

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**

**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS**

**DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR**

**DOUTORAMENTO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**

**VALIDAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA DESCREVER A  
FLUIDODINÂMICA DE UM RISER A FRIO UTILIZANDO ATENUAÇÃO GAMA**

**ANA CRISTINA BEZERRA AZEDO DE MELO**

**RECIFE – PERNAMBUCO – BRASIL**

**DEZEMBRO – 2004**

**VALIDAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA DESCREVER A  
FLUIDODINÂMICA DE UM RISER A FRIO UTILIZANDO ATENUAÇÃO GAMA**

**ANA CRISTINA BEZERRA AZEDO DE MELO**

**VALIDAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA DESCREVER  
A FLUIDODINÂMICA DE UM RISER A FRIO UTILIZANDO  
ATENUAÇÃO GAMA**

Tese submetida ao Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do título de Doutor em Ciência, Área de Concentração: Radioquímica e Aplicação de Radioisótopos.

**ORIENTADORES: Prof. Dr. CARLOS COSTA DANTAS**

**Prof. Dr. VALDEMIR ALEXANDRE DOS SANTOS**

**RECIFE – PERNAMBUCO – BRASIL**

**DEZEMBRO– 2004**

**VALIDAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA  
DESCREVER A FLUIDODINÂMICA DE UM RISER A  
FRIO UTILIZANDO ATENUAÇÃO GAMA**

Ana Cristina Bezerra Azedo de Melo

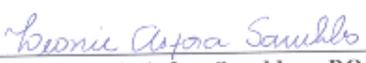
APROVADA EM: 21.12.2004

ORIENTADORES: Prof. Dr. Carlos Costa Dantas  
Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos

COMISSÃO EXAMINADORA:

  
Prof. Dr. Carlos Costa Dantas - DEN/UFPE

  
Prof. Dr. César Augusto Moraes de Abreu - DEQ/UFPE

  
Prof. Dra. Leonie Asfora Sarubbo - DQ/UNICAP

  
Prof. Dr. Luiz Stragevitch - DEQ/UFPE

  
Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira - DEN/UFPE

Visto e permitida a impressão

  
Coordenador do PROTEN/DEN/UFPE

Dedico a minha Família : meus Pais: Pedro e Yvonete, meus irmãos: Ana Maria, Anete e Pedro e aos meus sobrinhos: Paula, Sidney, Pedro Vitor, Lucas, Brenda e Débora

## AGRADECIMENTOS

A DEUS o meu criador e que lhe confio a minha fé.

Aos meus pais (Pedro e Yvonete), pela paciência e compreensão em todas as etapas do meu trabalho.

Aos meus orientadores Carlos Costa Dantas e Valdemir Alexandre dos Santos, pela paciência e incentivo durante todo o período de Tese.

Ao Comitê de Avaliação (Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira, Dr. Luiz Stregvitch, Dr. Rajandra Narain), pelas sugestões durante todo o trabalho de Tese que só vieram a enriquecer este texto.

Ao Prof. Marcos Crispino pelos esclarecimentos na realização deste trabalho.

Ao Prof. Antônio Otavio por todo apoio dado na realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Carlos Brayner coordenador do curso de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares pelo incentivo e paciência na realização deste trabalho.

A Banca Examinadora (Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira, Dr. César Augusto Moraes de Abreu, Dra. Leonie Asfora Sarubbo e Dr. Luiz Stregvitch) pelas sugestões tão significativas para a edição deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Mohamed Benachour pelo apoio que sempre me deu.

A Todos do Laboratório de Radioquímica (Antônio, Edimilson, Airton, Wagner, Raquel, James, Marcelo, Pedro, Hilton e Almira) por toda ajuda dada na parte experimental de atenuação gama.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de doutorado, permitindo-me realizar este trabalho.

A CTPETRO/FINEP/ PETROBRAS pelo financiamento e suporte para a realizar este trabalho.

A FACEPE pela bolsa de finalização de doutorado.

Aos meus amigos (Lina, Helena, Olga, Aderito, Edivânia, Dijanira, Eliete e Ricardo) pela força e estímulo.

A José Alves (reprografia), Magali e Nilvânia (secretária), pelo suporte dado à realização deste trabalho.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram com seus ensinamentos, críticas e sugestões, para realização deste trabalho.

<b>SUMÁRIO</b>	<b>Pág.</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>XIV</b>
<b>NOMENCLATURA.....</b>	<b>XV</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>XIV</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>XXI</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>01</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>04</b>
<b>2.1 Craqueamento Catalítico Fluido.....</b>	<b>04</b>
<b>2.2 Parâmetros Fluidodinâmicos Relevantes.....</b>	<b>08</b>
<b>2.3 Modelos Experimentais a Frio.....</b>	<b>16</b>
<b>2.3.1 Fundamentos.....</b>	<b>16</b>
<b>2.3.2 Critérios operacionais e de escala.....</b>	<b>20</b>
<b>2.3.3 Modelos a frio da literatura.....</b>	<b>22</b>
<b>2.4 Técnica de Atenuação Gama.....</b>	<b>25</b>
<b>2.4.1 Interação da radiação gama com a matéria.....</b>	<b>25</b>
<b>2.4.2 Coeficiente de atenuação.....</b>	<b>27</b>
<b>2.4.3 Sistema de detecção.....</b>	<b>29</b>
<b>2.4.4 Determinação do coeficiente de atenuação.....</b>	<b>29</b>
<b>2.4.5 Erros nas medidas.....</b>	<b>30</b>
<b>2.5 Modelos Fluidodinâmicos.....</b>	<b>31</b>
<b>2.6 Validação de Modelos.....</b>	<b>35</b>

2.6.1 Verificação e validação.....	35
2.6.2 Metodologia de comparação do modelo com dados experimentais.....	39
2.7 Síntese da Revisão Bibliográfica.....	42
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>44</b>
3.1 Arranjo Experimental.....	44
3.1.1 Modelo Experimental a Frio (MEF).....	44
3.1.2 Detalhamento do MEF.....	46
3.1.3 Sistema de produção e monitoração do ar Comprimido.....	51
3.1.4 Sistema de controle computacional dos parâmetros operacionais.....	53
3.1.5 Sistema de medidas por meio de atenuação gama.....	57
3.2 Validação dos Modelos.....	61
3.3 Planejamento Fatorial.....	65
3.4 Análise da Sensibilidade dos Parâmetros Envolvidos.....	69
3.5 Realização de Medidas.....	73
3.5.1 Definição das condições operacionais do MEF.....	73
3.5.2 Procedimentos de medidas dos parâmetros fluidodinâmicos.....	80
3.6 Simulação da Fluidodinâmica do Riser.....	81
3.6.1 Estimativas de valores de contorno.....	81
3.6.2 Programa de simulação.....	84
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>89</b>

4.1 Dados Experimentais.....	89
4.2 Comparação entre Valores Experimentais e Simulados.....	96
4.3 Modelos Fluidodinâmicos Validados.....	99
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>109</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>112</b>
<b>APÊNDICE A – Calibrações dos medidores de vazão dos componentes e resultados preliminares.....</b>	<b>118</b>
<b>APÊNDICE B – Programas computacionais utilizados.....</b>	<b>120</b>
<b>APÊNDICE C – Resultados experimentais e simulados.....</b>	<b>125</b>
<b>APÊNDICE D – Técnicas estatísticas utilizadas na validação de modelos.....</b>	<b>127</b>
<b>APÊNDICE E – Análise de incertezas.....</b>	<b>133</b>
<b>APÊNDICE F – Modelagem da fluidodinâmica do <i>riser</i>.....</b>	<b>134</b>
<b>APÊNDICE G – Estatística das contagens.....</b>	<b>140</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA	pag
1. Esquema típico de uma refinaria de petróleo, com destaque para a unidade de FCC (ABADIE, 1999)	05
2. Fração volumétrica em função da velocidade do fluido num escoamento bicomponente (STRUMILLO e KUDRA, 1996)	10
3. Esquema ilustrando distribuições de gás e sólidos em um <i>riser</i>	12
4. Comportamento dos parâmetros fluidodinâmicos relevantes	13
5. Variação da queda de pressão com a velocidade do fluido em um <i>riser</i> gás-sólido	14
6. Esquema Simplificado de uma unidade de FCC	18
7. Esquema básico de funcionamento de um modelo a frio de uma FCC	20
8. Arranjo experimental utilizado por Rolim (1995)	23
9. Arranjo experimental utilizado por Moortel et al (1998)	24
10. Arranjo experimental utilizado por Woczikosky (2002)	25
11. Esquema do processo de validação com a verificação fazendo parte como um componente (GRACE e TAGHIPOUR, 2004)	38
12. Esquema do projeto do MEF	45
13. O MEF e seus principais componentes	46
14. Esquema com componentes do ciclone separador	47
15. Ciclone separador	48
16. Sistema de controle e alimentação do fluxo de sólidos para o <i>riser</i> do MEF	50
17. <i>Riser</i> com pulsação do fluxo de catalisador	50
18. <i>Riser</i> com redução da pulsação do fluxo de catalisador	51
19. Sistema de monitoração controle da alimentação do ar	52
20. Medidor de vazão de condutividade térmica	52
21. Tela do sistema de controle computacional	54

22. Tela de controle do elevador	56
23. Tela de resultados das variáveis do processo	57
24. Sistema de medidas da intensidade da radiação gama	59
25. Espectro do Am 241 obtido com o programa Genie 2000	60
26. Esquema da metodologia proposta	62
27. Esquema do planejamento de experimento 2 <sup>2</sup>	65
28. Diagrama para interpretação dos resultados do planejamento fatorial 2 <sup>2</sup>	67
29. Vazão mássica do catalisador em função da rotação do motor	74
30. Variação da vazão do ar em função do percentual de vazão	75
31. Posições axiais das medidas de atenuação gama	76
32. Variação da fração volumétrica em função da vazão do ar	78
33. Variação da fração volumétrica em função da rotação do motor	79
34. Comparação entre os valores experimentais e calculados da fração volumétrica do sólido no <i>riser</i> de uma piloto tipo FCC	83
35. Algoritmo da sub-rotina de arquivo M	85
36. Programa script que armazena os dados de saída	86
37. Fluxograma do algoritmo de simulação dos modelos fluidodinâmicos	88
38. Fração volumétrica do sólido em função da altura relativa do <i>riser</i>	91
39. Fração volumétrica do gás em função da altura relativa do <i>riser</i>	92
40. Velocidade do sólido em função da altura relativa do <i>riser</i>	93
41. Velocidade do gás função da altura relativa do <i>riser</i>	94
42. Razão de escorregamento em função da altura relativa do <i>riser</i>	95
43. Fração volumétrica do sólido experimental e simulada pelos modelos adotados	96
44. Velocidade do sólido experimental e simulada pelos modelos adotados	97
45. Razão de escorregamento experimental e simulada pelos modelos adotados	98
46. Queda de pressão em função da velocidade do gás experimental e simulada pelos modelos adotados	99
47. Comparação dos valores experimentais e simulados da fração volumétrica sólido	100

