

Outro parâmetro avaliado pelos autores foi a fração de volume das bolhas, ϵ_b , medida em vários níveis e posições radiais em cada leito. Na Figura 2.6 observa-se a distribuição da fração de volume média de bolha em determinada altura do leito. Nota-se que ϵ_b média foi maior para velocidades superficiais altas na base do leito, mas diminuiu rapidamente até cerca de 0,10 m acima da placa injetora tornando-se aproximadamente constante acima deste valor.

Os autores também verificaram as forças atuantes no escoamento em vários níveis e posições radiais dentro do leito. Estas forças governam o fluxo de partículas através do leito. Foi estimado que na parte inferior do leito, até 0,4 m acima da base, existia uma região de circulação onde parte das partículas fluíam subindo ao longo da parede do leito enquanto a outra parte descia pelo centro do leito. Em níveis acima de 0,4 m da base do leito, há outra região de circulação onde as partículas fluem descendo ao longo da parede e sobem pelo centro do leito.

Os autores concluíram que na região inferior do leito, até 0,20 m acima da sua base, as bolhas pequenas coalescem, crescem rapidamente e aglomeram-se subindo pela região central. Em leitos com diâmetros proporcionalmente reduzidos por um fator de escala, as bolhas coalescem mais e o leito pode atingir a condição de escoamento pistonado.

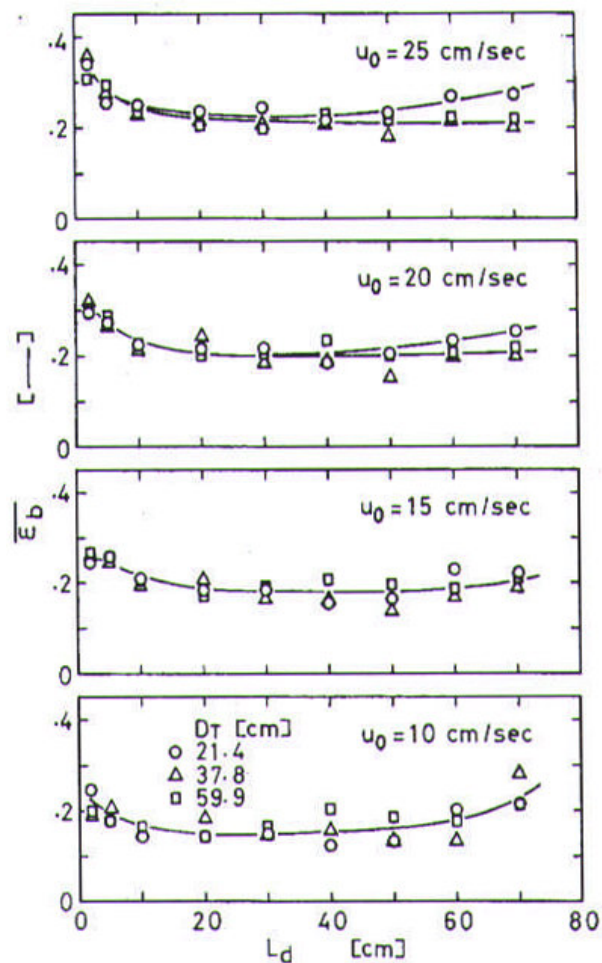


Figura 2.6 – Distribuição longitudinal da fração de volume médio de bolhas. (TOMITA & ADACHI, 1972).

Nicastro & Glicksman (1984) realizaram experimentos para verificação das relações de escala entre dois leitos fluidizados: um de bancada para testes a frio e outro piloto para testes a quente queimando um carvão mineral betuminoso. Além da similaridade geométrica dos leitos, os adimensionais empregados para obtenção de similaridade dinâmica entre os leitos foram: Re_d , Fr_d , ρ_s/ρ_f , D/d , L/d , φ_s e distribuição granulométrica. Com temperaturas de 777 °C e 27 °C para as plantas piloto e de bancada, respectivamente, os autores apresentaram os fatores de escala descritos na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Fatores de escala para que uma planta de bancada operando a 27°C simule uma planta piloto operando a 777 °C.

planta de bancada	planta piloto
(d_s) leito frio	= 0,25.(d_s) leito quente
(U) leito frio	= 0,50.(U) leito quente
(ρ_s) leito frio	= 3,50.(ρ_s) leito quente
(h) leito frio	= 0,25.(h) leito quente
(L) leito frio	= 0,25.(L) leito quente
(φ_s) leito frio	= 1,00.(φ_s) leito quente

Fonte: Nicastro & Glicksman (1984).

