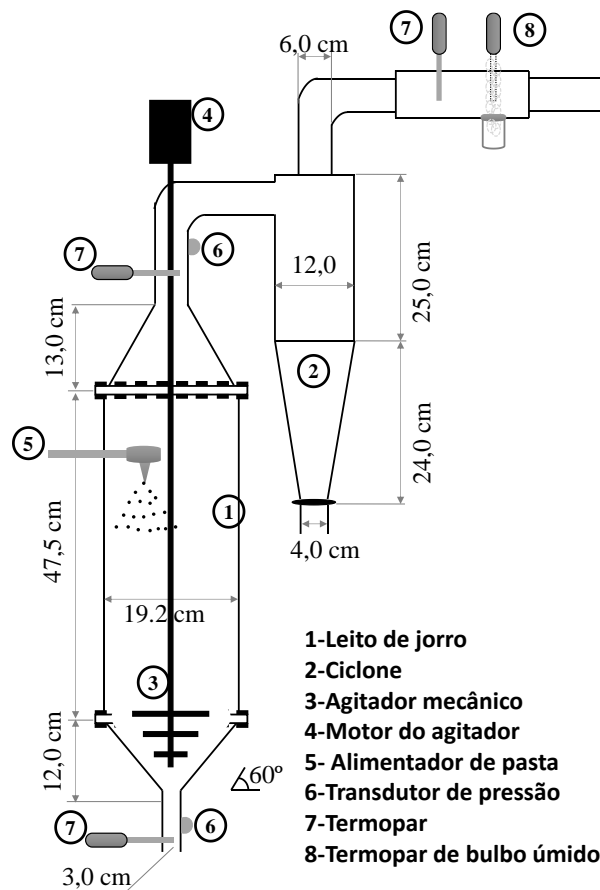


Figura 1: Unidade experimental.

O fornecimento de ar foi proveniente de um soprador, sendo sua corrente controlada pelo inversor de frequência. A vazão de ar da linha era determinada por um medidor de vazão tipo placa de orifício. As medidas de pressão da placa de orifício e do leito (item 6 – Figura 1) foram realizadas usando transdutores de pressão e a temperatura do ar medida por termopares (item 7 – Figura 1).

Para a secagem de pasta e suspensões, foi utilizado um alimentador e atomizador de pasta como demonstrado no item 5 da Figura 1, no qual realiza a mistura do líquido e do ar comprimido (atomizador de duplo fluido). Para a suspensão de carbonato de cálcio, foi utilizado um recipiente com agitação constante para evitar precipitação da suspensão. O esquema

convencional é obtido para a configuração com agitador mecânico. Este comportamento, pode ser justificado devido à geometria e a posição do agitador mecânico, que foi colocado no centro do leito. Assim, existe inicialmente um leito fixo de partículas entre a entrada de ar e a extremidade inferior do agitador, no qual explica o comportamento fluidodinâmico semelhante ao equipamento convencional.

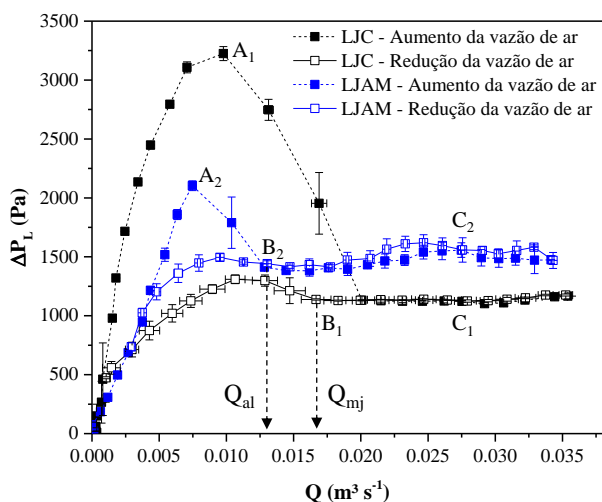


Figura 3: Queda de pressão das partículas em função da vazão de ar para LJAM e LJC (Vidro, 3 kg, 2,2 mm, pás-retas e 120 rpm).

Além disso, quando o agitador estava em movimento, ocorria a formação de uma força centrífuga que “lançava” as partículas para próximo a parede, formando um canal preferencial no centro do leito. Esse fenômeno de alargamento do canal favorece a passagem de ar, reduzindo a queda de pressão no leito, como observa-se na Figura 3. Tal processo é facilitado pela característica do agitador, uma vez que devido às pás possuírem comprimento suficiente para ficarem próximas da parede do leito, estas melhoram a movimentação dentro do leito. Desta forma, as partículas são movimentadas pela contribuição simultânea da vazão de ar (força ascendente) e o agitador (força centrífuga), facilitando a movimentação das partículas e a passagem de ar dentro do leito.

Apesar desses resultados, estudos da literatura indicam que cada tipo de configuração do agitador pode ocasionar um tipo de comportamento fluidodinâmico. Reyes e Vidal (2000) observaram comportamento semelhante ao de um leito fluidizado com a inserção do agitador de geometria cônica, enquanto Sousa et al. (2019) relataram uma

queda de pressão quase constante à medida que a vazão de ar aumentava com o agitador tipo parafuso helicoidal. Esses resultados sugerem que o comportamento dinâmico do leito de jorro com agitação mecânica é função da geometria do agitador empregado.

Mesmo com uma semelhança entre as curvas fluidodinâmicas, existe diferenças quantitativas que devem ser observadas em relação aos parâmetros fluidodinâmicos. Essas diferenças são apontadas na Figura 3 com letras (A, B e C), para o equipamento convencional (1) e leito de jorro com agitador mecânico (2).

