

# FLUIDIZAÇÃO DE SÓLIDOS

É A MELHOR E MAIS MODERNA TÉCNICA DA ENGENHARIA QUÍMICA PARA OBTER O CONTATO EFICIENTE ENTRE SÓLIDOS E FLUIDOS, ASSIM COMO TRANSPORTÁ-LOS ENTRE VASOS, TUBULAÇÕES, ETC.

O CONTATO ENTRE SÓLIDOS E FLUIDOS PODE SER FEITO DE TRÊS MANEIRAS:

LEITO FIXO

LEITO MÓVEL

LEITO FLUIDIZADO

## **LEITO FIXO:**

O SÓLIDO DIVIDIDO É COLOCADO DENTRO DE TUBOS OU VASOS E ATRAVÉS DOS QUAIS UM FLUIDO CIRCULA DE BAIXO PARA CIMA OU DE CIMA PARA BAIXO ATRAVÉS DO LEITO POROSO.

## **LEITO MÓVEL:**

NESSE CASO O SÓLIDO EM PARTÍCULAS É CONTINUAMENTE ALIMENTADO PELO TOPO DO LEITO E REMOVIDO PELA BASE. O FLUIDO PODE SUBIR OU DESCER PELO LEITO. O SÓLIDO MOVE-SE COMO A AREIA NUMA AMPULHETA.

## **LEITO FLUIDIZADO:**

ENVOLVE A SUSPENSÃO DO SÓLIDO FINAMENTE DIVIDIDO NUMA CORRENTE ASCENDENTE DE FLUIDO A UMA VELOCIDADE SUFICIENTEMENTE ELEVADA PARA CAUSAR A FLUTUAÇÃO E MOVIMENTAÇÃO VIGOROSA DAS PARTÍCULAS.

O SISTEMA FLUIDIZADO É UMA SUSPENSÃO QUE POSSUI A MAIORIA DAS CARACTERÍSTICAS NORMALMENTE APRESENTADAS PELOS FLUIDOS VERDADEIROS, PODENDO PASSAR POR TUBULAÇÕES E VÁLVULAS E ATÉ DE UM VASO PARA OUTRO POR DIFERENÇA DE PRESSÃO HIDROSTÁTICA.

AS CARACTERÍSTICAS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA SÃO MUITO MELHORES QUE NOS CASOS DE LEITO FIXO E MÓVEL.

## **VANTAGENS DOS LEITOS DE SÓLIDOS FLUIDIZADOS**

ÁREA ESPECÍFICA DO SÓLIDO EXPOSTA AO FLUIDO É MUITO MAIOR DO QUE EM LEITO FIXO PORQUE AS PARTÍCULAS PODEM SER BEM MENORES.

GRANDES VELOCIDADES DE REAÇÃO SÃO CONSEGUIDAS.

OS LEITOS FLUIDIZADOS APRESENTAM CONDUTIVIDADE TÉRMICA BASTANTE ELEVADA COMPARADA COM A DO GÁS.

OS COEFICIENTES DE TROCA TÉRMICA ENTRE O LEITO E AS PAREDES DOS VASOS SÃO MUITO MAIORES DOS QUE OCORREM NOS LEITOS FIXOS.

O TRANSPORTE DO LEITO PARA DENTRO E FORA DOS EQUIPAMENTOS É FÁCIL, POIS SE COMPORTAM COMO UM LÍQUIDO.

A ENERGIA TÉRMICA, POR CONSEQUÊNCIA, PODE SER FACILMENTE TRANSPORTADA

## **DESVANTAGENS DOS LEITOS FLUIDIZADOS**

NÃO É POSSÍVEL MANTER GRADIENTE AXIAL DE TEMPERATURA OU DE CONCENTRAÇÃO NO LEITO.

O ATRITO É MUITO INTENSO, PRODUZINDO MUITO PÓ QUE É ARRASTADO PELO LEITO, O QUE CAUSA A NECESSIDADE DE REPOSIÇÃO CONSTANTE DO SÓLIDO E NECESSIDADE DE EQUIPAMENTOS PARA EVITAR A SAÍDA DE SÓLIDO (PÓ) NO GÁS.

EROSÃO SEVERA DE EQUIPAMENTOS DEVIDO A GRANDE ENERGIA CINÉTICA DO SÓLIDO.

OS FATORES QUE INFLUENCIAM NA EROÇÃO, SÃO: TAMANHO, FORMA, VELOCIDADE E DUREZA DAS PARTÍCULAS.

O CONSUMO DE ENERGIA PARA A OPERAÇÃO COM LEITO FLUIDIZADO É MAIOR QUE NO CASO DE LEITO ESTÁTICO DE MESMO PESO, PORQUE A PERDA DE CARGA É MAIOR. REALMENTE, O LEITO SÓ FLUIDIZA QUANDO A PERDA DE PRESSÃO SE TORNA IGUAL AO PESO DO SÓLIDO POR UNIDADE DE ÁREA.