Note-se que há fatores de escala diferentes para as variáveis considerando um único fator de escala geométrico. Isto se deve à similaridade dinâmica exigida para os leitos. A planta piloto era constituída por uma coluna de seção quadrada de lado $L=0,61$ m e altura de 4,4 m. Possuía um distribuidor com 64 injetores de torre com altura de 75,4 mm, diâmetro externo de 15,88 mm e 4 orifícios radiais de 5 mm de diâmetro. Durante a combustão de carvão mineral, a temperatura do leito era mantida por tubos trocadores de calor de 32 mm de diâmetro externo posicionados ou dentro do leito ou no “freeboard”, tendo aproximadamente $0,3 \text{ m}^2$ de área total de troca de calor. A planta de bancada era uma cópia geométrica da planta piloto, com todas as dimensões do leito, distribuidor e componentes internos reduzidos pelo fator de escala de 4, conforme a Tabela 2.6. Na planta de bancada foram realizados dois tipos de experimentos: um utilizando grânulos de ferro como material do leito para obtenção dos valores dos adimensionais aproximadamente iguais; o outro utilizando o mesmo material da planta piloto para obtenção dos valores adimensionais diferentes entre os leitos. As condições operacionais nas duas plantas durante os testes foram descritas na Tabela 2.7. Exceto, pelos valores das relações de densidade, note-se a proximidade de valores dos parâmetros adimensionais nas plantas piloto e de bancada com leito de grânulos de ferro. Segundo os autores, neste caso os leitos apresentam similaridade no padrão de fluidização. O mesmo não ocorre quando o material do leito da planta de bancada é o mesmo da planta piloto (areia e carvão), pois há uma variação considerável nos valores dos adimensionais Re_d , ρ_s/ρ_f e H/d_s .

Tabela 2.7 – Condições operacionais e parâmetros adimensionais para as plantas piloto e de bancada.

	Piloto	Bancada	Bancada
Material do leito	Areia e carvão	Grânulos de ferro	Areia e carvão
T_b (°C)	828	27	26
ρ_s (Kg/m ³)	2630	7380	2630
d_s (µm)	677	170	677
U (m/s)	0,93	0,74	0,94
H (m)	0,92	0,24	0,23
ϵ_{mf}	0,49	0,57	0,49
ϵ_f	0,60	0,64	0,62
U_{mf}	0,16	0,10	0,18
Re_d	5,17	5,33	41,8
Fr_d	129	130	132
ρ_s/ρ_f	7280	5920	2170
H/ d_s	1360	1410	330
L/H	0,66	0,64	0,67

Fonte: Nicastro & Glicksman (1984).

Outros experimentos similares com leitos de escalas geométricas diferentes foram realizados por Fitzgerald *et al* (1984), que trabalharam com quatro plantas de leito fluidizado, todas com feixes de tubos imersos no leito: uma planta comercial de seção quadrada de lado 1,830 m, e as outras três de bancada com seções de 0,460 m x 0,460 m, 0,127 m x 0,483 m e 0,064 m x 0,242 m. O objetivo era verificar a possibilidade de leitos frios, em escala reduzida, serem empregados para previsão correta do comportamento hidrodinâmico de combustores de leito fluidizado comerciais. Isto com fator de escala aplicado também às partículas do leito. Os experimentos consistiram basicamente de medições de pressão no leito. Os autores compararam dados de flutuação de pressão em função do tempo para cada leito operando em diversas condições. Os resultados mostram a existência de similaridade entre os leitos com respeito às flutuações periódicas de pressão. Os autores também

concluíram que a velocidade superficial teve influência desprezível na frequência de flutuação de pressão dos leitos.