Durante o processo de aumento da vazão de ar, o leito de jorro convencional teve um aumento linear na queda de pressão, comportamento análogo ao leito fluidizado. Esse comportamento ocorre até a região A₁, onde observa-se a queda de pressão máxima (ΔP_{max}). Enquanto para o leito de jorro com agitador mecânico o mesmo processo ocorre (A₂), mas verifica-se que os valores da ΔP_{max} com agitação são inferiores ao LJC, fato esse justificado devido a presença do agitador o que faz com que uma menor energia seja necessária para iniciar a formação do canal no centro do leito. Após essa região de máxima queda de pressão, ocorre uma brusca redução da queda de pressão devido ao rompimento do leito e formação do jorro, enquanto na presença do agitador mecânico um processo similar pode ocorrer na região entre o distribuidor e o agitador, favorecendo a formação do jato mecânico. Com maiores vazões de ar, ambos os equipamentos não apresentam grandes variações na queda de pressão, mas são regiões mais instáveis (C₁ e C₂) que podem provocar mudanças nos regimes fluidodinâmicos e até o transporte pneumático das partículas.

No processo de redução da vazão de ar, nota-se que para o LJC uma vazão de mínimo jorro é obtida na região (B₁), sendo essa a menor energia fornecida pela vazão de ar para manter o jorro estável e que não ocorre o colapso do jorro, causando um aumento da queda de pressão. Esse comportamento é típico do leito de jorro convencional (Mathur e Epstein, 1974; Perazzini et al., 2017). Em comparação com o equipamento com agitação mecânica, o movimento das partículas é dado pela contribuição simultânea da vazão de ar e da rotação do agitador. Além disso, o então

conhecido como região do jorro no equipamento convencional, foi substituído pelo jato mecânico devido a presença do agitador, mas já evidenciado em outros estudos (Németh et al., 1983; Szentmarjay; Pallai, 1989). Desta forma, ambas as configurações apresentaram regiões de movimentação de partículas similares, com uma região mais densa próxima a parede, uma região intermediária e no centro o jato mecânico ou o jorro, para o equipamento com e sem agitação mecânica, respectivamente.

Levando em consideração as características de ambos os equipamentos mencionados anteriormente, foi estipulado que o ponto indicado por B₂ na Figura 3 representa a vazão de ar para agitar o leito (Q_{al}). Esse parâmetro foi determinado devido ao ponto B₂ representar uma intersecção no gráfico entre a corrente de aumento e a redução da vazão de ar. Desta forma, essa técnica permite determinar uma vazão de ar menor do que a vazão do equipamento convencional devido à contribuição da agitação mecânica no leito.

Procedimento similar ao de pás-retas foi utilizado para determinar a vazão de ar em leitos agitados mecanicamente, como apresentado na Figura 4 para agitadores de pás-inclinadas e parafuso helicoidal.

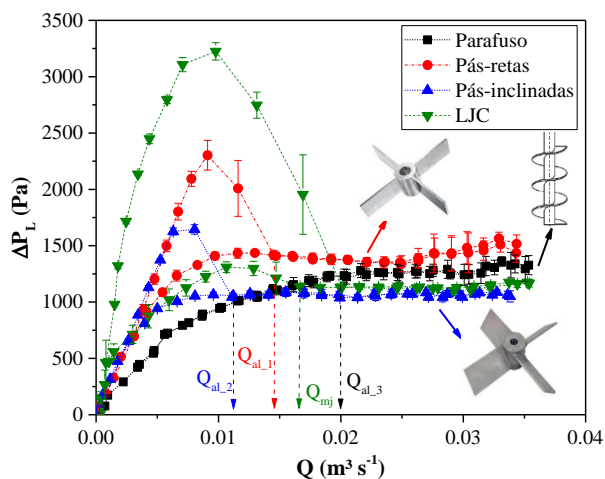


Figura 4: Queda de pressão das partículas em função da vazão de ar para diferentes agitadores mecânicos (Vidro, 3 kg, 2,2 mm e 60 rpm).

Do mesmo modo que o agitador de pás-retas, o agitador de pás-inclinadas apresentou comportamento fluidodinâmico similar ao equipamento convencional. Fato esse justificado devido a configuração do agitador, como explicado anteriormente. Desta forma, foi

determinado a vazão de ar necessária para agitador o leito seguindo o mesmo procedimento explicado na Figura 3. O resultado pode ser visto na Figura 4, indicado como Q_{al,2}. Apesar da similaridade entre as curvas, existe uma diferença quantitativa observada pelos menores valores dos parâmetros fluidodinâmicos, como queda de pressão e principalmente a menor vazão de ar. Ou seja, a vazão de ar para o agitador do tipo pás-inclinadas (Q_{al,2}) foi aproximadamente 32% menor do que para pás-retas (Q_{al,1}) e 38% menor do que o para o equipamento convencional (Q_{mj}). Esse resultado já era esperado, uma vez que a inclinação das pás auxilia na melhor movimentação, realizando um movimento ascendente das partículas.

Para o agitador tipo parafuso helicoidal, nota-se um comportamento fluidodinâmico diferente dos demais, sendo justificado tanto pela configuração do agitador, quanto pela posição desse no leito. Uma vez que não existe um espaço entre o distribuidor de ar e o início do agitador como nos outros agitadores. Sendo assim, um procedimento diferente foi utilizado para determinar a vazão de ar necessária para agitar o leito do parafuso (Q_{al,3}), como apresentado na Figura 5.

