

Fluidização Gás-Sólido – Fundamentos e Avanços

Prof. Dr. Marcello Nitz

*Escola de Engenharia Mauá, Centro Universitário do Instituto Mauá de
Tecnologia*

Prof. Dr. Roberto Guardani

Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da USP

A fluidização promove um bom contato entre a superfície das partículas sólidas e o fluido. Em decorrência disso, consegue-se diminuir as resistências ao transporte de calor e massa, além de se promover uma boa mistura e homogeneização do material. De olho nessas características, a Engenharia Química desenvolveu várias aplicações para a fluidização, em especial para a fluidização gás-sólido, com destaque para os reatores químicos e os secadores. Neste artigo vão-se abordar os conceitos básicos de fluidização, explicando-se o fenômeno e citando-se os diferentes tipos de regime. Em seguida, será dada ênfase à operação de secagem e aos reatores de leito fluidizado.

1.1 Fundamentos da Fluidização

Para entender o fenômeno da fluidização, imagine uma massa de partículas acomodada sobre uma placa ou tela perfurada, formando um leito de seção transversal circular ou retangular. Agora imagine uma corrente gasosa atravessando esse leito de partículas no sentido ascendente, como se mostra na Figura 1.

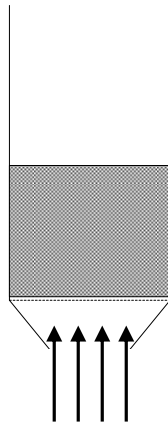


Figura 1 – Leito de partículas percolado por uma corrente gasosa ascendente

Com uma baixa velocidade do gás, ele escoar nos espaços entre as partículas, sem promover movimentação do material— é uma simples percolação e o leito permanece fixo. À medida que se aumenta a velocidade do gás, as partículas afastam-se e algumas começam a apresentar uma leve vibração — tem-se nesse momento um leito expandido. Com velocidade ainda maior, atinge-se uma condição em que a soma das forças causadas pelo escoamento do gás no sentido ascendente igualam-se ao peso das partículas. Nessa situação, em que o movimento do material é mais vigoroso, atinge-se o que se chama de leito fluidizado. À velocidade do gás nessa condição dá-se o nome de mínima velocidade de fluidização, que é a velocidade correspondente ao regime de fluidização incipiente (KUNII & LEVENSPIEL, 1991; GUPTA & SATHIYAMOORTHY, 1999).

Continuando-se o processo de aumento da velocidade do gás, a fluidização borbulhante é o regime que se observa após a fluidização incipiente. No caso de partículas de pequeno tamanho, com densidade geralmente menor do que $1,4 \text{ g/cm}^3$, ocorre uma expansão considerável do leito antes de surgirem as bolhas que caracterizam a fluidização borbulhante. No caso de partículas mais densas, entre $1,4 \text{ g/cm}^3$ e 4 g/cm^3 , a expansão do leito não vai muito além daquela adquirida na condição de fluidização incipiente e as bolhas já surgem com a velocidade de mínima fluidização (GELDART, 1973; KUNII & LEVENSPIEL, 1991). Em alguns leitos fundos em vasos de diâmetro reduzido surgem “slugs”, grandes bolhas formadas pela coalescência de bolhas menores, cujo diâmetro é equivalente ao diâmetro do leito e movimentam-se num fluxo pistonado. Nesse regime observam-se grandes flutuações na queda de pressão do gás.

A fluidização turbulenta é um regime que antecede a condição de leito de arraste (ou fluidização rápida) e está além da fluidização borbulhante. Sua identificação e caracterização corretas ainda são um desafio. Na fluidização turbulenta, as oscilações de queda de pressão no leito diminuem, pois as grandes bolhas e espaços vazios desaparecem (BI *et al.*, 2000).

O regime seguinte ao turbulento é o de fluidização rápida, que acontece quando a velocidade do gás excede a velocidade terminal de sedimentação das partículas e o material passa a ser arrastado. Com velocidades ainda maiores, suficientes para arrastar todo o material, atinge-se a condição de transporte pneumático. Para operar o sistema nessas condições deve haver uma operação subsequente de separação gás-sólido.