48. Comparação dos valores experimentais e simulados da fração volumétrica sólido	100
49. Comparação dos valores experimentais e simulados da velocidade do sólido	102
50. Comparação dos valores experimentais e simulados da velocidade do sólido	102
51. Comparação dos valores experimentais e simulados da razão de escorregamento	104
52. Comparação dos valores experimentais e simulados da razão de escorregamento	104
53. Comparação dos valores experimentais e simulados da queda de pressão no <i>riser</i> , modelo Santana, Rocha e Kachan (1988)	106
54. Comparação dos valores experimentais e simulados da queda de pressão no <i>riser</i> , modelo Maladi e Otero (1983)	106

**LISTA DE TABELAS****TABELA**

1. Características físicas e de operação do <i>riser</i> de unidades de FCC e dos respectivos modelos a frio	21
2. Valores de números adimensionais em uma FCC e no MEF	21
3. Parâmetros físicos e faixa de simulação dos modelos matemáticos	35
4. As fontes de erros e desvios entre os valores preditos pelo modelo e dados experimentais	37
5. Composição química do catalisador	47
6. Resultados de um planejamento fatorial $2^2$ para estudar o efeito da vazão das fases na fração volumétrica do sólido	66
7. Efeitos calculados para o planejamento fatorial $2^2$ da Tabela 6	68
8. Valores-base dos parâmetros do modelo empregados na análise da sensibilidade para $\pm 10\%$	71
9. Sensibilidade da fração volumétrica do sólido (%)	72
10. Condições experimentais para as medidas da fração volumétrica do sólido	77
11. Vazões e respectivas simbologia adotadas para representar os gráficos	89
12. Análise dos resultados experimentais e simulados da fração volumétrica do sólido	101
13. Análise dos resultados experimentais e simulados da velocidade do sólido	103
14. Análise dos resultados experimentais e simulados da razão de escorregamento	105
15. Análise dos resultados experimentais e simulados da queda de pressão modelo Santana, Rocha e Kachan (1988)	107
16. Análise dos resultados experimentais e simulados da queda de pressão modelo Maladi e Otero (1983)	107

## NOMENCLATURA

### Letras Latinas

a	parâmetro que depende da condutividade e do tamanho da partícula;
A	área da seção transversal do riser, m <sup>2</sup>
c	velocidade da luz, m/s
C <sub>D</sub>	coeficiente de arraste
D	diâmetro interno do riser, m
d <sub>p</sub>	diâmetro da partícula, m
E <sub>Qs</sub>	efeito principal da velocidade do ar
E <sub>Uar</sub> E <sub>Qs</sub>	efeito da interação da velocidade do ar e vazão mássica do sólido
E <sub>Uar</sub>	efeito principal da vazão mássica do sólido
E <sub>γ</sub>	Energia da radiação gama, J
e	Rugosidade relativa, m
m <sub>0</sub>	Massa do elétron em repouso, kg
f <sub>g</sub>	coeficiente de atrito do gás
f <sub>holdup</sub>	fator de holdup
f <sub>s</sub>	coeficiente de atrito do sólido
f <sub>w</sub>	é a força de atrito do gás com as paredes do <i>riser</i> dada pela equação de Fanning, kg/m.s <sup>2</sup>
F	Função sensibilidade
F <sub>arraste</sub>	Força de arraste, N/m <sup>3</sup>
Fr	número de Froude
F <sub>s</sub>	fluxo mássico do sólido, kg/s
F <sub>g</sub>	fluxo mássico do gás, kg/s
F <sub>cat</sub>	fluxo mássico do catalisador, kg/s
F <sub>oil</sub>	fluxo mássico do óleo, kg/s
g	aceleração da gravidade, m/s <sup>2</sup>
I	intensidade de radiação gama com o tubo em fluxo
I <sub>0</sub>	intensidade de radiação gama com o tubo vazio
L	comprimento do <i>riser</i> , m
M <sub>w1</sub>	peso molecular do óleo, kg/mol
M <sub>w2</sub>	peso molecular do gasóleo, kg/mol

$M_{w3}$	peso molecular de hidrocarbonetos leves, kg/mol
$P$	pressão no <i>riser</i> , N/m <sup>2</sup>
$P_{reg,b}$	pressão na base do regenerador, N/m <sup>2</sup>
$Q_g$	vazão volumétrica do gás, m <sup>3</sup> /s
$Q_s$	vazão volumétrica do sólido, m <sup>3</sup> /s
$R$	constante dos gases, N.m/(mol. K)
$Re_g$	número de Reynolds do gás
$Re_p$	número de Reynolds da partícula sólida
$Re_s$	número de Reynolds do sólido
$S$	razão de escorregamento da fluidodinâmica
$SU_g$	sensibilidade paramétrica percentual do gás, %
$SU_s$	sensibilidade paramétrica percentual do sólido, %
$SE_s$	sensibilidade paramétrica percentual da fração volumétrica do sólido, %
$SP$	sensibilidade paramétrica percentual da pressão, %
$S_\infty$	razão de escorregamento na região completamente desenvolvida
$T$	temperatura do <i>riser</i> , K
$U_g$	velocidade local do gás, m/s
$U_{g0}$	velocidade superficial inicial do gás, m/s
$U_{gx}$	velocidade do gás na direção x, m/s
$U_{gy}$	velocidade do gás na direção y, m/s
$U_{gz}$	velocidade do gás na direção z, m/s
$U_{in}$	velocidade de entrada no <i>riser</i> , m/s
$U_{mf}$	velocidade mínima de fluidização, m/s
$U_s$	velocidade local do sólido, m/s
$U_{s0}$	velocidade superficial inicial do sólido, m/s
$U_{out}$	velocidade de saída no <i>riser</i> , m/s
$U_{sz}$	velocidade do sólido na direção z, m/s
$U_{s\infty}$	velocidade constante dos sólidos na região completamente desenvolvida, m/s.
$U_t$	velocidade terminal das partículas, m/s
$V$	volume do <i>riser</i> , m <sup>3</sup>

$V_g$	volume do gás, $m^3$
$V_s$	volume do sólido, $m^3$
$V_t$	volume total do leito, $m^3$
$X_1$	fração mássica do gasóleo no <i>riser</i>
$X_2$	fração mássica da gasolina no <i>riser</i>
$X_3$	fração mássica de hidrocarbonetos leves no <i>riser</i>
$X_4$	fração mássica do coque no <i>riser</i>
$X_5$	temperatura no <i>riser</i>
$z$	coordenada na direção $z$ do <i>riser</i> , $m$
$z/L$	altura relativa do <i>riser</i>
$Z_0$	comprimento característico ( $m$ )
$W$	fluxo de sólidos no <i>riser</i> ( $kg/m^2.s$ )

### Letras Gregas

$\Delta P_{Ac}$	queda de pressão devido a aceleração de sólidos, $N/m^2$
$\Delta P_{ES}$	queda de pressão devido ao peso da coluna estática, $N/m^2$
$\Delta P_{fg}$	queda de pressão devido a fricção do gás, $N/m^2$
$\Delta P_{fs}$	queda de pressão devido a fricção do sólido, $N/m^2$
$\Delta P_{riser}$	queda de pressão total no <i>riser</i> , $N/m^2$
$\epsilon$	fração volumétrica da fase
$\epsilon_a$	fração volumétrica na região diluída do <i>riser</i>
$\epsilon^*$	fração volumétrica na região densa do <i>riser</i>
$\epsilon_g$	fração volumétrica do gás
$\epsilon_{mf}$	fração volumétrica na mínima fluidização
$\epsilon_s$	fração volumétrica do sólido
$\bar{\epsilon}_{gac}$	fração volumétrica do gás na região de aceleração de sólidos
$\bar{\epsilon}_{gcd}$	fração volumétrica do gás na região completamente desenvolvida
$\mu$	coeficiente de atenuação linear do meio absorvedor, $m^{-1}$
$\mu_g$	viscosidade dinâmica do gás, $kg/m.s$
$\tau$	coeficiente de atenuação linear do efeito Compton, $m^{-1}$
$\tau_r$	tempo de residência, $s$

$\rho$	densidade do material, $\text{kg/m}^3$
$\rho_{sr}$	densidade aparente do catalisador, $\text{kg/m}^3$
$\rho_{ic}$	densidade do catalisador em leito compactado, $\text{kg/m}^3$
$\rho_{sk}$	densidade esquelética do catalisador, $\text{kg/m}^3$
$\rho_g$	densidade do gás, ( $\text{kg/m}^3$ )
$\rho_m$	densidade média do sólido, ( $\text{kg/m}^3$ )
$\rho_s$	densidade do sólido, $\text{kg/m}^3$
$\sigma$	Coefficiente de atenuação linear do efeito fotoelétrico, $\text{m}^{-1}$
$\sigma_{dp}$	incerteza do diâmetro da partícula sólida, m
$\sigma_D$	incerteza do diâmetro do <i>riser</i> , m
$\sigma_L$	incerteza do comprimento do <i>riser</i> , m
$\sigma_{\mu g}$	incerteza da viscosidade dinâmica do gás, $\text{kg/m.s}$
$\sigma_{\rho s}$	incerteza da densidade do sólido, $\text{kg/m}^3$
$\alpha_s$	coeficiente de atenuação de massa do sólido para a energia considerada, $\text{m}^2/\text{kg}$
$\kappa$	Coefficiente de atenuação linear do efeito formação de par, $\text{m}^{-1}$

## VALIDAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA DESCREVER A FLUIDODINÂMICA DE UM RISER A FRIO UTILIZANDO ATENUAÇÃO GAMA

Autora: Ana Cristina Bezerra Azedo de Melo

Orientador Interno: Prof. Dr. Carlos Costa Dantas – DEN/UFPE

Orientador Externo: Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos – CCT/UNICAP

### RESUMO

O comportamento fluidodinâmico do *riser* de um modelo a frio tipo FCC foi investigado por meio das medidas da distribuição da concentração do catalisador com atenuação gama e simulação com modelo matemático. No *riser* do modelo a frio, MEF, com 0,032 m de diâmetro 2,3 m de comprimento circula o leito fluidizado cujos componentes são ar e catalisador de FCC. A unidade MEF opera com controle automático e instrumentos de medidas das variáveis fluidodinâmicas. A distribuição axial da concentração do catalisador foi medida utilizando-se uma fonte de Am-241 e detector de NaI(Tl) associado a multicanal com software de aquisição e avaliação de dados. O MEF foi adaptado para a validação de modelo fluidodinâmico que descreve o escoamento no *riser*, como por exemplo, a introdução de injetor para controle do fluxo de sólidos em circulação. Modelos matemáticos foram selecionados na literatura, analisados e testados para simular a fluidodinâmica do *riser*. Foi estudada e implementada uma metodologia para validar modelos fluidodinâmicos. As etapas do trabalhos foram desenvolvidas de acordo com a metodologia de validação, como planejamento de dados experimentais, estudo das equações que descrevem a fluidodinâmica, aplicação de solvers computacionais e avaliação da simulação em comparação com os dados experimentais. Corridas foram realizadas com as condições do MEF definidas para medir a concentração do catalisador e sendo medidas simultaneamente as variáveis fluidodinâmicas, velocidade dos componentes e variação da pressão no *riser*. Em seguida foram comparados valores simulados e valores experimentais, com o tratamento estatístico dos dados, visando a precisão requerida para validar o modelo fluidodinâmico. Os testes de comparação entre dados experimentais e simulados foram realizados sob os critérios de validação. O comportamento fluidodinâmico do *riser* foi analisado, os resultados e a concordância com a literatura foram discutidos. O modelo adotado

foi validado nas condições de operação do *riser* do MEF, para uma faixa de vazão do gás de 3 a 6 m/s e o valor da razão de escorregamento entre 1 e 2.

**Palavras chave: riser tipo FCC, atenuação gama, concentração do catalisador, perfil axial.**

# VALIDATION OF MATHEMATICAL MODELS TO DESCRIBE FLUID DYNAMICS OF A COLD RISER BY GAMMA RAY ATTENUATION

Author: Ana Cristina Bezerra Azedo de Melo

Advisor: Prof. Dr. Carlos Costa Dantas - DEN/UFPE

Co- advisor: Prof. Dr. Valdemir Alexandre of Santos - CCT/UNICAP

## ABSTRACT

The fluid dynamic behavior of a riser in a cold type FCC model was investigated by means of catalyst concentration distribution measured with gamma attenuation and simulated with a mathematical model. In the riser of the cold model, MEF, 0,032 m in diameter, 2,30 m in length the fluidized bed, whose components are air and FCC catalyst, circulates. The MEF is operated by automatic control and instruments for measuring fluid dynamic variables. An axial catalyst concentration distribution was measured using an Am-241 gamma source and a NaI detector coupled to a multichannel provided with a software for data acquisition and evaluation. The MEF was adapted for a fluid dynamic model validation which describes the flow in the riser, for example, by introducing an injector for controlling the solid flow in circulation. Mathematical models were selected from literature, analyzed and tested to simulate the fluid dynamic of the riser. A methodology for validating fluid dynamic models was studied and implemented. The stages of the work were developed according to the validation methodology, such as data planning experiments, study of the equations which describe the fluidodynamic, computational solvers application and comparison with experimental data. Operational sequences were carried out keeping the MEF conditions for measuring catalyst concentration and simultaneously measuring the fluid dynamic variables, velocity of the components and pressure drop in the riser. Following this, simulated and experimental values were compared and statistical data treatment done, aiming at the required precision to validate the fluid dynamic model. The comparison tests between experimental and simulated data were carried out under validation criteria. The fluid dynamic behavior of the riser was analyzed and the results and the

agreement with literature were discussed. The adopt model was validated under the MEF operational conditions, for a 3 to 6 m/s gas velocity in the riser and a slip factor between 1 and 2.

**Keywords - key: riser FCC type, gamma attenuation, catalyst concentration, axial profile.**

# 1. INTRODUÇÃO

O uso exclusivo de reatores de fluxo ascendente, ou *riser*, para realização do craqueamento catalítico fluido (Fluid Catalytic Cracking – FCC) representa uma evolução natural do craqueamento em leito fixo. Esta evolução foi impulsionada pelo avanço da tecnologia de catalisadores, sobretudo com o advento da zeólita – Y (FEI, 1997). Assim, substituiu-se o alto tempo de contato em leito fixo – que corresponde ao uso de catalisador, em média bastante coqueado no leito, por variáveis como a temperatura de reação e atividade do catalisador, mais seletivas ao craqueamento catalítico e, portanto, a produtos nobres, objetivo da unidade de FCC.

No *riser*, sob a ação da gravidade, o catalisador tem sua velocidade reduzida, tornando-se mais lento que o escoamento dos hidrocarbonetos em fase gasosa. Esta relação entre velocidades do gás e do catalisador – *slip*, pode ser de 1 a 2. Este fenômeno provoca ainda um acúmulo de catalisador junto à parede, enquanto a parte central do *riser* permanece com pouco catalisador. A concentração de catalisador junto à parede pode ser até 10 vezes maior que a no centro do *riser* (MARTIN, 1992). Junto à parede, tem-se retorno de catalisador – *back mixing*, que favorece a uma indesejável sobreconversão. Já na região mais central do *riser*, a relativa ausência de catalisador leva também à incidência de craqueamento térmico. Trata-se do conhecido efeito *core-annulus*. Uma forma de minimizar essa sobreconversão no reator, minimizando as produções de coque e gás combustível, é promover o escoamento o mais próximo possível ao de um *plug flow*. Além disso, cerca de 4000 t/h de catalisador quente circulam em uma unidade de FCC a velocidades que variam entre 20 e 30 m/s, o que requer mecanismos de operação consideravelmente robustos.

Em uma unidade de FCC muitos dos fenômenos relevantes estão associados com a fluidização e transporte do catalisador que circula a altas taxas (tipicamente 15 000 a 100 000 t/d). Numerosos estudos têm sido realizados desde os primórdios do processo de FCC, contudo, tem sido relativamente difícil prever teoricamente os fenômenos de interações entre gás e partículas durante o transporte da mistura através do *riser*. Contudo, existe uma necessidade de se realizar modelagem e experimentos em diferentes escalas de forma a desenvolver um scale-up de novas tecnologias (GAUTHIER; BAYLE e LEROY, 2000). A pesquisa fundamental é ainda

necessária, neste caso, para um melhor entendimento dos fenômenos básicos e simultâneos de fluidização e transporte. Neste trabalho, modelos matemáticos que descrevem a fluidodinâmica do *riser* foram testados pelo uso de métodos de verificação e validação, como forma de seleção para ferramentas de simulação precisas. Um modelo experimental a frio (MEF) de uma unidade piloto de FCC foi adaptado e utilizado na obtenção dos dados precisos sobre fenômenos fluidodinâmicos que envolvem a fluidização e o transporte do catalisador de craqueamento no *riser*.

Como objetivos específicos estabelecidos para o referido trabalho, obteve-se:

- ✓ Utilizar um arranjo experimental de modelo a frio tipo FCC e adaptar para a validação do modelo matemático que descreve a fluidodinâmica do *riser*.
- ✓ Realizar experimentos para adequar o modelo a frio e os sistemas auxiliares às condições de operação requeridas pela literatura.
- ✓ Selecionar e analisar modelos fluidodinâmicos para simular a fluidodinâmica do *riser* do modelo experimental a frio.
- ✓ Estudar e implementar uma metodologia de validação de modelos fluidodinâmicos.
- ✓ Realizar medidas da distribuição da concentração do catalisador com medidas simultâneas das variáveis fluidodinâmicas, velocidade dos componentes sólido e gasoso e variação da pressão no *riser*, comparar com os valores simulados visando obter a precisão necessária para validar o modelo matemático.
- ✓ Testar os modelos adotados pela comparação com os dados experimentais sob o critério da validação. Analisar o comportamento fluidodinâmico do modelo a frio com base nos dados experimentais e na simulação.

A região de escoamento completamente desenvolvido ocorre a uma altura relativa do *riser* próximo de (0,3 ou 0,25) para os parâmetros fluidodinâmicos: fração volumétrica, velocidade e razão de escorregamento dos componentes sólido e gasoso.

A utilização do MEF e da técnica de atenuação gama permitiram medidas dos parâmetros fluidodinâmicos no *riser* precisos para a validação do modelo de Santana, Rocha e Kachan (1988), com a conservação da quantidade de movimento da mistura acrescentada da contribuição da queda de pressão devido ao atrito dos sólidos com as paredes do *riser*, no qual foi utilizado o coeficiente de atrito de Yang (1978).

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Craqueamento Catalítico Fluido**

O refino de petróleo é basicamente um conjunto de processos físicos e químicos que objetivam a transformação dessa matéria-prima em derivados nobres. Ele começa pela destilação atmosférica, que consiste no fracionamento do óleo cru a ser processado em toda e qualquer refinaria. Tal operação é realizada em colunas de fracionamento, de dimensões variadas, que possuem vários estágios de separação (MARIANO, 2001).

O petróleo, proveniente dos tanques de armazenamento é pré-aquecido e introduzido numa torre de destilação atmosférica. Os derivados desse fracionamento são principalmente gás liquefeito de petróleo (GLP), nafta, querosene, óleo diesel e resíduo atmosférico. Tais frações, retiradas ao longo da coluna em seus vários estágios de separação, são tratadas, para se transformarem em produtos finais, ou serem enviadas como matérias-primas para outros processos de refino que as beneficiarão.