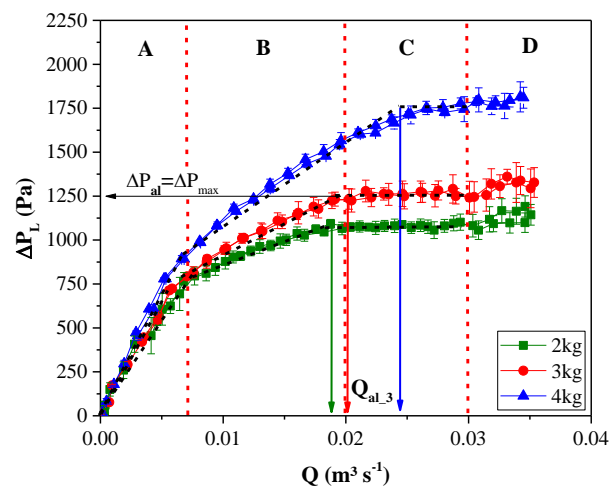


Figura 5: Queda de pressão das partículas em função da vazão de ar com parafuso helicoidal (Vidro, 3 kg, 2,2 mm e 120 rpm).

Na Figura 5 apresenta a queda de pressão em função da vazão de ar para o parafuso helicoidal, com diferentes massas de partículas. Nota-se que diferente das outras configurações observadas nas Figuras 4, o parafuso não apresenta uma curva acentuada devido a

expansão do leito e formação da região do jorro ou do jato mecânico. Apesar desse resultado, observa-se que ocorre uma variação significativa na queda de pressão em função do aumento da vazão de ar. Um comportamento similar já foi observado por Reyes e Vidal (2000) para agitador cônico, onde notou-se um aumento linear da queda de pressão e logo em seguida uma região estável (obtendo uma reta na queda de pressão). Esse comportamento foi comparado com o leito fluidizado, obtendo uma vazão mínima de pseudo-fluidização. Seguindo o mesmo princípio dos autores mencionados anteriormente, foram utilizadas retas (linhas tracejadas na cor preta sobre os dados experimentais) para delimitar 4 principais regiões (linhas tracejadas na cor vermelha), como mostra na Figura 5.

Baseando nas linhas traçadas na Figura 5, as regiões A, B, C e D foram definidas para a curva fluidodinâmica referente a massa de 3 kg de partículas. Na região A, existe uma inclinação mais acentuada do que as demais regiões, indicando uma menor porosidade do leito no processo inicial. Nessa região, ocorre um rápido aumento da queda de pressão de forma linear com o aumento da vazão de ar. Apesar desse resultado, essa inclinação ainda é menor do que as obtidas pelos outros agitadores e pelo leito de jorro convencional (Figura 4).

Na região B, fica evidente que a inclinação da reta é menor do que na região A. Esse resultado é consequência do efeito de expansão do leito, para o qual existe um limite representado pelo valor máximo da queda de pressão indicado entre as regiões B e C. Na interfase entre essas duas regiões é possível estimar a vazão de ar necessária para agitar o leito ($Q_{al,3}$) e a queda de pressão operacional, sendo essa igual à queda de pressão máxima.

Na região C, o aumento da vazão de ar não altera a queda de pressão, uma vez que a porosidade média do leito atingiu seu valor máximo, valor esse que permanece estável com o aumento da vazão, enquanto a operação for estável. Após a região C, a velocidade do ar se aproxima da velocidade terminal das partículas, provocando o arraste das mesmas. Sendo assim, a região D é delimitada por uma instabilidade provocada pela alta vazão de ar, ocorrendo em alguns casos o fenômeno de leito borbulhante ou pistonado.

As regiões (A, B, C e D) foram baseadas para massa de 3kg, assim como os valores de $Q_{al,3}$, ΔP_{al} e ΔP_{max} , como apresentado na Figura 5. Apesar disso, um procedimento similar pode ser adotado para as demais condições (2 e 4 kg), já que um comportamento fluidodinâmico similar foi obtido. Nota-se que para massa de 4 kg, a queda de pressão máxima é relativamente superior as demais, justificada pela maior altura do leito estático, na qual dificulta o escoamento do ar. Detalhes adicionais sobre o efeito da massa, diâmetro e densidade das partículas podem ser encontrados em estudos anteriores (Barros, 2022). Além dessas, existem outras variáveis que afetam os parâmetros fluidodinâmicos, como a velocidade de rotação dos agitadores.

O efeito da velocidade de rotação na curva fluidodinâmica foi diferente para os três agitadores utilizados. Foi verificado que a curva fluidodinâmica é qualitativamente semelhante em diferentes velocidades de rotação, para os agitadores de pás-retas e pás-inclinadas. Desta forma, foi utilizado o mesmo método empregado anteriormente para determinar a Q_{al} , em ambos os agitadores. Já para o agitador tipo parafuso helicoidal, não foi observado diferença na curva fluidodinâmica em diferentes velocidades de rotação, como já relatado na literatura (Sousa, 2017). Nesse caso, foi adotado o procedimento relativo à Figura 5 para a Q_{al} . Sendo assim, a vazão de ar necessária para agitar o leito em diferentes velocidades de rotação está apresentada na Tabela 1 para massa de partículas de 3 kg.

Tabela 1: Vazão de ar necessária para agitar o leito para diferentes agitadores. Dados: Partículas de vidro, 3kg e 2,2mm.

Ω (rpm)	Pás-retas	Pás-inclinadas	Parafuso
0	1,35±0,01 ^{a*}	1,69±0,01 ^a	1,51±0,01 ^a
60	0,88±0,02 ^b	0,67±0,01 ^{bc}	1,14±0,07 ^b
90	0,81±0,04 ^{bc}	0,62±0,04 ^{bc}	1,12±0,03 ^b
120	0,78±0,01 ^{cd}	0,74±0,08 ^b	1,10±0,05 ^b
198	0,72±0,01 ^d	0,56±0,04 ^c	1,12±0,02 ^b
240	0,63±0,01 ^e	0,56±0,05 ^c	1,09±0,04 ^b
291	0,61±0,05 ^e	0,55±0,03 ^c	1,13±0,03 ^b
330	0,61±0,01 ^e	0,56±0,05 ^c	1,08±0,04 ^b

*ANOVA ($p < 0,05$) e teste de Tukey para o mesmo agitador com diferentes velocidades de rotação.