Na Figura 2 mostram-se os tipos de regime de fluidização em função da velocidade do gás e sua queda de pressão ao escoar através do leito de partículas.

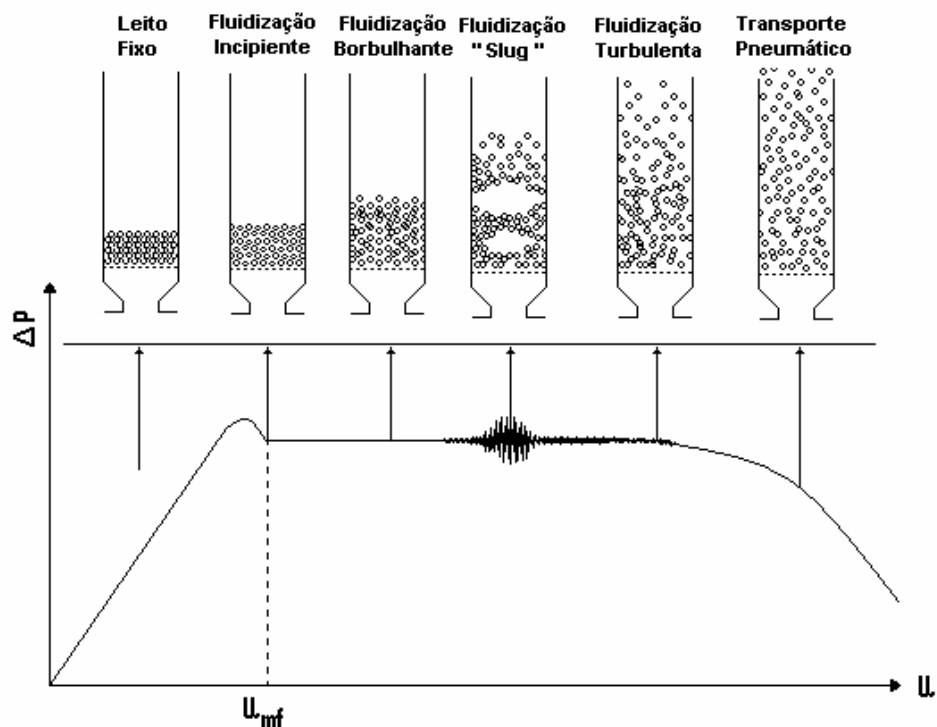


Figura 2 - Regimes de fluidização em função da velocidade superficial do gás. Crédito: Sidnei Ribeiro Moraes

O que se chama de fluidização é todo o intervalo compreendido entre a fluidização incipiente e a turbulenta. Uma vez fluidizado, o leito apresenta algumas propriedades semelhantes às de um líquido em ebulição. São elas:

- objetos mais leves, ou seja, com densidade inferior à do leito, flutuam no topo;
- superfície do leito permanece horizontal, ainda que se incline o recipiente;
- Os sólidos podem escoar através de uma abertura lateral no recipiente, como ocorreria com um líquido;
- o leito apresenta uma relação entre a pressão estática e a altura igual à de líquidos.

Tais características permitem a elaboração de arranjos sofisticados para os leitos fluidizados, que facilitam a operação contínua, inclusive com

recirculação. O grande número de aplicações dos leitos fluidizados existente deve-se a essas características.

Nem toda partícula, quando submetida à fluidização gasosa, comporta-se da mesma maneira. Ou seja, conclusões extraídas de dados obtidos na fluidização de certo material não podem, a princípio, ser extrapoladas para outro. Visando tornar as generalizações possíveis, ou pelo menos minimizar as chances de erro, GELDART (1973) classificou o comportamento de sólidos fluidizados por gases em quatro categorias: A, B, C e D. Essa caracterização está representada na Figura 3. Apesar da existência de outros critérios de classificação — veja GUPTA & SATHIYAMOORTHY (1999) — a classificação de grupos de GELDART (1973) é muito bem aceita e citada com maior frequência na literatura.