O resíduo atmosférico de uma torre de destilação, relativo à fração mais pesada após novo aquecimento, é submetido a um segundo fracionamento, agora sob vácuo, no qual são gerados cortes de gasóleos e um resíduo de vácuo, conhecido como óleo combustível.

As frações geradas na torre de destilação a vácuo são utilizadas como cargas de outros processos de refino que visam, principalmente, a obtenção de produtos de menor peso molecular e maior valor agregado. Exemplos clássicos desses processos são o Craqueamento Catalítico Fluido (FCC) de gasóleo de vácuo, que apresenta como principais produtos: a gasolina e o GLP, e o coqueamento retardado de resíduo de vácuo, que gera principalmente querosene, diesel e coque. As correntes obtidas nesses processos de craqueamento (catalítico, no primeiro exemplo, e térmico, no segundo) são também enviadas para unidades de tratamento, onde se transformam em produtos acabados. A Figura 1 mostra um esquema típico de uma refinaria de petróleo, destacando a posição de uma unidade de FCC.



interior (ALI, ROHANI e CORRIOU, 1997). No topo do *riser* existe um sistema de separação com dois compartimentos: um ciclone (usado para separar as partículas sólidas dos produtos gasosos) e um *stripper* (usado para regenerar o catalisador). O sistema de separação é considerado um Continuum Stirred Tank Reactor (CSTR).

O regenerador é usado para recuperar o catalisador através da combustão do coque. Ele é um leito fluidizado composto de duas zonas, uma zona densa, onde o catalisador está presente e uma região diluída onde praticamente não há catalisador. Alguns autores consideram que a zona densa é dividida em duas fases, uma fase de emulsão como um CSTR e outra fase de borbulhamento tipo *plug-flow* (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

Pode-se presumir que o craqueamento catalítico fluido de hidrocarbonetos é um sistema complexo tanto de natureza cinética como de natureza fluidodinâmica, além do que processos que envolvem escoamento multicomponente são extremamente difíceis de operar. Numa unidade de FCC o componente mais importante é o *riser*, onde uma mistura constituída de vapores e gasóleo de vácuo e catalisador sofrem reações de craqueamento e estas por sua vez são diretamente influenciadas pela fluidodinâmica do escoamento (ALI, ROHANI e CORRIOU, 1997). Os fluxos mássicos dos componentes sólido e gasoso são:

$$F_s = U_s A (1 - \epsilon_g) \rho_s \quad (1)$$

e

$$F_g = U_g A \epsilon_g \rho_g \quad (2)$$

E correspondem ao fluxo volumétrico de:

$$Q_s = \frac{F_s}{\rho_s} = U_s A (1 - \epsilon_g) \quad (3)$$

e

$$Q_g = \frac{F_g}{\rho_g} = U_g A \epsilon_g \quad (4)$$

Assumindo que existe um razão de escorregamento (*slip*) entre os componentes gasoso e sólido

$$U_g = S U_s \quad (5)$$

A variação da fração volumétrica é influenciada pelo tempo de residência do catalisador e pela variação dos fluxos de gás e sólidos (ALI, ROHANI e CORRIOU, 1997). Adotando-se a equação seguinte para estimativa da massa específica do componente gasoso,

$$\rho_g = \frac{1}{\frac{x_1}{M_{w1}} + \frac{x_2}{M_{w2}} + \frac{x_3}{M_{w3}}} \frac{P}{RT} \quad (6)$$

Os fluxos de massa dos componentes do escoamento em função da altura  $z$  e em função da entrada de gás-óleo no *riser* são:

$$F_g = F_{oil} (x_1 + x_2 + x_3) \quad (7)$$

e

$$F_s = F_{oil} x_4 + F_{cat} \quad (8)$$

Sendo que as velocidades são desses componentes podem ser estimadas de:

$$U_g = \frac{F_{oil} (x_1 + x_2 + x_3) RT}{PA \epsilon_g} \left( \frac{x_1}{M_{w1}} + \frac{x_2}{M_{w2}} + \frac{x_3}{M_{w3}} \right) \quad (9)$$

e

$$U_s = \frac{F_{oil} x_4 + F_{cat}}{\rho_s A (1 - \epsilon_g)} \quad (10)$$

Com as equações das velocidades dos componentes e da razão de escorregamento deduz-se que a fração volumétrica, dependendo da altura do *riser* em uma unidade de FCC, é:

$$\varepsilon_g = \frac{F_{oil}(x_1 + x_2 + x_3) \frac{RT}{P} \left( \frac{x_1}{M_{w1}} + \frac{x_2}{M_{w2}} + \frac{x_3}{M_{w3}} \right)}{F_{oil}(x_1 + x_2 + x_3) \frac{RT}{P} \left( \frac{x_1}{M_{w1}} + \frac{x_2}{M_{w2}} + \frac{x_3}{M_{w3}} \right) + \frac{S}{\rho_s} (F_{oil} x_4 + F_{cat})} \quad (11)$$

Pode-se notar que através das Equações 1 a 11, a descrição da fluidodinâmica em um *riser* baseia-se em determinados parâmetros considerados relevantes, ou seja: velocidades e frações volumétricas dos componentes, bem como correlações envolvendo esses parâmetros. Também são propriedades importantes do sistema as massas específicas dos componentes, a pressão e a temperatura.

## 2.2 Parâmetros Fluidodinâmicos Relevantes

No escoamento gás-sólido, ao moverem-se no mesmo sentido do fluido, ou não, qualquer das possibilidades para os sólidos depende do balanço relativo das forças que atuam sobre os mesmos. No equilíbrio:

$$\text{Força de arraste} + \text{força de empuxo} + \text{força gravitacional} = 0 \quad (12)$$

Para uma partícula esférica de diâmetro  $d_p$  movendo-se em sentido contrário ao da gravidade,

$$\frac{\pi d_p^2}{4} C_D \rho_g \frac{(U_g - U_s)^2}{2} + \frac{\pi d_p^3}{6} g \rho_g - \frac{\pi d_p^3}{6} g \rho_s = 0 \quad (13)$$

Rearranjando e simplificando a Equação 13,

$$U_g - U_s = \left[ \frac{4 g d_p (\rho_s - \rho_g)}{3 \rho_g C_D} \right]^{1/2} \quad (14)$$

Neste caso, para transportar uma partícula esférica em sentido contrário ao da gravidade, a velocidade relativa  $U_g - U_s$  deve superar o valor da velocidade terminal de sedimentação,

$$U_t = \left[ \frac{4 g d_p (\rho_s - \rho_g)}{3 \rho_g C_D} \right]^{1/2} \quad (15)$$

A velocidade terminal de sedimentação é a velocidade constante com a qual uma partícula cairia num fluido estagnado. Para  $Re_p \leq 1$  o arrasto é predominantemente devido ao atrito (FOX, 1992). As leis propostas por Stokes (SHAPIRO, 1961) mostram que, para escoamentos com número de Reynolds muito baixo, onde forças de inércia podem ser desprezadas o coeficiente de arrasto sobre uma esfera de diâmetro  $d_p$  é dado por:

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \quad (16)$$

onde

$$Re_p = \frac{U_g d_p \rho_g}{\mu_g} \quad (17)$$

Combinando as Equações de (17) a (15) tem-se:

$$U_t = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_g) g}{18 \mu_g} \quad (18)$$

Pode-se definir a fração volumétrica ou fração de vazios de um leito gás-sólido como a relação entre o volume do gás e o volume total do leito. Matematicamente,

$$\varepsilon_g = \frac{V_g}{V_t} = \frac{V_t - V_s}{V_t} = 1 - \frac{V_s}{V_t} = 1 - \varepsilon_s \quad (19)$$

A fração volumétrica é um parâmetro de fundamental importância para se determinar a distribuição axial e radial de sólidos no *riser*, pois são essas distribuições que influenciam diretamente no rendimento catalítico do processo.

Inicialmente, os sólidos que formarão um leito fluidizado podem estar agrupados em um leito fixo e serem submetidos a um considerável aumento da velocidade do fluido, sem alteração do tipo de leito. Quando as partículas começam a alterar suas posições, umas em relação às outras, em função desse aumento de velocidade para o fluido, estima-se ter chegado à velocidade onde aproxima-se o estado de fluidização incipiente para o leito – a velocidade de mínima fluidização,  $U_{mf}$  (Figura 2).

Ao ultrapassar a velocidade de mínima fluidização, o leito expande-se com o aumento da velocidade do gás e as partículas vão se afastando uma das outras, com um aumento progressivo da fração volumétrica. Quando a velocidade do fluido alcança a velocidade terminal dos sólidos, a fração volumétrica atinge o valor máximo e pode ficar constante, dependendo da taxa de circulação de sólidos. A partir da velocidade terminal inicia-se o transporte pneumático (por um gás) ou hidráulico (por um líquido) dos sólidos.