Em relação apenas à inserção do agitador, ou seja, o processo com 0 rpm (sem contribuição da movimentação do agitador), uma maior Q_{al} é observada em relação as demais velocidades de rotação e até mesmo para o LJC nas condições de 3 kg ($Q_{mj} = 0,92 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$). Esses resultados advêm do fato da necessidade de uma maior vazão de ar para estabelecer o mesmo regime de jorro mesmo sem a contribuição da agitação. Com a contribuição gradual da velocidade de rotação do agitador, ocorre a redução da resistência à passagem do ar pela região central e assim o aumento do grau de agitação das partículas na região anular, reduzindo a Q_{al} .

Para os agitadores mecânicos no formato de pás, houve uma redução da vazão de ar necessária para agitar o leito com o aumento da velocidade de rotação. Efeitos similares também foram obtidos para a queda de pressão, como relatado em estudo anteriores (Barros, 2022). Esse resultado pode ser justificado devido ao efeito de alargamento no centro do leito, que é afetado pela velocidade de rotação. Entretanto, para valores acima de 291 rpm não se observa mudança significativa na vazão de ar, existindo um limite operacional. Apesar desse resultado, esse comportamento pode ser alterado de acordo com a massa e as características das partículas. Além disso, notou-se que o agitador de pás-inclinadas necessita de uma menor velocidade de rotação para iniciar o processo de alargamento do canal e assim aumentar o escoamento do ar no centro do leito, resultando em uma menor Q_{al} para mesma velocidade de rotação. Esse fato indica que o agitador de pás-inclinadas necessita de uma menor demanda de energia para mesma operação.

Os resultados apresentados sobre o comportamento fluidodinâmico são de fundamental importância para o melhor entendimento da interação entre a fase sólida e gasosa dentro do equipamento. Esses resultados vão ajudar em diversos processos, como secagem de sólidos e grãos, além de recobrimento, mistura e outros processos.

Secagem de pasta

Os experimentos de secagem foram realizados com os três tipos de agitadores e para

o equipamento convencional. Na comparação das diferentes configurações do equipamento, foi utilizada a mesma vazão de ar de $1,41 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, como mostra a Figura 6. Observa-se que para as quatro configurações apresentadas, houve um aumento da umidade relativa do ar (UR) ao longo do processo devido a remoção da água presente na pasta alimentada. Esse fenômeno ocorreu até que um regime estacionário fosse atingido, uma vez que os valores foram relativamente próximos no equilíbrio ($\pm 17\%$). Tal resultado é consistente com os princípios de conservação de massa e energia, uma vez que foram utilizadas as mesmas condições de operação no processo, como vazão de ar, vazão de pasta, tipo de pasta e temperatura do ar de secagem na entrada do leito.

O tempo necessário para alcançar o equilíbrio foi diferente para cada uma das configurações analisadas. Desta forma, a presença dos diferentes agitadores dentro do leito provocou uma alteração no regime transiente do processo de secagem. Nesse caso, ocorreu uma influência da movimentação das partículas dentro do leito e principalmente da velocidade de homogeneização do leito nos instantes iniciais do processo.

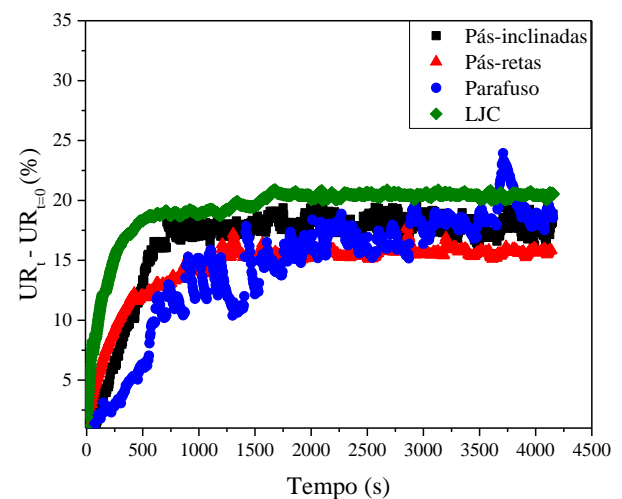


Figura 6: Umidade relativa em função do tempo de secagem de CaCO_3 (120 rpm e $1,41 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$).

Para justificar os diferentes comportamentos no regime transiente, deve-se entender que na etapa inicial do processo de secagem, ocorre a inserção da pasta sobre o leito e conseqüentemente o primeiro recobrimento das partículas inertes. Sendo assim, sob influência desses fenômenos e aliado ao tipo de configuração empregada dentro do

leito, estes influenciam no regime transiente no processo de secagem e na velocidade de decaimento da UR. Sob essas circunstâncias, a maior velocidade de decaimento foi para o LJC, seguida pelo agitador de pás-inclinadas, pás-retas e por último o agitador tipo parafuso helicoidal. Além disso, foram observadas perturbações nos valores da UR para o agitador tipo parafuso, podendo ser justificado devido a menor movimentação das partículas, como explicado anteriormente.