As partículas do tipo A apresentam, de maneira geral, pequeno tamanho médio e/ou baixa densidade — inferior a $1,4 \text{ g/cm}^3$. Esse tipo de material — pós finos e leves — submetido à fluidização gasosa expande-se consideravelmente antes do surgimento de bolhas. Ao se interromper o fluxo gasoso, o leito colapsa vagarosamente. Nesse tipo de fluidização, as bolhas aparecem com velocidades superiores à de mínima fluidização. Para as partículas do grupo B, as primeiras bolhas surgem com a velocidade mínima de fluidização. Os materiais nesse grupo apresentam diâmetro compreendido entre 40 e $500 \text{ }\mu\text{m}$ e densidade superior a $1,4 \text{ g/cm}^3$ — a areia é um exemplo. A expansão do leito nesse tipo de fluidização é pequena e ele colapsa rapidamente quando o suprimento de gás é interrompido. Partículas do grupo D apresentam tamanho e/ou densidade elevada. A velocidade do gás necessária para a fluidização é alta, a mistura do material é pequena e a formação de jorro é favorecida. Leitos rasos devem ser utilizados para esse tipo de material. Existe ainda um quarto grupo, representado pela letra C. São partículas que possuem tendência coesiva. À medida que a vazão de gás aumenta, aparecem canais preferenciais que se estendem da tela de distribuição do gás até a superfície do leito. Para esse tipo de material, a introdução de agitação, seja por vibração ou pulsação da corrente gasosa, é uma alternativa interessante para que se promova uma fluidização mais uniforme, sem o aparecimento de canais preferenciais que prejudiquem os processos de transferência de calor e massa.

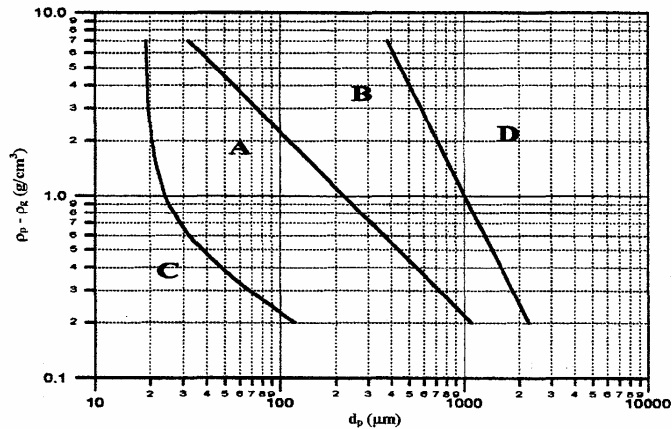


Figura 3 - Diagrama simplificado de classificação de partículas para fluidização gás-sólido (GELDART, 1973; PERRY & GREEN, 1998). Em algumas pesquisas recentes tem-se procurado analisar o comportamento fluidodinâmico de nanopartículas. O estudo de WANG, RAHMAN & RHODES (2007) é um exemplo. Os autores mostraram que nanopartículas comportam-se como material do tipo C, mas que podem passar para o tipo A com altas velocidades superficiais. O comportamento dessas partículas depende muito da intensidade das forças interpartículas.

1.2 Secadores de Leito Fluidizado

A secagem em leitos fluidizados pode ser desenvolvida numa grande variedade de equipamentos. Alguns dos tipos mais comuns e suas modificações estão representados na Figura 4. Os processos exibidos nessa figura são todos contínuos, com exceção do leito de jorro exibido no desenho (h). Operações em batelada ou batelada alimentada também são possíveis e, muitas vezes, recomendadas.

Para suprir energia ao processo de secagem, a maneira mais simples para tanto consiste em promover o aquecimento do gás antes de introduzi-lo no equipamento. Em alguns aparatos, porém, também existe fonte de aquecimento interna.

A escolha do tipo de secador passa por uma análise do tipo de partícula a ser seca, da capacidade de produção, da eventual necessidade de recuperação de solvente e da demanda energética do processo. Os seguintes textos trazem informações mais aprofundadas sobre a fluidização e sua utilização na operação de secagem: STRUMILLO & KUDRA (1986), KERKHOF (1996), GUPTA & SATHIYAMOORTHY (1999) e MUJUMDAR (2007).