O TAMANHO DOS EQUIPAMENTOS É MAIOR QUANDO OPERAM COM LEITO FLUIDIZADO EM RELAÇÃO AO CORRESPONDENTE ESTÁTICO.

### **CONDIÇÕES PARA FLUIDIZAÇÃO**

INICIALMENTE O GÁS PASSA PELO LEITO FIXO SEM CAUSAR NENHUM MOVIMENTO DAS PARTÍCULAS. COMO A VELOCIDADE DO GÁS É GRADUALMENTE ELEVADA, A PERDA DE CARGA AUMENTARÁ, MAS AS PARTÍCULAS AINDA NÃO SE MOVEM E A ALTURA DO LEITO PERMANECERÁ A MESMA.

AO ATINGIR CERTA VELOCIDADE DO GÁS, A PERDA DE CARGA ATRAVÉS DO LEITO AUMENTARÁ ATÉ ANULAR A FORÇA GRAVITACIONAL DAS PARTÍCULAS, OU SEJA, O PESO DO LEITO.

A PARTIR DAÍ QUALQUER PEQUENO AUMENTO DE VELOCIDADE CAUSARÁ O MOVIMENTO DAS PARTÍCULAS SÓLIDAS.

COM MAIS AUMENTO DA VELOCIDADE, AS PARTÍCULAS PASSAM A FICAR SEPARADAS O SUFICIENTE PARA SE MOVEREM NO LEITO. ASSIM COMEÇA A VERDADEIRA FLUIDIZAÇÃO.

DESDE QUE O LEITO ESTÁ FLUIDIZADO, A PERDA DE CARGA ATRAVÉS DO LEITO PERMANECERÁ CONSTANTE, ENQUANTO QUE A ALTURA DO LEITO CONTINUARÁ A CRESCER COM O AUMENTO DA VELOCIDADE DO GÁS.

DO MESMO MODO SE A VELOCIDADE DO GÁS PARA O LEITO FLUIDIZADO, FOR REDUZIDA, A PERDA DE CARGA ATRAVÉS DO LEITO PERMANECERÁ CONSTANTE E A ALTURA DO LEITO FLUIDIZADO DIMINUIRÁ.

PORTANTO HAVERÁ UMA VELOCIDADE MÍNIMA PARA SE INICIAR A FLUIDIZAÇÃO.

### **VELOCIDADE MÍNIMA DE FLUIDIZAÇÃO**

NA VELOCIDADE MÍNIMA DE FLUIDIZAÇÃO, OU VELOCIDADE CRÍTICA DE FLUIDIZAÇÃO, TEREMOS:

**A POROSIDADE MÍNIMA**, SERÁ A MENOR POROSIDADE PARA O LEITO FLUIDIZADO (POROSIDADE NO INÍCIO DA FLUIDIZAÇÃO).

A POROSIDADE DO SÓLIDO MACIÇO É ZERO. PORÉM O LEITO DE SÓLIDO FRAGMENTADO PASSA A TER UMA POROSIDADE QUE DEPENDE DA GRANULOMETRIA E DA FORMA DAS PARTÍCULAS.

À MEDIDA QUE O LEITO SE EXPANDE, A POROSIDADE VAI CRESCENDO. QUANDO OCORRE A FLUIDIZAÇÃO CONTÍNUA, A POROSIDADE TORNA-SE IGUAL A 1,0.

A **MASSA ESPECÍFICA MÁXIMA** DO LEITO FLUIDIZADO, A MAIOR MASSA ESPECÍFICA QUE O LEITO FLUIDIZADO TERÁ (MASSA ESPECÍFICA DO LEITO NO INÍCIO DA FLUIDIZAÇÃO).

HÁ UMA CORRELAÇÃO EMPÍRICA QUE PERMITE CALCULAR A MASSA ESPECÍFICA MÁXIMA DE UM LEITO FLUIDIZADO, QUE SE APLICA PARA LEITOS COM PARTÍCULAS DE ATÉ 500 MICRONS.

MASSA ESPECÍFICA DO SÓLIDO = (t/m<sup>3</sup>)

DIÂMETRO DA PARTÍCULA SÓLIDA = (microns).

POR OUTRO LADO, HÁ UMA RELAÇÃO ENTRE A POROSIDADE E AS MASSAS ESPECÍFICAS DA PARTÍCULA SÓLIDA E DO FLUIDO (LÍQUIDO OU GÁS).

ENTÃO NA POROSIDADE MÍNIMA, TEM-SE:  
POROSIDADE MÍNIMA  
MASSA ESPECÍFICA MÁXIMA DO LEITO  
MASSA ESPECÍFICA DA PARTÍCULA SÓLIDA  
MASSA ESPECÍFICA DO FLUIDO

ASSIM, A VELOCIDADE MÍNIMA DE FLUIDIZAÇÃO, É:

$g$  = ACELERAÇÃO DA GRAVIDADE,  $9,806 \text{ m/s}^2$   
 $D_s$  = DIÂMETRO DA PARTÍCULA SÓLIDA, (m)  
= MASSA ESPECÍFICA DO SÓLIDO ( $\text{kg/m}^3$ )  
= MASSA ESPECÍFICA DO FLUIDO ( $\text{kg/m}^3$ )  
= VISCOSIDADE DO FLUIDO ( $\text{kg/m.s}$ ) ou ( $10^3 \times \text{cP}$ )  
= FATOR DE FORMA DE LEVA.  
= POROSIDADE MÍNIMA.