Para analisar o efeito do tipo de pasta no processo de secagem, uma comparação entre diferentes tipos de pasta foi realizada, como mostra a Figura 7. Esses testes foram realizados utilizando a vazão de ar necessária para o agitador (Q_{al}) de pás-retas, com velocidade de rotação de 120 rpm. A escolha desse agitador foi justificada devido a testes preliminares que mostraram que o parafuso helicoidal apresentou problemas operacionais, enquanto na configuração com pás-inclinadas não foi possível realizar a secagem com leite devido à baixa vazão de ar necessária para agitar o leito.

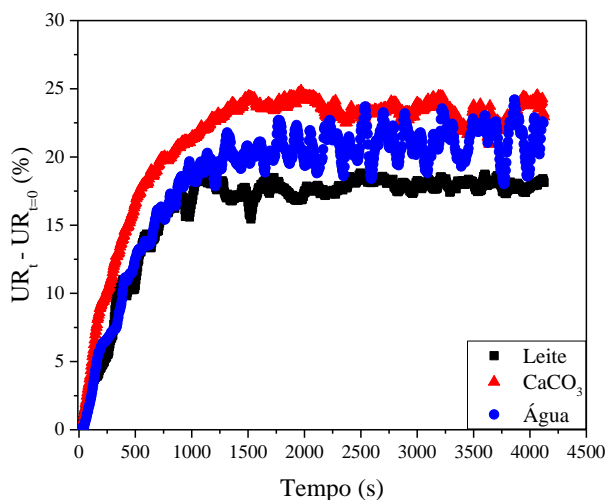


Figura 7: Umidade relativa em função do tempo de secagem para o agitador de pás-retas (120 rpm e $1,26 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$).

No início do processo, as três pastas apresentaram aumento da UR, entretanto no regime estacionário, a secagem de leite desnatado apresentou o menor valor da UR. Esse resultado pode estar relacionado com as características da pasta devido sua maior complexidade química, sendo necessária uma maior demanda de energia. Essa maior dificuldade pode causar o processo de aglomeração, acúmulo e a formação de zonas

mortas. Entretanto, esses fenômenos indesejados podem ser evitados ou pelo menos minimizados com o uso de agitadores mecânicos com uma geometria que permita uma maior proximidade com a parede do equipamento. Isso vai favorecer que ocorra um maior contato direto do agitador com os aglomerados que normalmente se formam próximo a região anular devido a inclinação do cone inferior. Problemas com aglomeração de partículas já foram observados em agitadores tipo parafuso helicoidal na secagem com leite desnatado (Sousa, 2017; Barros, 2022).

Além da geometria do agitador, uma outra opção de controle operacional que pode ajudar a evitar os fenômenos indesejados de aglomeração, acúmulo e instabilidades, é o uso da velocidade de rotação do agitador na secagem. Essa variável, auxilia na movimentação das partículas e favorece uma importante etapa da secagem durante a formação do produto, o atrito entre as partículas para quebra do filme seco e formação do pó que será elutriado para fora do leito. Desta forma, o controle da velocidade de rotação pode auxiliar no processo de secagem e evitar alguns problemas, como mostra a Figura 8.

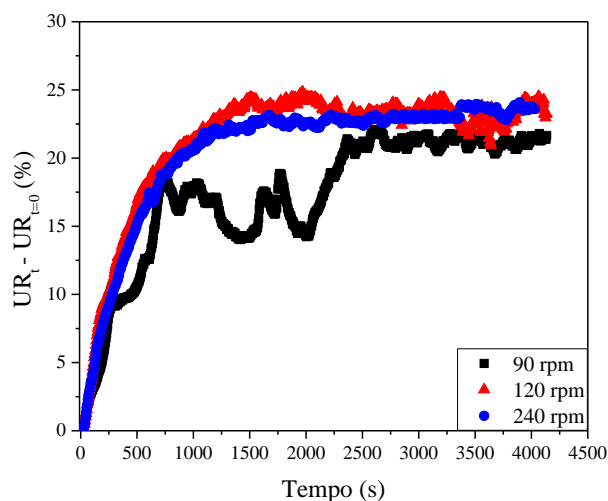


Figura 8: Umidade relativa em função do tempo de secagem de $CaCO_3$ para agitador de pás-retas ($1,26 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$).

Na Figura 8 são apresentados os resultados da secagem com o agitador de pás-retas para 90, 120 e 240 rpm. Esses ensaios foram realizados com a mesma vazão de ar ($Q_{al} = 1,26 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$), referente a fluidodinâmica de 120 rpm, para conseguir analisar somente o efeito da velocidade de rotação.

Observa-se que próximo aos 750s do início da injeção da pasta não houve diferença entre as curvas, mas após esse período nota-se uma perturbação mais acentuada para 90 rpm. Esse resultado pode ser devido ao menor grau de agitação das partículas promovida por essa condição. Pode-se afirmar também que nesse período de regime transiente, a baixa UR sugere que não está ocorrendo a remoção da umidade de forma semelhante as demais condições, podendo indicar um acúmulo de produto dentro do leito.

A proximidade entre as curvas de 120 e 240 rpm pode ser justificada devido aos benefícios causados nessa faixa mais elevada da velocidade de rotação ter atingido um grau máximo. Esse resultado é condizente com os dados apresentados para o comportamento fluidodinâmico, no qual também apresenta um limite para redução da vazão de ar em função do aumento da velocidade de rotação. Desta forma, também pode haver um limite para a capacidade de secagem em função da contribuição da velocidade de rotação. Resultados análogos já foram observados por Reyes e Vidal (2000), onde uma capacidade máxima é atingida para uma determinada velocidade de rotação.