Zhang & Yang (1987) fizeram uma análise das forças atuantes no escoamento dos gases em leitos fluidizados borbulhantes. O objetivo era a redução do número de parâmetros adimensionais através de um critério geral de similaridade. Segundo os autores, algumas forças atuantes no fluido podem ser desprezadas quando comparadas às forças de interação entre fluido e partícula. Três conjuntos de adimensionais foram propostos:

$$g.D/U^2, \rho_s^2 . g . (\varphi_s . d_s)^4 / (\mu_f^2 . D) \quad (2.26)$$

para escoamento viscoso: $Re_p < 4$;

$$g.D/U^2, \rho_f D / (\rho_s . \varphi_s . d_s) \quad (2.27)$$

para escoamento inercial: $Re_p > 400$;

$$g.D/U^2, \rho_s^2 . g . (\varphi_s . d_s)^4 / (\mu_f^2 . D), \rho_f D / (\rho_s . \varphi_s . d_s) \quad (2.28)$$

região intermediária: $4 < Re_p < 400$;

Os autores realizaram testes com duas colunas de leito fluidizado, Figura 2.7, para verificação da validade dos conjuntos adimensionais propostos.

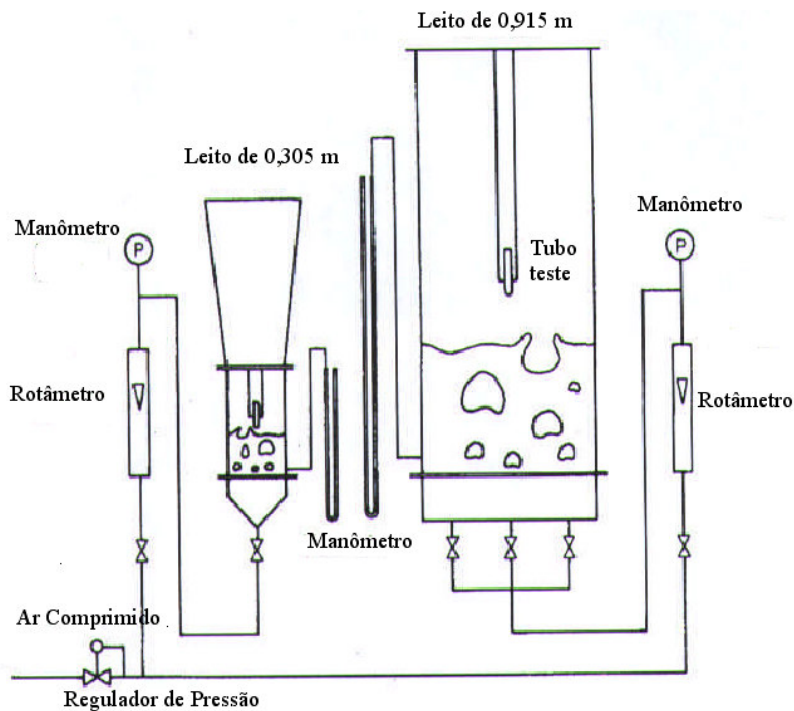


Figura 2.7 – Esquema do sistema experimental com dois leitos fluidizados. A relação de escala é 1/3. Fonte:Zhang & Yang (1987).

As colunas eram de material transparente para permitir a observação dos leitos, cujas seções eram $0,915 \times 0,019 \text{ m}^2$ e $0,305 \times 0,013 \text{ m}^2$, tendo assim um fator de escala de 1/3. Note-se que as seções retangulares eram largas e finas, com provável existência de efeito de parede sobre as bolhas e particulado. Tanto assim que a espessura do leito menor apresenta valor duas vezes maior que a requerida pelo fator de escala. O material do leito foi areia com diâmetro médio ajustado pelo fator de escala. Um resumo das condições experimentais é apresentado na Tabela 2.8.

Os autores realizaram testes variando a relação U/U_{mf} de 0,6 a 2,4. Na Figura 2.8 o padrão de fluidização dos leitos foi comparado para valores de U/U_{mf} de 1,79, 2,09 e 2,4. Segundo os autores, os leitos apresentaram similaridade no padrão de fluidização e na taxa de elutriação de partículas.

Tabela 2.8 – Resumo das condições operacionais dos testes de Zhang & Yang (1987).