PODE HAVER DISCORDÂNCIA ENTRE ESSA VELOCIDADE CALCULADA E O VALOR MEDIDO EXPERIMENTALMENTE. ISTO PODE SER ATRIBUÍDO A:

== ESCOAMENTO PREFERENCIAL DAS FASES EM VIRTUDE DO QUAL A FORÇA DE ARRASTE DO LEITO PELO FLUIDO TORNA-SE MENOR.

== AÇÃO DE FORÇAS ELETROSTÁTICAS (NO CASO DE FLUIDIZAÇÃO COM GASES).

== AGLOMERAÇÃO DE PARTÍCULAS

== ATRITO DO SÓLIDO NA PAREDE DO VASO.

OPERAÇÕES PRÁTICAS SÃO CONDUZIDAS COM NO MÍNIMO O DOBRO DESSE VALOR CALCULADO ACIMA.

HÁ TAMBÉM CORRELAÇÕES EMPÍRICAS PARA A VELOCIDADE DE FLUIDIZAÇÃO, COMO A DE LEVA, A DE MILLER E LOGWINUK.

### **ALTURA DO LEITO FLUIDIZADO**

A ALTURA DO LEITO, TAMBÉM CHAMADA PROFUNDIDADE, É A DISTÂNCIA VERTICAL ENTRE O PONTO ONDE O FLUIDO É ALIMENTADO E A SUPERFÍCIE SUPERIOR DO LEITO.

À MEDIDA QUE A VELOCIDADE DO FLUIDO CRESCE, A POROSIDADE CRESCE E A ALTURA DO LEITO TAMBÉM AUMENTA.

PELO BALANÇO MATERIAL:  $L_1 \times S(1 - \epsilon) = L_2 \times S(1 - \epsilon)$

ESTA EXPRESSÃO VALE IGUALMENTE PARA O CASO DO LEITO ESTÁTICO E PARA O LEITO DE POROSIDADE MÍNIMA.

### **PERDA DE CARGA**

QUANDO A FLUIDIZAÇÃO TEM INÍCIO, A PERDA DE CARGA É A DIFERENÇA DE PRESSÃO NECESSÁRIA PARA SUSPENDER AS PARTÍCULAS SÓLIDAS NO LEITO. O BALANÇO DE FORÇAS SERÁ:

À MEDIDA QUE O LEITO VAI SE EXPANDINDO, SUA ALTURA AUMENTA, MAS A PERDA DE CARGA PERMANECE PRÁTICAMENTE IGUAL AO PESO APARENTE DO SÓLIDO POR UNIDADE DE ÁREA DO LEITO.

ISTO OCORRE, PORQUE O ATRITO SUPERFICIAL DAS PARTÍCULAS COM O FLUIDO SUPERA AS OUTRAS CAUSAS DE PERDA DE ENERGIA, OU SEJA, O ATRITO NA PAREDE E AUMENTO DE ALTURA DO LEITO.

LEWIS, GILLILAND E BAUER, VERIFICARAM QUE A PERDA DE CARGA MEDIDA EXPERIMENTALMENTE PODE SER ATÉ 20% MAIOR DO QUE O PESO DO LEITO, FATO QUE ATRIBUÍRAM AO ATRITO DAS PARTÍCULAS CONTRA A PAREDE, POIS O EFEITO OBSERVADO FOI MUITO SUPERIOR AO ATRITO FLUIDO.

ESSE EFEITO É DESPREZÍVEL PARA LEITOS POUCO PROFUNDOS (L MENOR QUE 2,6 DIÂMETROS), AUMENTANDO À MEDIDA QUE A RELAÇÃO ENTRE A PROFUNDIDADE E O DIÂMETRO AUMENTA.

ALGUMAS CORRELAÇÕES EMPÍRICAS, VALEM TANTO PARA LEITOS FLUIDIZADOS, COMO LEITOS FIXOS.

A CORRELAÇÃO MAIS IMPORTANTE É A DE LEVA, EM FUNÇÃO DE UM NÚMERO DE REYNOLDS MODIFICADO:

D = DIÂMETRO DAS PARTÍCULAS

V = VELOCIDADE DO FLUIDO (VAZÃO/ÁREA TRANSVERSAL DO VASO)

= MASSA ESPECÍFICA DO FLUIDO

= VISCOSIDADE DO FLUIDO

PARA REYNOLDS < 10 A EXPRESSÃO É:

ONDE O FATOR DE FORMA DE LEVA =  $0,25(a/b)^{2/3}$

OUTRAS CORRELAÇÕES SÃO DE CARMAN, ZENS E OTHMER, ERGUN.