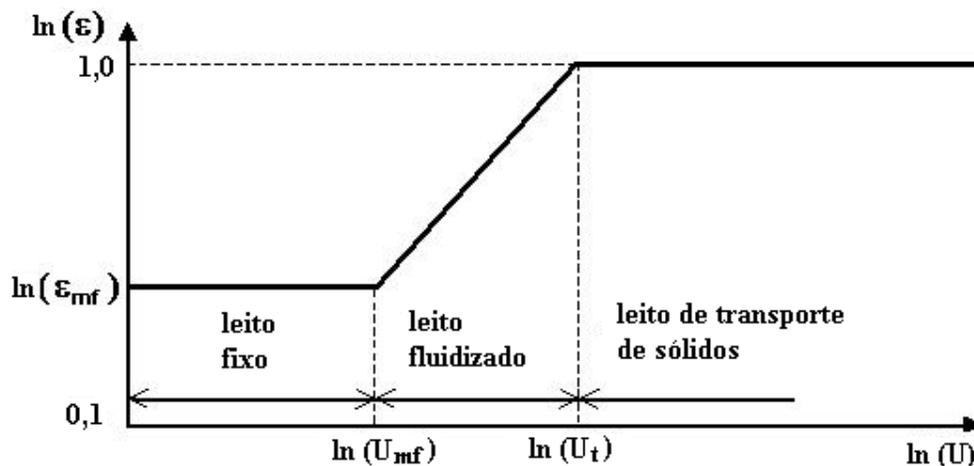


Figura 2 – Fração volumétrica em função da velocidade do fluido num escoamento bicomponente (STRUMILLO e KUDRA, 1986)

As determinações das velocidades dos sólidos e gás na direção axial do *riser* podem ser feitas através da equação da continuidade para o sólido e para o gás, respectivamente:

$$U_s = \frac{Q_s}{A\rho_{sr}\epsilon_s} = \frac{U_{s0}}{\epsilon_s} \quad (20)$$

$$U_g = \frac{Q_g}{A\epsilon_g} = \frac{U_{g0}}{\epsilon_g} \quad (21)$$

A Figura 3 mostra a representação de um conduto cilíndrico e vertical (*riser*) de comprimento L contendo uma mistura bicomponente de gás e sólido que formam na direção axial um escoamento vertical e ascendente, em regime de transporte diluído, no qual o gás entra em contato inicial com o sólido na base do *riser* e segundo (FAKEEHA, SOLIMAN e IBRAHIM, 2000) formando duas regiões na direção axial. Uma região de aceleração na base, até onde a suspensão adquire uma velocidade constante, e uma região de escoamento completamente desenvolvido na parte acima da região de aceleração. Segundo os referidos autores, existem também duas regiões na direção radial. Um núcleo com gás e sólido fluindo para cima e uma região de forma anular na qual os sólidos possuem movimento descendente. Na região de escoamento completamente desenvolvida a velocidade dos sólidos é constante e estimada por:

$$U_s = \frac{W}{\rho_{lc}(1 - \epsilon_{gcd})} \quad (22)$$

onde,

$$\epsilon_{gcd} = \frac{U_{g0}\rho_{lc}}{2W + U_{g0}\rho_{lc}} \quad (23)$$

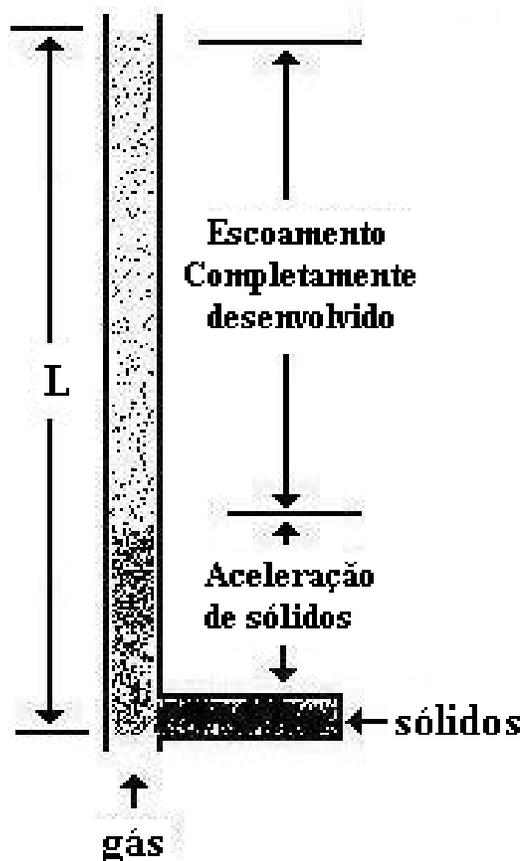


Figura 3 – Esquema ilustrando distribuições de gás e sólidos em um *riser*

A Figura 4 mostra o comportamento dos parâmetros relevantes como as velocidades, a razão de escorregamento e as frações volumétricas dos componentes em escoamento num *riser* do tipo gás-sólido (STERMEDING, 1962). Nela observa-se que a velocidade do gás vai diminuindo na região de aceleração de sólidos até ficar praticamente constante na região completamente desenvolvida, já a velocidade do sólido é o oposto da velocidade do gás, a mesma começa pequena e vai aumentando até ficar praticamente constante. Observa-se também que as frações volumétricas dos componentes têm comportamentos opostos; enquanto a fração volumétrica do sólido diminui a do gás aumenta e ambas também ficam praticamente constante na região completamente desenvolvida. Por ultimo, vê-se a razão de escorregamento ficar praticamente constante na região de escoamento completamente desenvolvido.

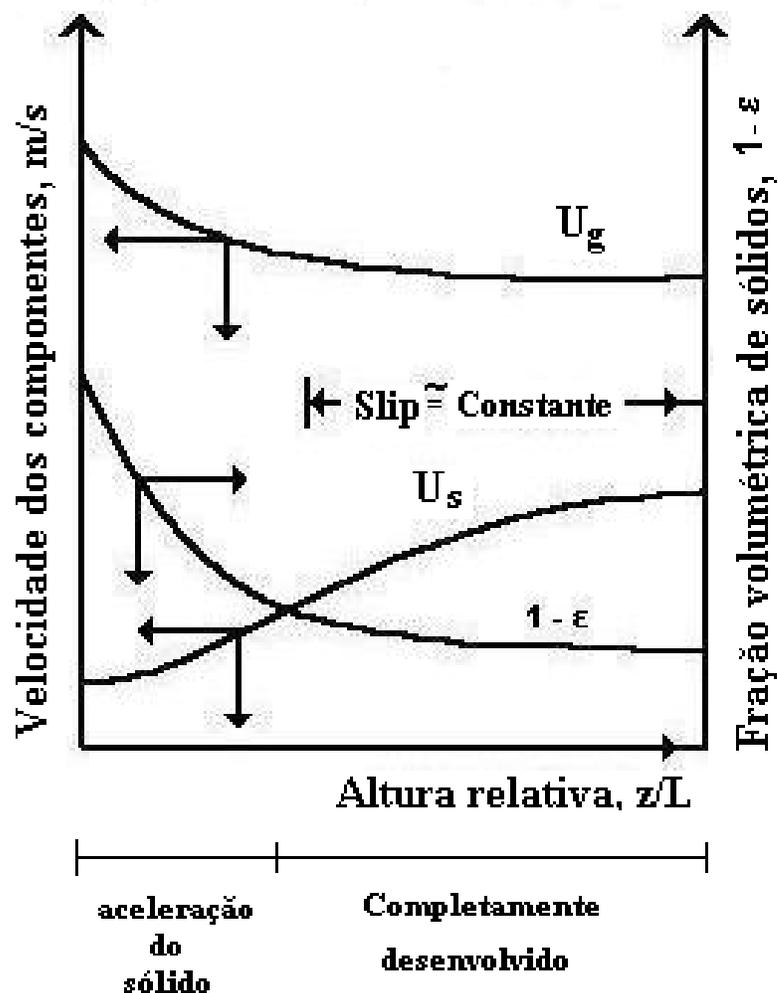


Figura 4 – Comportamento dos parâmetros fluidodinâmicos relevantes

O maior valor do *slip* significa que a velocidade do gás é muito maior que a do sólido, isso pode ocorrer por várias razões, entre as quais quando o gás possui caminhos preferenciais como, por exemplo, uma região centro-anular, sendo a concentração de sólidos baixa no centro do reator e alta próximo as paredes. Com isso ocorre uma má distribuição do sólido e o contato gás sólido é pouco eficiente e ocorre um problema de retromistura no qual os produtos se misturam com reagentes, diminuindo assim a conversão (FAKEEHA, SOLIMAN e IBRAHIM, 2000). A razão de escorregamento determina o tipo de configuração do escoamento, o qual influencia significativamente os parâmetros do projeto, tais como a perda de pressão e as transferências de calor e massa.

A queda de pressão aumenta simultânea e proporcionalmente ao aumento da velocidade superficial do fluido em um leito fixo. A Figura 5 ilustra como esse parâmetro varia nas condições de leitos fixo e fluidizado. No ponto onde a velocidade do fluido alcança a condição de mínima fluidização, a resistência dos sólidos à passagem do fluido é máxima. Estabelecido o regime de leito fluidizado, a queda de pressão reduz-se com o afastamento das partículas e volta a crescer com menor intensidade com o aumento da velocidade do fluido, devido principalmente aos atritos do fluido e do sólido com as paredes do *riser*.

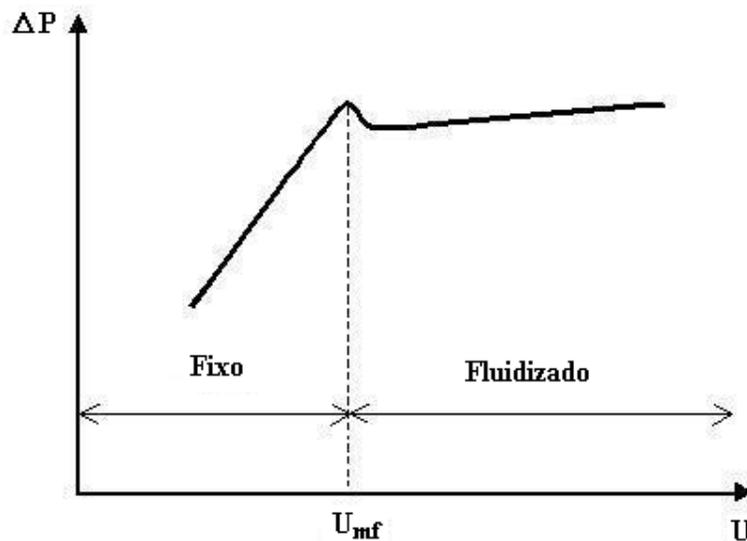


Figura 5 – Variação da queda de pressão com a velocidade do fluido em um *riser* gás-sólido

A estimativa da queda de pressão em um conduto vertical por onde circula uma suspensão fluido-sólido, semelhante a um *riser* de FCC, é utilizada a equação de Leung e Wiles (1976), a qual é composta de quatro contribuições de diferentes efeitos:

$$\Delta P_{\text{riser}} = \Delta P_{\text{fg}} + \Delta P_{\text{fs}} + \Delta P_{\text{Es}} + \Delta P_{\text{Ac}} \quad (24)$$

A queda de pressão devido ao atrito do fluido sobre as paredes do conduto,  $\Delta P_{\text{fg}}$ , é:

$$\Delta P_{\text{fg}} = f_g \frac{L}{D} \rho_g \frac{U_{g0}^2}{2} \quad (25)$$

Onde o valor de  $f_g$  é estimado a partir de:

$$f_g = \frac{64}{Re_g} \quad \text{para } Re_g < 2000 \quad (26)$$

e

$$f_g = \left[ 2 \ln \left( 0,27 \frac{\epsilon_g}{D} + \left( \frac{7}{Re_g} \right)^{0,9} \right) \right]^{-2} \quad \text{para } Re_g \geq 2000 \quad (27)$$

A queda de pressão devido ao atrito dos sólidos com as paredes é estimada de:

$$\Delta p_{fs} = f_s \frac{L}{D} \rho_{sr} \frac{U_{s0}^2}{2} \quad (28)$$

Onde o valor de  $f_s$  é estimado com auxílio da correlação proposta por Hariu e Mostad (1949) para escoamento em regime de transporte pneumático de sólidos.

$$f_s = \frac{0,0206 (1 - \epsilon_g) \left[ \left( 1 - \frac{U_{s0}}{U_{g0}} \right) \right]^{-0,896}}{\left( \frac{\epsilon_g^3}{1 - \epsilon_g} \right)} \quad (29)$$

A seguir são apresentadas algumas correlações do fator de atrito do sólido com as paredes do conduto encontradas na literatura:

(YANG, 1978)

$$f_s = 0,00315 \frac{1 - \epsilon_g}{\epsilon_g^3} \left[ \frac{(1 - \epsilon_g) U_{s\infty}}{U_g - U_s} \right]^{-0,979} \quad (30)$$

Onde  $U_{s\infty}$  é a velocidade do sólido na região completamente desenvolvida.