	Leito menor	Leito maior	Observação
Seção (m ²)	0,305 x 0,013	0,915 x 0,019	
d _p (μm)	557	805	
U _{mf} (m/s)	0,355	0,615	Região intermediária
Re _d	12,8	32,1	Temperatura ambiente
H (m)	0,141	0,423	

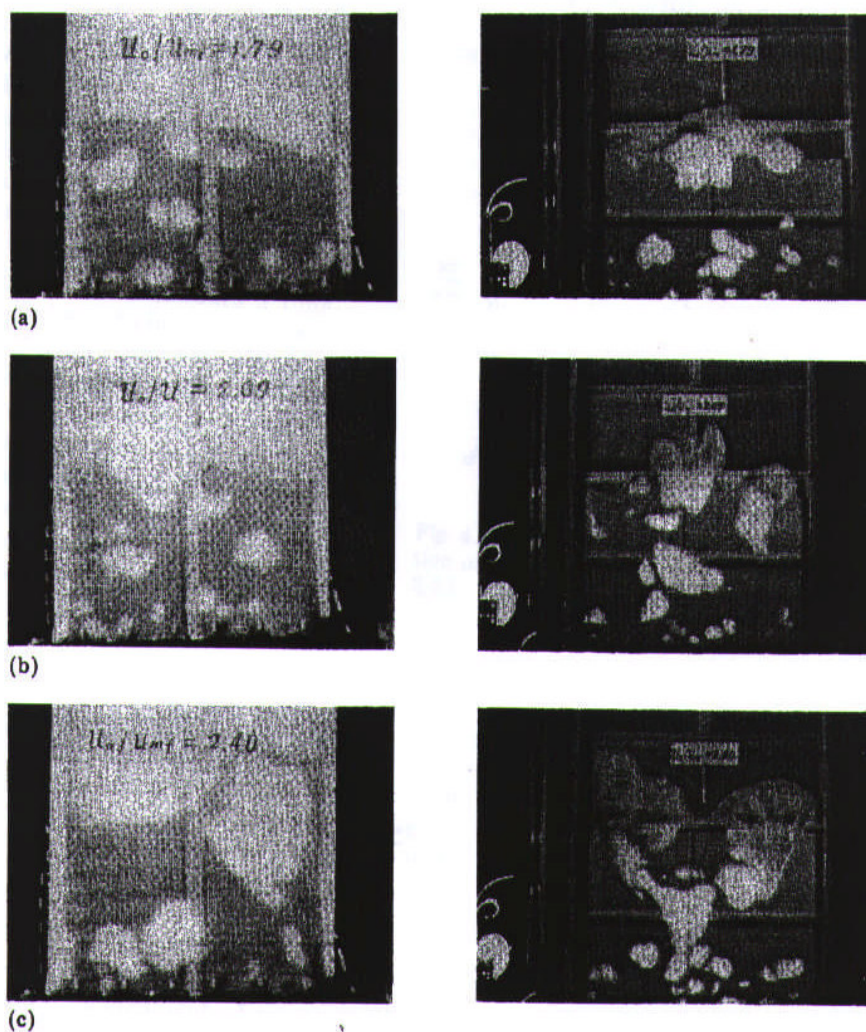


Figura 2.8 – Fotografias dos leitos menor e maior, respectivamente, com velocidades de fluidização diferentes: (a) $U/U_{mf}=1,79$; (b) $U/U_{mf}=2,09$; (c) $U/U_{mf}=2,40$. Fonte: Zhang & Yang (1987).

Horio et al. (1986) também propuseram um conjunto reduzido de parâmetros característicos de leitos fluidizados para obtenção de similaridade. Os autores basearam-se na hidrodinâmica de bolhas enfocando os fenômenos de coalescência e rompimento de bolhas no topo do leito. Inicialmente uma similaridade geométrica completa deve existir entre os leitos, ou seja, o modelo geometricamente similar deve ser m vezes maior que o modelo base considerado, conforme ilustrado na Figura 2.9. Assim foi assumido que a altura do leito, o diâmetro da coluna, o diâmetro dos orifícios do distribuidor, o passo dos orifícios, e outros parâmetros estruturais devem ser proporcionalmente modificados por um fator de escala, segundo a eq.(2.29) onde o sobrescrito 0 refere-se ao modelo base.