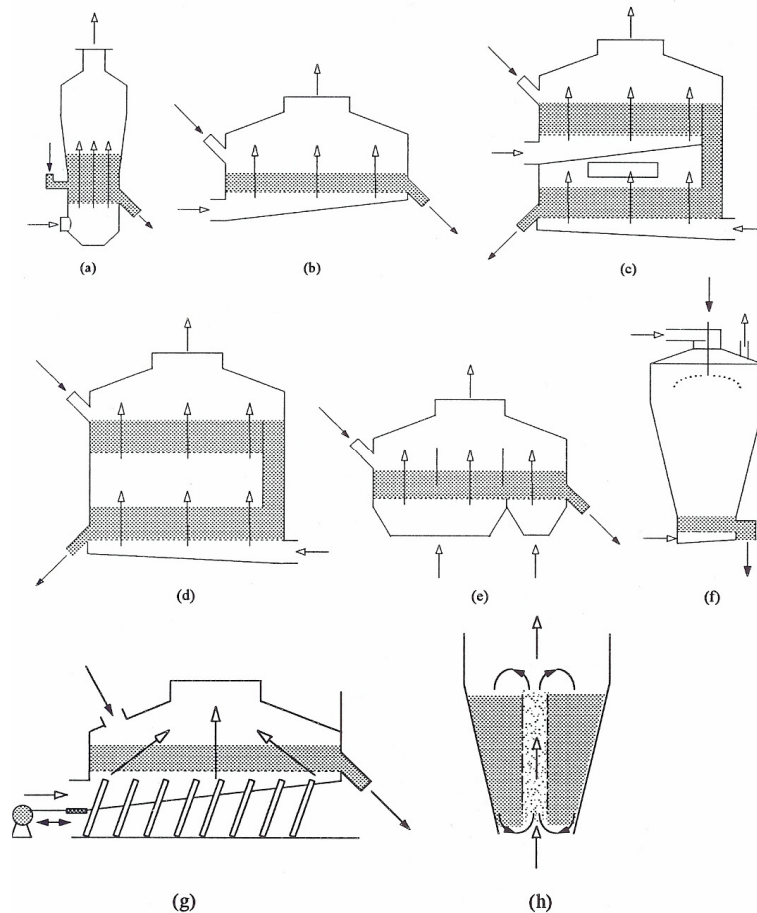


Figura 4- Alguns tipos de secadores de leito fluidizado e modificados: (a) câmara convencional, contínuo (b) fluxo pistonado de simples estágio; (c) duplo estágio com correntes de ar independentes; (d) duplo estágio contra-corrente;(e) múltiplos estágios com chicanas; (f) fluidização pós atomização (“NIRO’s spray dryer”); (g) vibro-fluidização; (h) leito de jorro (KERKHOF, 1996).

1.2.1 Secadores de leito vibro-fluidizado

Em alguns equipamentos, utiliza-se a combinação de fluidização e agitação mecânica. A movimentação do equipamento com o fluxo gasoso visa contornar algumas limitações do leito fluidizado convencional reduzindo-se a quantidade de gás necessária para o processo. Por exemplo, numa situação em que a elutriação de partículas finas deve ser evitada, pode-se tentar reduzir a velocidade do gás utilizada no leito convencional. Porém, as partículas maiores assentaram-se-iam e o processo seria prejudicado. Com a introdução da vibração, garante-se a continuidade do movimento das partículas maiores sem o arraste das finas, pois a velocidade do gás seria menor. O movimento vibratório também possibilita a secagem de materiais coesivos na medida em que impede a formação de canais preferenciais e inibe a formação dos aglomerados que prejudicam o processo.

A elevação do custo do equipamento e do processo são as desvantagens da vibro-fluidização. O equipamento deve ter estrutura reforçada para suportar a vibração. Além disso, existe o custo operacional relativo ao consumo energético dos motores responsáveis pela movimentação. É evidente que uma análise de viabilidade econômica deve ser feita para se justificar o emprego da técnica.