De modo geral, verificou-se que o aumento da velocidade de rotação trouxe benefícios para o processo de secagem. Esses resultados corroboram com os dados da literatura, onde Bait e colaboradores (2011) verificaram que existe uma tendência positiva no que diz respeito ao aumento da velocidade de agitação, sendo que quanto maior a velocidade de agitação, maior a taxa de secagem. Além disso, esse processo afeta diretamente a taxa de circulação das partículas e com isso proporcionando uma maior quantidade de choques entre as partículas e entre as partículas e a parede dentro do leito. Esses fenômenos contribuem para a quebra do filme seco na superfície das partículas e na melhor remoção do produto. Dessa forma, pode-se inferir que a velocidade de rotação do agitador controla a taxa de remoção do produto e conseqüentemente pode afetar a cinética de secagem e a umidade do produto, além de contribuir com a sua distribuição granulométrica.

Umidade do produto e distribuição granulométrica

Devido aos efeitos das diferentes configurações no regime transiente no processo de secagem, como apresentado nas Figuras 6-8, foi analisado inicialmente o efeito da granulometria do produto em função do tempo de secagem.

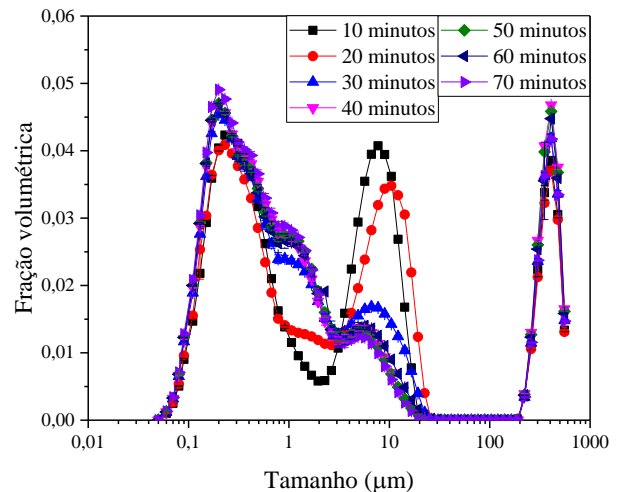


Figura 9: Tamanho das partículas em função da fração volumétrica para diferentes tempos de coleta do produto (CaCO_3 , pás-retas, 120 rpm e $1,26 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$).

Na Figura 9 é apresentado o tamanho das partículas em escala logarítmica, para diferentes tempos de secagem (10, 20, 30, 40, 50, 60 e 70 minutos). Nota-se que nos instantes iniciais da secagem (10 e 20 minutos) houve uma variação da granulometria do produto, com um pico próximo dos 7-10 μm . Essas variações podem ser justificadas devido aos efeitos de recobrimento da superfície das partículas, uma vez que os primeiros ciclos de recobrimento, secagem e remoção do pó são diferentes dos demais. Desta forma, pode-se estabelecer que até 20 minutos um regime estacionário é observado e que posteriormente o equilíbrio é atingido e não ocorre mais variação na distribuição granulométrica. Esse resultado corrobora com a curva da cinética de secagem apresentada nas Figuras 6-8, sendo o limite do regime transiente próximo aos 1200 segundos.

Sendo assim, foram utilizadas amostras no tempo de 60 minutos para analisar os efeitos da configuração do equipamento e da velocidade de rotação dos agitadores, como apresentado nas Figuras 10 e 11, respectivamente. Além disso, como a velocidade de rotação afeta tanto a

granulometria do produto quando a umidade, como já discutido anteriormente, na Tabela 2 são apresentados os resultados para umidade do produto com as mesmas condições operacionais das Figuras 10 e 11.

Na Figura 10, nota-se que o agitador de pás-retas e o de pás-inclinadas apresentaram distribuições semelhantes, enquanto o agitador tipo parafuso apresentou um pico no tamanho de 10 μm , que pode ser justificado pelo tipo de movimentação que ocorre dentro do leito. Essa justificativa também faz sentido quando se compara com o equipamento convencional, onde a distribuição foi diferente das demais, mesmo em condições similares de operação.

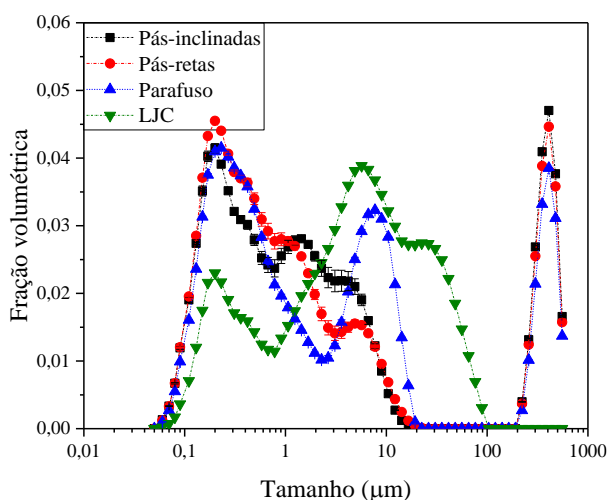


Figura 10: Tamanho das partículas em função da fração volumétrica para diferentes tipos de agitadores mecânicos (CaCO_3 , 120 rpm e $1,41 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$).

As diferenças observadas na Figura 10 podem ser explicadas por diversos fenômenos que ocorrem durante a secagem, mas três podem ser destacados: o primeiro fator levado em consideração é o processo de aglomeração que ocorre dentro do leito e é influenciado pelo tempo de circulação das partículas. Quanto maior o tempo que o pó demora para ser elutriado, maior é a chance de ser recoberto por uma nova camada de solução ou ainda que se aglomere, aumentando de tamanho. O segundo fator pode estar relacionado com a capacidade de elutriação do pó, a qual é influenciada pela velocidade de ar, pois seu aumento provoca uma maior força de arraste sobre as partículas, mas como as condições operacionais estudadas são iguais, o que pode influenciar é o perfil de distribuição radial do ar, já estudada por outros

autores (Barros et al., 2020; Szentmarjay et al., 1992). O terceiro fator é a umidade do produto, mas que também apresenta uma relação com os outros dois fatores mencionados. Na Tabela 2, pode-se notar que não houve diferença entre os valores da umidade do produto. Esse resultado pode ser justificado devido ao elevado desvio padrão e pela elevada vazão de ar empregada para secagem, favorecendo uma umidade do produto muito baixa ($\pm 1,1\%$), minimizando possíveis efeitos das diferentes configurações do equipamento com e sem agitação mecânica.