$$m = \frac{L_f}{L_f^0} = \frac{D}{D^0} = \frac{P_n}{P_n^0} = \frac{d_n}{d_n^0} \quad (2.29)$$

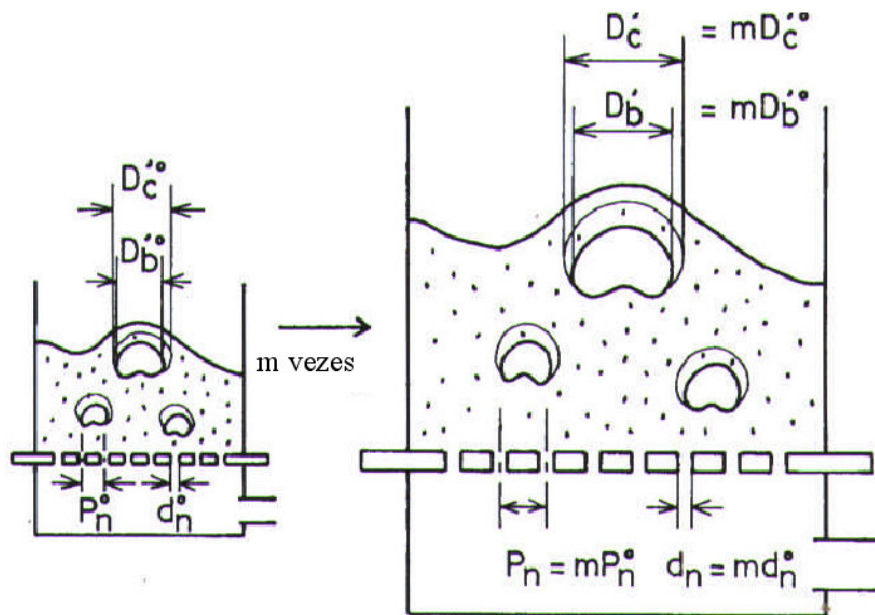


Figura 2.9 – Esquema de dois leitos com similaridade geométrica completa. Fonte: Horio et al (1986).

Segundo os autores a hidrodinâmica de um leito fluidizado é quase completamente determinada pelo padrão de bolhas. Sendo assim, dois leitos similares geometricamente e operando em condições de fluidização similares terão uma condição de borbulhamento geometricamente similar entre eles. Os autores apresentaram uma

condição para a coalescência de bolhas geometricamente similares, descrita na eq.(2.29), e uma condição para campo de escoamento geometricamente similar em torno de uma bolha e rompimento similar de bolha, descrita na eq.(2.30).

$$U_0 - U_{mf} = \sqrt{m} \cdot (U_0^0 - U_{mf}^0) \quad (2.30)$$

$$U_{mf} = \sqrt{m} \cdot U_{mf}^0 \quad (2.31)$$

Note-se, entretanto, que fisicamente a velocidade mínima de fluidização é função apenas das propriedades do fluido e do sólido, incluindo densidade e esfericidade.

Para verificação da validade das eq.(2.30) e (2.31), os autores realizaram experimentos em três leitos fluidizados de diâmetros diferentes mas similares geometricamente. Os diâmetros das colunas eram 0,24 m, 0,10 m e 0,041 m. Cada leito possuía um distribuidor similar tipo placa perfurada com 223 furos em passo triangular que fluidizava esferas de vidro de diâmetro 236 μm , ou 305 μm , ou 376 μm . Os experimentos foram divididos em três séries de testes em função das condições operacionais. O objetivo era examinar se certas condições de fluidização permaneceriam similares se ambas as eq.(2.30) e (2.31) fossem satisfeitas. Os autores concluíram que o padrão de distribuição, borbulhamento e escoamento intersticial num leito fluidizado pode ser feito geometricamente similar com leitos de escalas diferentes se a estrutura da coluna for similar e as eq.(2.30) e (2.31) forem satisfeitas.

Conforme exposto, evidencia-se a dificuldade grande relacionada ao escalonamento de leitos fluidizados. Observa-se que o presente trabalho refere-se apenas ao estudo do efeito de diferentes escalas de reator sobre processos reativos relevantes. Não se pretendeu desenvolver ou verificar diferentes propostas de similaridade para escalonamento de reatores.