1.2.2 Secadores de leito pulso-fluidizado

A técnica de secagem em leito pulso-fluidizado — PFB, do inglês “pulsed fluid bed” — não é tão recente, mas poucos trabalhos são encontrados nesse tipo de equipamento. Apresenta-se uma representação esquemática de um secador PFB na Figura 5. Nos secadores PFB com distribuição alternada da corrente gasosa, o gás responsável pela fluidização das partículas é introduzido com vazão volumétrica constante no secador. Um disco rotatório distribui alternadamente o gás de secagem em distintas seções da tela que suporta o material, causando a pulsação (NITZ & TARANTO, 2007; GAWRZYNSKI & GLASER, 1996). Esse disco possui uma abertura — um segmento de círculo — que permite a passagem do gás. Num secador PFB de n seções, a abertura tem ângulo igual a $\frac{360^\circ}{n}$.

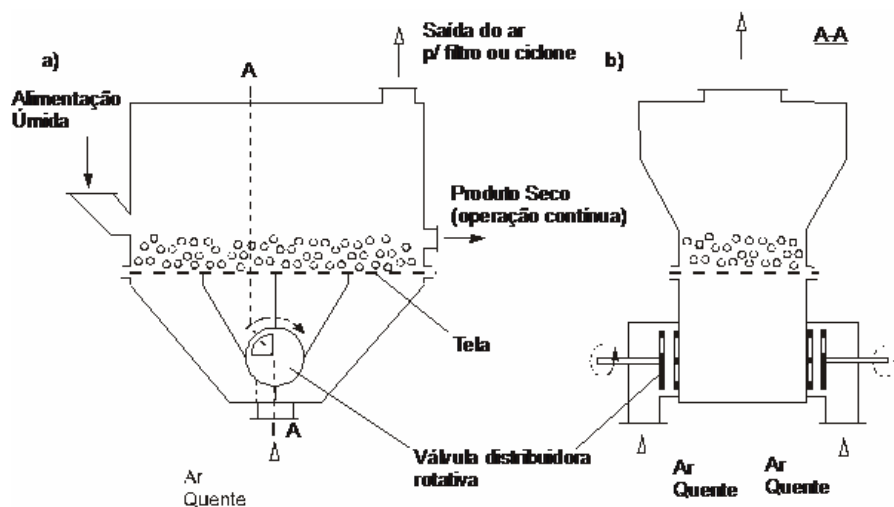


Figura 5 – Representação esquemática de um leito pulso-fluidizado de 4 seções.

O padrão de alimentação proporciona um fluxo periódico do gás, que transfere às partículas um movimento oscilatório, inibe a formação de canais preferenciais e melhora a movimentação das partículas — veja a Figura 6. A técnica é especialmente recomendada para as partículas dos tipos C e D da classificação de GELDART (1973).



Figura 6 – Grãos de feijão movimentando-se em leito pulso-fluidizado. Crédito: Everaldo Pereira

Os leitos pulso-fluidizados representam uma alternativa não só aos equipamentos de fluidização convencional, mas também aos leitos vibro-fluidizados, em que a agitação das partículas é promovida pela movimentação mecânica da estrutura do equipamento. Ressalta-se que, em termos de custos é preferível provocar a agitação do material pulsando a alimentação do fluxo de ar, a fazer toda a estrutura pesada do equipamento vibrar. Nos secadores PFB é possível trabalhar com partículas que apresentam maior distribuição granulométrica e irregularidade geométrica, quando em comparação com os leitos fluidizados convencionais.