(MARCUS et al, 1990)

$$f_s = 0,52 \left( \frac{W_s}{W_f} \right)^{-0,3} Fr^{-1} Fr_s^{0,25} \left( \frac{d_p}{D} \right) \quad (31)$$

Para um leito de sólidos expandir-se para cima a velocidade superficial do fluido deve superar a de mínima fluidização. A queda de pressão em um leito de área A e altura L, devido a força total para baixo, produzida por efeito da gravidade sobre a coluna de sólidos,  $\Delta P_{Es}$ , é:

$$\Delta P_{Es} = gL \cdot \rho_{sr} \quad (32)$$

A estimativa de  $\Delta P_{Ac}$ , a queda de pressão devido a aceleração dos sólidos ao longo do conduto:

$$\Delta P_{Ac} = \frac{\rho_{sr} (U_{out}^2 - U_{in}^2)}{2} \quad (33)$$

onde

$$U_{out}^2 = \frac{W}{\rho_{lc} (1 - \bar{\epsilon}_{gcd})} \quad (34)$$

e

$$U_{in}^2 = \frac{W}{\rho_{lc} (1 - \bar{\epsilon}_{gac})} \quad (35)$$

## 2.3 Modelos Experimentais a Frio

### 2.3.1 Fundamentos

Sabe-se que plantas que envolvem a presença de sólidos particulados, como numa FCC, operam em torno de 64% de sua capacidade no primeiro ano de operação, enquanto as plantas que não envolvem a presença de sólidos operam com 90 a 95% de sua capacidade (KNOWNTON, 2000).

Modelos experimentais a frio são geralmente utilizados para estudos preliminares em processos envolvendo manuseio de sólidos. São modelos físicos utilizados para reproduzirem a operação de equipamentos de processo à temperatura ambiente. A elaboração de métodos de medidas de parâmetros fluidodinâmicos em escoamento multicomponente é um exemplo de aplicação para modelos a frio. Outro aspecto importante do modelo a frio é que ele pode ser construído de materiais transparentes permitindo a observação visual do movimento dos sólidos, ou pontos de estagnação dos mesmos, auxiliando no entendimento dos problemas apresentados. Além disso, os modelos a frio são relativamente baratos e podem ser construídos utilizando técnicas relativamente simples.

O processo de FCC tem uma operação cíclica, onde as partículas do catalisador (tamanho médio em torno de  $70 \mu\text{m}$ ) circulam entre um reator cilíndrico de leito fluidizado de transporte ascendente em fase diluída, denominado de *riser*, e um reator de leito fluidizado de transporte descendente em fase densa, denominado de regenerador. No *riser* o catalisador sofre desativação parcial por deposição de resíduos de carbono (coque), devido ao contato com hidrocarbonetos reativos enquanto que no regenerador este coque é queimado. O calor gerado, na combustão do coque é utilizado para manter as reações de craqueamento, as quais são endotérmicas. O inventário de catalisador varia com a capacidade da unidade. O catalisador regressa regenerado ao reator para entrar em contato com nova carga e assim, reiniciar o ciclo, como mostra a Figura 6.

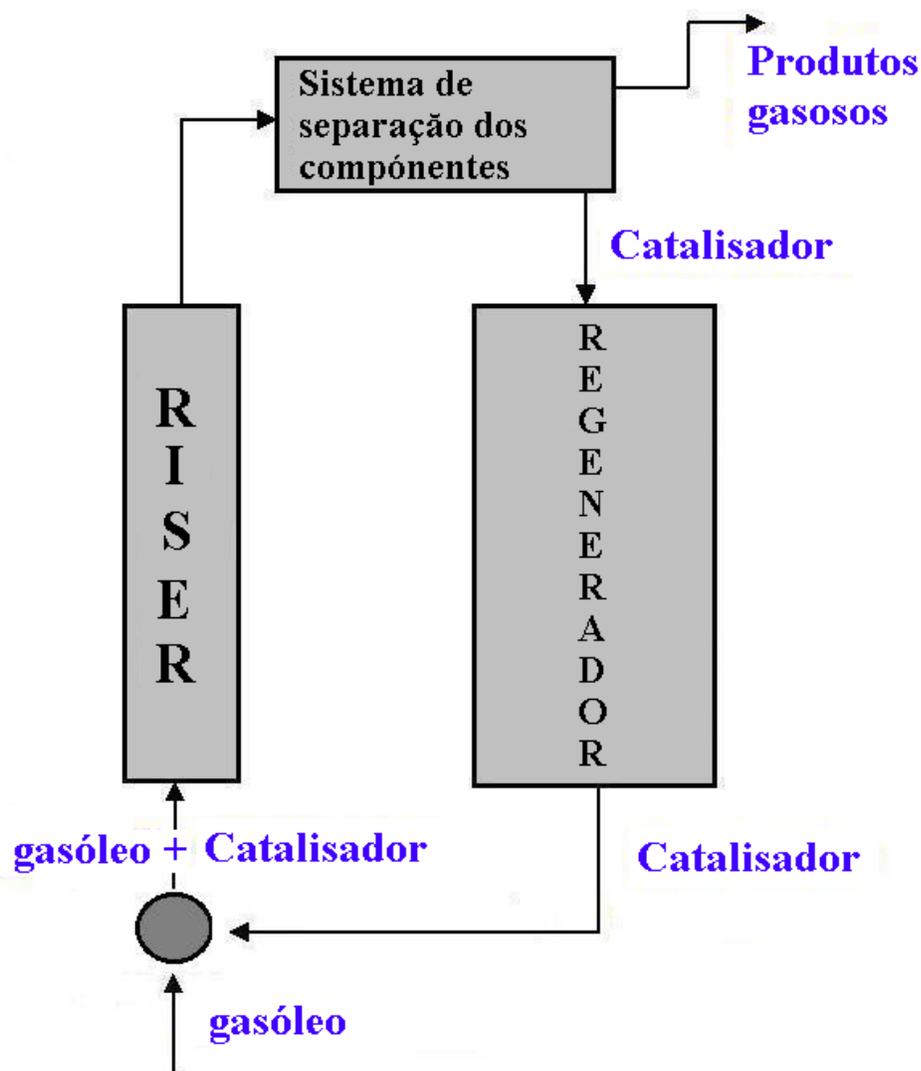


Figura 6 – Esquema simplificado de uma unidade de FCC

Um modelo experimental a frio, no caso particular de uma FCC, possui basicamente os seguintes componentes:

- ✓ *riser* – Tubo cilíndrico vertical, de reduzido diâmetro em relação ao seu comprimento, onde são feitas todas as observações experimentais necessárias;
- ✓ ciclone – Utilizado para efetuar a separação das fases que saem pelo topo do *riser*;
- ✓ coluna de retorno – Uma tubulação cilíndrica vertical, cuja função é permitir a circulação das partículas sólidas de catalisador para a base do *riser*;

- ✓ compressor – Usado para a produção de ar que circula no sistema;
- ✓ injetor de sólidos – São equipamentos utilizados para controlar a vazão de entrada de sólido no *riser*, usualmente as válvulas de bloqueio são empregadas juntamente com as válvulas de controle;
- ✓ Instrumentos auxiliares são:
  - medidores de vazão;
  - medidores de pressão;
  - medidores de umidade.

A Figura 7 mostra um esquema básico de funcionamento de um modelo a frio de uma unidade de FCC. Vê-se que o catalisador através de um injetor de sólidos é introduzido juntamente com o ar na base do *riser* e ambos entram ascendentemente na direção vertical e percorrem todo o *riser*. No topo do *riser* tem-se um ciclone que separa o componente sólido e o gasoso. O gás sai por uma abertura no topo do ciclone, enquanto o sólido cai, devido à gravidade e à força centrípeta gerada pelo ciclone, na coluna de retorno para em seguida através do injetor de sólidos ser introduzido novamente junto com o ar no *riser*.