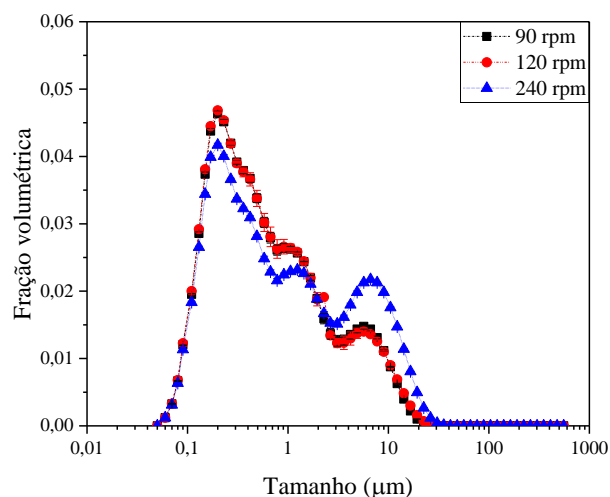


Figura 11: Tamanho das partículas em função da fração volumétrica para diferentes velocidades de rotação (CaCO_3 , pás-retas e $1,26 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$).

Tabela 2: Umidade do produto em base úmido (%) para diferentes condições operacionais.

Agitador	Ω (rpm)	Q ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	X_{bu} (%)
Pás-retas	90	1,26	$3,0 \pm 1,0$
Pás-retas	120	1,26	$2,0 \pm 1,0$
Pás-retas	240	1,26	$1,0 \pm 0,2$
Pás-retas	120	1,41	$0,7 \pm 0,6$
Pás-inclinadas	120	1,41	$2,0 \pm 1,0$
Parafuso	120	1,41	$1,0 \pm 1,0$
LJC	-	1,41	$0,7 \pm 0,5$

Para o efeito da velocidade de rotação no produto, nota-se que não há diferença na distribuição do tamanho das partículas para velocidade de rotação de 90 e 120 rpm, entretanto para 240 rpm foi observado um aumento na fração das partículas de 10 μm , como mostra a Figura 11. Esse resultado pode estar relacionado com a maior movimentação das partículas dentro do leito para maiores velocidades de rotação. Tal justificativa também pode ser utilizada para explicar a

menor umidade do produto obtida para maiores velocidade de rotação do agitador, como apresentado na Tabela 2. Esses resultados condizem com a literatura, uma vez que no estudo de Pallai et al. (2001) foi verificado que o tamanho de partícula do produto é controlado pela geometria do agitador e pela sua velocidade de rotação, sendo esse último um mecanismo de fácil controle que pode ser utilizado para alterar o tamanho das partículas.

CONCLUSÕES

Os resultados apresentados nesse estudo vão contribuir com avanços importantes do equipamento com agitação mecânica. Através do estudo detalhado do comportamento fluidodinâmico foi possível apresentar novas técnicas para determinar uma vazão de ar necessária para agitar o leito, ajudando a obter um valor operacional de referência para outros estudos, novas aplicações e projetos.

A inserção dos agitadores no leito de partículas proporcionou melhorias nos parâmetros fluidodinâmicos, como a redução da queda de pressão e da vazão de ar. Nesse último caso, devido a contribuição da agitação mecânica, pode ocorrer uma economia significativa no custo operacional do processo, principalmente em operações de secagem.

Ao se utilizar os agitadores de pás-retas e pás-inclinadas, foi observada uma redução da vazão de ar em função do aumento da velocidade de rotação, sendo o agitador de pás-inclinadas o que apresentou os melhores resultados, devido a contribuição da movimentação ascendente proporcionada pela inclinação das pás. A velocidade de rotação também teve efeito em outras variáveis, como umidade do produto e distribuição granulométrica. Além disso, a geometria do agitador afetou o regime transiente da cinética de secagem.

NOMENCLATURA

d_s	Diâmetro inferior	m
D_s	Diâmetro superior	m
Q_{al}	Vazão de ar necessária para o agitador	$m^3 \cdot \text{min}^{-1}$
Q_{mj}	Vazão de ar de mínimo jorro	$m^3 \cdot \text{min}^{-1}$

Q	Vazão de ar	$m^3 \cdot \text{min}^{-1}$
UR	umidade relativa do ar	%
UR_t	Umidade relativa no tempo	%
$UR_{t=0}$	Umidade relativa no tempo zero	%
X_{bu}	Umidade do produto em base úmida	%
Ω	Velocidade de rotação	rpm
ΔP_{al}	Queda de pressão para agitar o leito	Pa
ΔP_{max}	Queda de pressão máxima	Pa