1.3 Reatores Químicos

Reatores de leito fluidizado apresentam vantagens em comparação com outros equipamentos no processamento de reações químicas rápidas, normalmente limitadas pela taxa de transferência de massa entre gás e partículas. Nesses casos, é necessária alta superfície específica para contato gás-partícula e altas velocidades relativas entre gás e partículas (altos coeficientes de transferência de massa). Assim, partículas pequenas, envolvidas pelo gás que escoar em alta velocidade, representam a configuração mais favorável. Nessas condições, o escoamento em sistemas de leito fixo envolve alta perda de carga, pois leitos de partículas finas são muito compactos e apresentam alta resistência ao escoamento. Sistemas de leito fluidizado operam com altas frações de vazios (da ordem de 60 a 90%) e com partículas finas (normalmente menores que cerca de 1 mm). Nessas condições, as taxas de transferência de calor e massa entre o gás e as partículas são especialmente altas, o que favorece a aplicação industrial dos sistemas de leito fluidizado em processos envolvendo reações rápidas como, por exemplo, reações de combustão de carvão. Aliás, essa foi a primeira aplicação industrial registrada de leito fluidizado, no final da década de 1920, em equipamento com cerca de 13 m de altura e 12 m² de área de seção transversal, que queimava carvão pulverizado para produzir gás de síntese

(CO e H₂). Na década de 1980, várias usinas termoelétricas foram construídas utilizando sistemas de combustão de carvão em leito fluidizado.

Outras características importantes na seleção de reatores de leito fluidizado são listadas a seguir:

- tempo de residência: em leitos fluidizados borbulhantes, o tempo de residência do gás é da ordem de 10 a 20 s; esse tempo é muito menor, da ordem de 3 a 5 s, em leitos fluidizados turbulentos ou de arraste. Quanto ao sólido, em leitos borbulhantes, o tempo de residência pode ser controlado pela taxa de alimentação e altura do ponto de retirada, com total flexibilidade; em leitos de arraste, o sólido permanece em média de 5 a 20 s, sendo necessária a sua realimentação ao leito;
- frações convertidas: a conversão do sólido pode ser controlada pelo controle do tempo de residência; para o gás, normalmente a conversão é baixa, devendo haver realimentação ao leito para se obter corrente de saída com alta conversão;
- distribuição de temperatura: leitos fluidizados borbulhantes apresentam alta homogeneidade na temperatura e nas propriedades do produto sólido ao longo do volume, devido à intensa agitação promovida pelo escoamento das bolhas. Estas, porém, representam um volume de gás que não entra em contato com as partículas, o que diminui a fração convertida de reagentes. O tamanho das bolhas é, por essa razão, um fator importante no projeto de reatores de leito fluidizado borbulhante;
- comportamento das partículas: leitos fluidizados podem operar com grande variedade de tamanho de partículas (normalmente entre 20 e 1000 µm). No entanto, o movimento das partículas causa problemas de erosão e abrasão, o que provoca desgaste de componentes e geração de material fino, que deve ser separado em sistemas de limpeza de gases. Assim, o projeto de partes expostas a impacto e erosão é crítico em equipamentos industriais.

Exemplos de Aplicações Industriais:

As características dos leitos fluidizados têm levado a uma série de aplicações na indústria química de tratamento de minérios, entre as quais podem-se citar a calcinação de minérios como calcário e bauxita, "roasting" (ou oxidação a cerca de 800 °C) de sulfetos de cobre e de zinco (com a produção de óxidos do metal e gás contendo SO₂), entre outros. Na indústria química, talvez a mais famosa aplicação de reatores de leito fluidizado seja nas unidades de craqueamento catalítico, conhecidas pela sigla FCC (do inglês: *fluidized catalytic cracking*). As unidades de FCC estão presentes em muitas refinarias e são responsáveis pelas reações de quebra de moléculas orgânicas grandes em outras menores, gerando um conjunto de produtos que são separados e destinados a diferentes aplicações, como, por exemplo, para a produção de gasolina. Embora existam várias configurações diferentes, o interessante está em que essas unidades são compostas por dois reatores de leito fluidizado de

tipos diferentes, porém acoplados, como se ilustra na Figura 7. A carga, composta por frações de petróleo, é vaporizada e injetada, com vapor, na parte inferior do reator principal, chamado de "riser", onde também é alimentado o catalisador (partículas de zeólita com tamanho médio de cerca de 80 μm). No "riser", que é um leito fluidizado rápido, ou leito de arraste (opera entre o leito turbulento e o transporte pneumático), ocorrem as reações de craqueamento, a temperaturas entre cerca de 480 e 550 $^{\circ}\text{C}$. O gás escoa no sentido ascendente a velocidades entre 10 e 20 m/s, arrastando as partículas. Como exemplo, numa unidade com capacidade para processar cerca de 5000 m^3/dia de carga, a vazão de catalisador arrastado pelo gás no "riser" pode atingir cerca de 30 t/minuto.