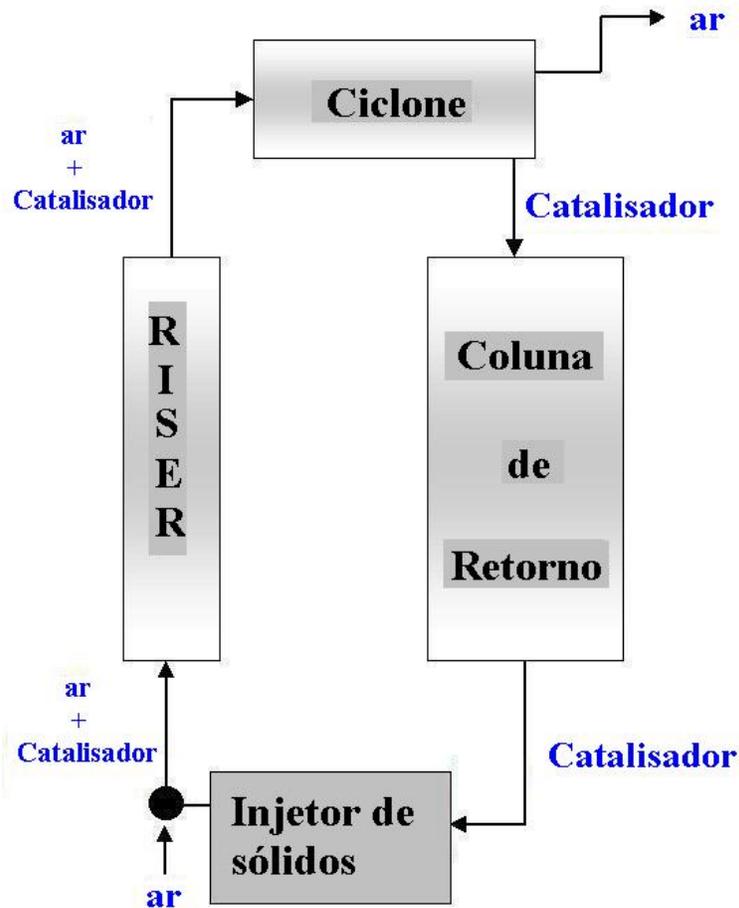


Figura 7 – Esquema básico de funcionamento de um modelo a frio de uma FCC

### 2.3.2 Critérios operacionais e de escala

A simulação das condições de operação de uma unidade de FCC por meio de um modelo a frio leva a uma questão básica, que é a de se obter dados experimentais em condições de extrapolações para escalas maiores. Dessa forma, um modelo a frio deve ser concebido para operar dentro de critérios que permitam a obtenção de semelhança dinâmica com as unidades comerciais. As características mais gerais utilizadas para concepções de modelos a frio, apresentador por Knowlton (2000) e Issangya et al (2000) são mostradas pela Tabela 1.

Tabela 1 – Características físicas e de operação do *riser* de unidades de FCC e dos respectivos modelos a frio

<b>Parâmetro</b>	<b>FCC</b>	<b>Modelo a frio</b>
Diâmetro, D (m)	0,7-1,5	0,02-0,15
Comprimento, L (m)	40-60	2-4
Temperatura , T (°C)	500-550	ambiente
Pressão, P (atm)	3	>1
Velocidade superficial do gás, $U_g^0$ (m/s)	4-20	1-15
Fluxo de circulação de catalisador, W (kg/m <sup>2</sup> . s)	400-1200	0,10 - 7
Tempo de residência médio por passo, $\tau_r$ (s)	2-4	0,3 – 2,5
Concentração aparente de sólidos na região completamente desenvolvida, (%)	3-12	<1

Sabe-se que um dos mais eficientes critérios da validação de modelos fluidodinâmicos é que os dados experimentais obtidos em escala de modelo sejam dinamicamente semelhantes aos valores em escala de protótipo (ZLOKARNIK, 1991). Na Tabela 2 mostra-se a semelhança obtida entre o *riser* no modelo a frio e uma FCC. Utilizando a faixa dos valores físicos e de operação da Tabela 1, além da densidade média do gasóleo dada por Corriou (2002) que é de 8,4 kg/m<sup>3</sup> e a viscosidade dinâmica média dada por Eckert e Drake (1972), cujo valor é de 0,0047 kg/m.s calculamos os números adimensionais da FCC e de um modelo a frio.

Tabela 2 – Valores de números adimensionais em uma FCC e no MEF

<b>Número Adimensional</b>	<b>FCC</b>	<b>Modelo a frio</b>
Número de Reynolds (Re)	5000 - 25000	6000 - 12000
Razão (L/D)	57 - 85	72
Razão de escorregamento (S)	1<S<2	1<S<2

Através do número de Reynolds, que é a razão entre as forças de inércia e viscosa, observa-se que a FCC e no modelo a frio possuem um escoamento turbulento, ou seja, existem flutuações de velocidade, pequenas e de alta frequência, superposta ao movimento principal. O número de Froude pode ser interpretado como a razão entre as forças de inércia e de gravidade, na qual indica que o movimento é supercrítico, rápido ou torrencial, a razão  $(L/D)$  deve ser maior que vinte (PERRY e CHILTON, 1986), logo esta dentro do esperado para uma FCC, pois o tempo de contato do gás com o sólido é suficiente para que ocorra o craqueamento dos reagentes, já a razão de escorregamento se encontra na faixa ideal de operação, pois abaixo de um não há arraste de partículas e acima de dois ocorre uma má distribuição do sólido e como consequência caminhos preferenciais para o sólido, que prejudicam as reações de craqueamento.

### **2.3.3 Modelos a frio da literatura**

Para estudo do comportamento fluidodinâmico da mistura gás-sólido em um modelo experimental a frio, foi utilizado por Rolim (1995) um *riser* de diâmetro 0,016 m e comprimento de 1,12 m, em regime de fase diluída. O referido autor introduziu as partículas sólidas (catalisador de craqueamento) no sistema através de um bocal de alimentação para o interior da coluna de retorno e o controle da entrada do sólido no *riser* foi feito por uma válvula esfera. A separação de sólidos foi feita através de um sistema tipo flash e a medida da pressão foi realizada através de um manômetro de coluna d'água, como mostra a Figura 8. A principal dificuldade encontrada por Rolim foi de ter um controle preciso na alimentação do sólido, e consequentemente obter uma velocidade constante de sólidos.

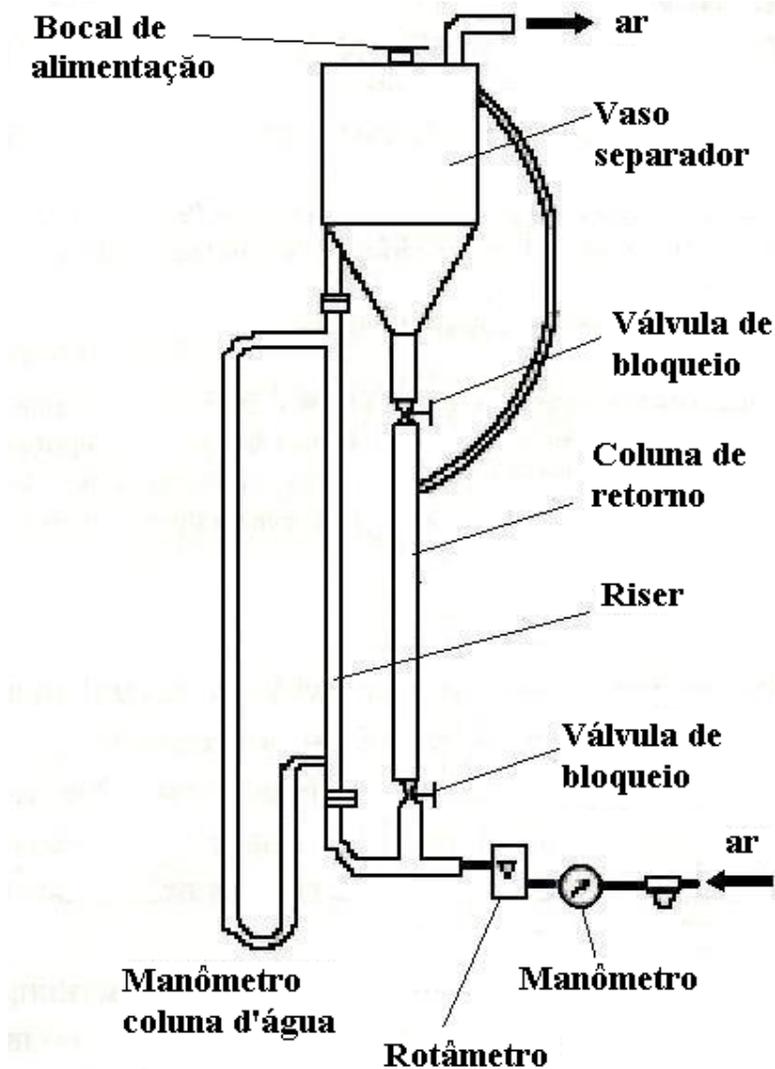


Figura 8 – Arranjo experimental utilizado por Rolim (1995)

Construindo um modelo a frio com um *riser* de 2 m de comprimento e 0,23 m de diâmetro, Moortel et al (1998) utilizou uma bomba de vácuo para induzir a entrada de ar no sistema, a entrada de sólidos foi feita, além da válvula de bloqueio usada anteriormente, ele utilizou um transportador helicoidal para controle de fluxo de sólidos e o sistema de separação dos componentes foi feito através de um ciclone, com mostra a Figura 9. O problema encontrado por ele foi à pulsação na fluidodinâmica do sistema causada pelo transportador helicoidal, que diminuía a precisão das medidas experimentais.