REFERÊNCIAS

- BAIT, R.G.; PAWAR, S.B.; BANERJEE A.N. (2011), Mechanically Agitated Fluidized Bed Drying of Cohesive Particles at Low Air Velocity, *Dry Technol*, Vol 29, p.808–818.
- BARCELOS, K.M.; ALMEIDA, P.S.; ARAUJO, M.S. (2020), Particle segregation in spouted bed pyrolysis reactor: Sand-coconut shell and sand-cocoa shell mixtures, *Biomass and Bioenergy*, Vol 138, p.105592.
- BARRET, N.; FANE, A. (1990), Drying Liquid Materials in a Spouted Bed, In: MUJUMDAR, A. *Drying'89*. New York, USA, Hemisphere Publ. Co., 1989. v. B, p. 415-420.
- BARROS, J. P. A. A.; BRITO, R.C.; FREIRE F. B.; FREIRE, J. T. (2020), Fluid Dynamic Analysis of a Modified Mechanical Stirring Spouted Bed: Effect of Particle Properties and Stirring Rotation, *Ind Eng Chem Res*, Vol 59, p.16396–16406.
- BARROS, J. P. A. A. (2022), Análise de diferentes configurações do leito de jorro com agitador mecânico e o equipamento convencional. PPGEQ/UFSCar – São Carlos - SP, 1149p. (Tese de doutorado).
- BARROS, J. P. A. A.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, J. T.; FERREIRA, M. C. (2019), Spouted bed drying on inert particles: Evaluation of particle size distribution of recovered, accumulated and elutriated powders of recovered, accumulated and elutriated powders, *Dry Technol*, Vol 38, p. 1709-1720.

- BILBAO, J.; OLAZAR, M.; ROMERO, A.; ARANDES, J. M. (1987), Design and Operation of a Jet Spouted Bed Reactor with Continuous Catalyst Feed in the Benzyl Alcohol Polymerization, *Ind Eng Chem Res*, Vol 26, p.1297–1304.
- BRITO, R. C.; SOUSA, R. C.; BÉTTEGA, R. (2018), Analysis of the energy performance of a modified mechanically spouted bed applied in the drying of alumina and skimmed milk, *Chem Eng Process Process Intensif*, Vol 130, p. 1–10.
- BRITO, R. C.; ZACHARIAS, M. B.; FORTI, V. A.; FREIRE, J. T. (2020), Physical and physiological quality of intermittent soybean seeds drying in the spouted bed, *Dry Technol*, Vol 0, p.1–14.
- FREIRE, J. T.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, F. B.; NASCIMENTO, B. S. (2012), A Review on Paste Drying with Inert Particles as Support Medium, *Dry Technol*, Vol 30, p.330–341.
- KUDRA, T.; PALLAI, E.; BARTCZAKI, Z.; PETER, M. (1989), Drying of paste-like materials in screw-type spouted-bed and spin-flash dryers, *Dry Technol*, Vol 7, p.583–597.
- LIU, M.; CHEN, Z.; CHEN, M. (2020), Scale-up strategy study of coating furnace for TRISO particle fabrication based on numerical simulations, *Nucl Eng Des*, Vol 357, p.110413.
- MARKOWSKI, A.; KAMINSKI, W. (1983), Hydrodynamic characteristics of jet-spouted beds, *Can J Chem Eng*, Vol 61, p.377–381.
- MASSARO, S. L.; FERREIRA, M. C. (2020), On the performance of a spouted bed type device for feeding spent coffee grounds to a circulating fluidized bed reactor, *Chem Eng Res Des*, Vol 160, p.31–38.
- MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. (1974), *Spouted beds*. New York.
- NÉMETH, J.; PALLAI, E.; PÉTER, M.; TOROS, R. (1983), Heat Transfer in a Novel. *Can J Chem Eng*, Vol 61, p.406–410.
- OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M. J.; AGUADO, R. (1999), Bed voidage in conical sawdust beds in the transition regime between spouting and jet spouting, *Ind Eng Chem Res*, Vol 38, p.4120–4122.
- PABLOS, A.; AGUADO, R.; VICENTE, J. (2019), Effect of operating conditions on the drying of fine and ultrafine sand in a fountain confined conical spouted bed, *Dry Technol*, Vol 0, p.1–16.
- PALLAI, E.; SZENTMARJAY, T.; SZIJJÁRTÓ, E. (2001), Effect of partial processes of drying on inert particles on product quality, *Dry Technol*, Vol 19, p.2019–2032.
- PERAZZINI, M. B. T.; FREIRE, F. B.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, J. T. (2017), Stability and performance of a spouted bed in drying skimmed milk: Influence of the cone angle and air inlet device, *Dry Technol*, Vol 36, p.341–354.
- REYES, A.; VIDAL, I. (2000), Experimental analysis of a mechanically stirred spouted bed dryer, *Dry. Technol*, Vol 18, p.341–359.
- SOUSA, R. C. (2017), secagem de materiais pastosos e granulares no leito de jorro mecânico e convencional. PPGEQ/UFSCar – São Carlos - SP, (Tese de doutorado).
- SOUSA, R. C.; FERREIRA, M. C.; ALTZIBAR, H. (2019), Drying of pasty and granular materials in mechanically and conventional spouted beds, *Particuology*, Vol 42, p.176–183.
- SOUZA, C. R. F.; OLIVEIRA, W. P. (2005), Spouted bed drying of Bauhinia forficata link extract: The effects of feed atomized position and operating conditions on equipment performance and product properties, *Brazilian J Chem Eng*, Vol 22, p.239–247
- SZENTMARJAY, T.; PALLAI, E. (1989), Drying of suspensions in a modified spouted bed drier with an inert packing, *Dry Technol*, Vol 7, p.523–536.
- SZENTMARJAY, T.; PALLAI, E.; REGÉNYI, Z. (1996), Short-Time Drying of Beatsensitwe, Biologically Active Pulpes and Pastes, *Dry Technol*, Vol 14, p.2091–2115.
- SZENTMARJAY, T.; SZALAY, A.; PALLAI, I. (1992), Hydrodynamical measurements in mechanically spouted bed, *Hungarian J Ind Chem veszprém*, Vol 20, p. 219–224.