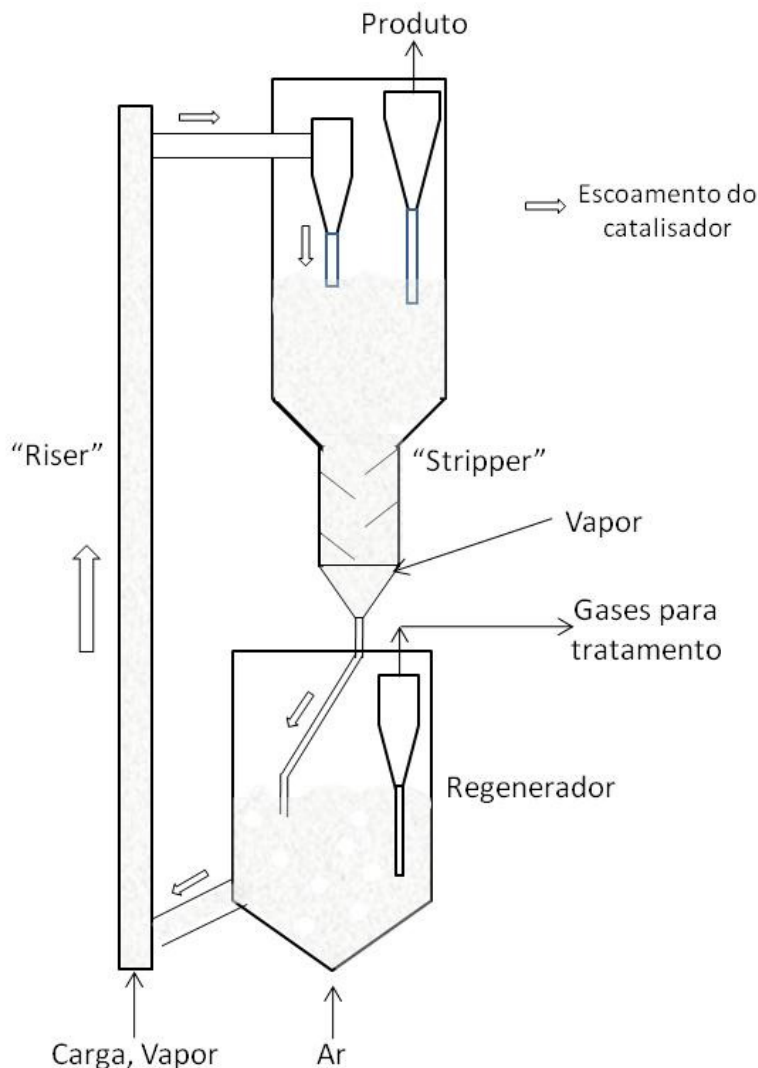


Figura 7 – Esquema ilustrativo de uma unidade industrial de craqueamento catalítico fluidizado.

Na parte superior do "riser", as partículas são separadas do produto gasoso, que é conduzido para outras etapas do processo. As partículas escoam em contra-corrente com vapor num "stripper", para a retirada de produto

adsorvido. Em unidades industriais, o "riser" tem entre 1 e 2 m de diâmetro e pode alcançar 30 m de altura. No craqueamento, são formados também compostos pesados de carbono que se depositam sobre as partículas de catalisador, causando sua desativação. Esses compostos são removidos do catalisador por combustão no reator regenerador, um reator de leito fluidizado que opera entre o regime borbulhante e o turbulento, a 600 - 800 °C, usando ar como gás de fluidização e fonte de oxigênio. Regeneradores industriais têm de 6 a 8 m de diâmetro e até 15 m de altura. A maior parte do calor liberado pela combustão aquece as partículas do catalisador, que é realimentado no "riser". Esse calor é consumido nas reações de craqueamento, que são endotérmicas. A regeneração do catalisador é, portanto, essencial no balanço térmico do sistema. O controle de uma unidade de FCC deve ser rigoroso, pois pequenos desvios nas condições de operação representam grandes perdas, dadas as dimensões dos reatores e as grandes quantidades de material que escoam no sistema.

Um outro exemplo interessante é o da polimerização de olefinas com base em monômeros na fase gasosa, possível com o desenvolvimento de catalisadores de alta atividade. Na produção de polietileno com baixa pressão (cerca de 20 atm) e base de etileno na fase gasosa, o catalisador, suportado em partículas de sílica com cerca de 20 µm de tamanho, é alimentado por um reator de leito fluidizado borbulhante constituído por partículas do polímero (com tamanho entre 250 e 1000 µm), no qual o gás de fluidização é o etileno e alguns comonômeros. Assim, trata-se de um leito fluidizado no qual ocorre o crescimento das partículas. A taxa de crescimento das partículas pode ser controlada de modo eficiente em reatores de leito fluidizado, porque, além das altas taxas de transferência de calor e massa entre o gás e as partículas, as bolhas de gás que escoam pelo leito promovem a mistura das partículas, o que garante alta homogeneidade de temperatura, evitando a formação de "pontos quentes", comuns em reatores de grandes dimensões e reações exotérmicas, como na polimerização (GUARDANI *et al.*, 1998).

Sugestões de leitura:

Existe muito material publicado em que se abordam aspectos específicos de leitos fluidizados, indicados para quem quer estudar de modo aprofundado aspectos como transferência de massa, arraste de partículas, ou reações químicas específicas. Para uma compreensão abrangente desses sistemas, sugerimos os livros de KUNII & LEVENSPIEL (1991), GUPTA & SATHIYAMOORTHY (1999) e de GELDART (1986). Esses livros fornecem descrições detalhadas dos vários regimes de fluidização e apresentam o equacionamento adequado ao projeto e análise de equipamentos.

1.4 Referências Bibliográficas

- BI, H. T.; ELLIS, N.; ABBAS, I. A; GRACE, J. R. A state-of-the-art review of gas-solid turbulent fluidization. **Chemical Engineering Science**, v.55, pp.4789-4825, 2000.
- GAWRZYNSKI, Z.; GLASER, R. Drying in a Pulsed-Fluid Bed with Relocated Gas Stream. **Drying Technology**, v.14, n.5, pp.1121-1172, 1996.
- GELDART, D. Types of Gas Fluidization. **Powder Technology**, v.7, pp.285-292, 1973.
- GELDART, D. **Gas Fluidization Technology**. Wiley, New York, 468p., 1986.
- GUARDANI, R.; TEIXEIRA, A C. S. C.; CASELLA, E. L.; SOUZA, A. M. I. Fluiddynamic aspects of gas-phase ethylene polymerization reactor design. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 15, n.º 3, p. 281-294, 1998.
- GUPTA, C. K.; SATHIYAMOORTHY, D. **Fluid Bed Technology in Materials Processing**. CRC Press, United States, 498p., 1999.
- KERKHOF, P. J. A. M. Fluid Bed Drying: Basics and Challenges. **Proceedings of the 11th International Drying Symposium**. Keynote Lecture. Poland, 1996.
- KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. Butterworth-Heinemann, 2nd ed., 491p., USA, 1991.
- MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. Marcel Dekker, Inc., 3rd ed., 1280p., 2007.
- NITZ, M.; TARANTO, O. P. Drying of beans in a pulsed fluid bed dryer: Drying kinetics, fluid-dynamic study and comparisons with conventional fluidization. **Journal of Food Engineering**, 80, pp.249-256, 2007.
- PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**, 7th ed., McGraw-Hill, 1998.
- STRUMILLO, C.; KUDRA, T.. Drying: Principles, Applications and Design. In: **Topics in Chemical Engineering**, v. 3. Gordon and Breach Science Publishers, 1986.

WANG, X. S.; RAHMAN, F.; RHODES, M. J. Nanoparticle fluidization and Geldart's classification. **Chemical Engineering Science**, v.62, pp.3455-3461, 2007.