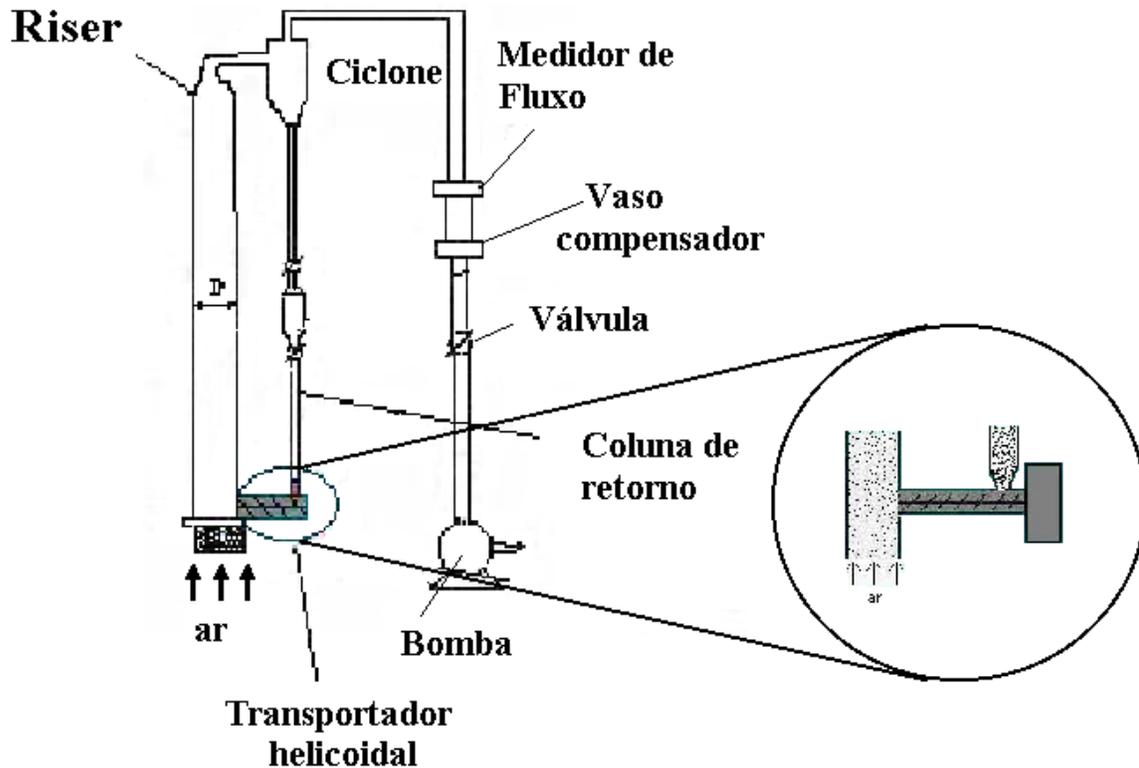


Figura 9 - Arranjo experimental utilizado por Moortel et al (1998)

Um modelo a frio construído por Wozikosky (2002) com o diâmetro do *riser* de 0,070 m, e o controle do fluxo de sólido feito por um ejetor, projetado para funcionar como um Venturi e o sistema de separação das fases com dois ciclones como é mostrado na Figura 10. O principal problema encontrado nesse sistema foi o escorregamento das partículas de catalisador pela parede do *riser* o que provoca um aumento na concentração de catalisador nas regiões próximas as paredes. Isso deve ocorrer devido à queda de pressão causada pelo próprio injetor que para aumentar a velocidade do gás diminui a abertura de saída do mesmo e, conseqüentemente, aumenta a perda de pressão.

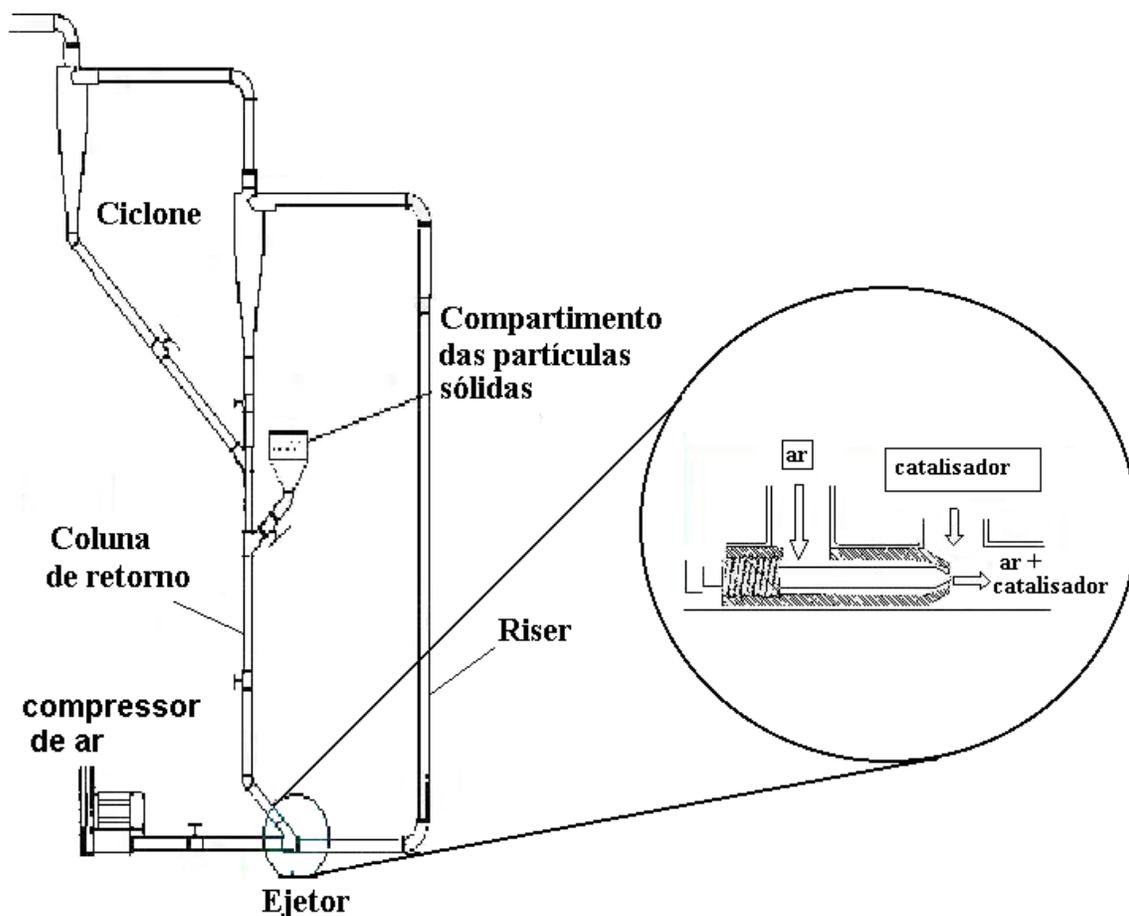


Figura 10 - Arranjo experimental utilizado por WOCZIKOSKY (2002)

Vê-se que os modelos experimentais a frio utilizados para estudar os principais parâmetros fluidodinâmicos de uma FCC têm como uma das principais dificuldades de operação o mecanismo de controle da injeção de sólidos para a base do *riser*.

## 2.4 Técnica de Atenuação Gama

### 2.4.1 Interação da radiação gama com a matéria

Quando o fóton interage com a matéria, sua energia é transferida para esta, onde os três processos fundamentais são (KNOLL, 1988):

#### 1-Efeito Fotoelétrico

2-Efeito Compton

3-Produção de pares

### **Efeito Fotoelétrico**

O raio gama incidente é completamente absorvido e toda sua energia é transferida ao elétron, o qual é emitido de um átomo, com uma energia cinética igual à diferença entre a energia do raio gama incidente e a energia de ligação do elétron.

$$E_e = h\nu - E_L \quad (36)$$

O efeito fotoelétrico é predominante em baixas energias para  $E < 0,260 \text{ MeV}$  e para elementos de elevado número atômico  $Z$ . O efeito fotoelétrico possui a probabilidade proporcional a  $Z^5$ .

### **Efeito Compton**

O fóton incide sobre um elétron livre para o qual transmite parte de sua energia, convertendo-se em outro fóton de menor energia e desviado de sua trajetória inicial por um ângulo  $\theta$ . O efeito Compton é predominante em energias intermediárias de  $0,260 \text{ MeV} < E < 6,9 \text{ MeV}$ . O efeito Compton possui a probabilidade proporcional ao número atômico  $Z$  do material absorvedor.

Energia do fóton espalhado em função do ângulo  $\theta$

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos \theta)} \quad (37)$$

Energia cinética do elétron

$$E = hv \left[ 1 - \frac{1}{1 + \frac{hv}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)} \right] \quad (38)$$

Onde  $\theta$  varia de 0 a  $\pi$  e o  $\cos \theta$  varia entre 0 e 1.

Dois casos extremos podem ser identificados

Caso 1 se  $\theta = 0^\circ$  pela equação (37) temos:

$$hv' = hv$$

$$E_e = 0$$

Caso 2 se  $\theta = 180^\circ$  pelas equações (37) e (38) temos:

$$hv' = \frac{hv}{1 + \frac{2hv}{m_0 c^2}} \quad (39)$$

$$E = hv \left( \frac{\frac{2hv}{m_0 c^2}}{1 + \frac{2hv}{m_0 c^2}} \right) \quad (40)$$

### **Produção de Pares**

A produção de pares ocorre somente quando fótons de energia igual ou superior a 1,02 MeV interagem próximo ao núcleo. Nesse caso, a radiação gama interage com o núcleo e é absorvido dando origem a um par elétron-pósitron ( $2m_e c^2 = 1,02 \text{ MeV}$ ) e a produção cresce com  $Z^2$ .

#### **2.4.2 Coeficiente de atenuação**

O coeficiente de atenuação linear total será a soma dos coeficientes de atenuação dos processos individuais (KNOLL, 1988).

$$\mu = \sigma + \tau + \kappa \quad (41)$$

Onde:

$\mu$  é o coeficiente de atenuação linear total;

$\sigma$  é o coeficiente de atenuação linear Compton total;

$\tau$  é o coeficiente de atenuação linear do efeito fotoelétrico;

$\kappa$  é o coeficiente de atenuação linear da formação de par.

O coeficiente de atenuação mássico é o coeficiente linear dividido pela densidade  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>], ou seja:

$$\alpha = \frac{\mu}{\rho} \quad (42)$$

Este coeficiente de atenuação mássico dado em [m<sup>2</sup>/kg] é importante porque independe do estado físico (EVANS, 1952).

As intensidades do feixe sem e com absorvedor  $I_0$  e  $I$ , respectivamente são dadas por :

$$I = I_0 e^{-\alpha \cdot \rho \cdot x} \quad (43)$$

A Equação de Lambert-Beer, estendida para meios heterogêneos por Bartholomew e Casagrande (1957)

$$\rho_s = \frac{1}{\alpha_s D} \ln \left( \frac{I_0}{I} \right) \quad (44)$$

Para a medida da fração volumétrica do sólido Van, Wirth e Molerus, (1991), utilizou a Equação dada a seguir:

$$(1 - \varepsilon) = \frac{1}{\alpha_s \rho_s D} \ln \left( \frac{I_0}{I} \right) \quad (45)$$

A escolha da fonte de Amerício-241 (0,06 MeV) se deve ao fato dos materiais utilizados em modelos experimentais a frio e suas dimensões permitirem trabalhar nesta energia. Para esta energia o coeficiente de atenuação é bem maior do que para as energias intermediárias do Césio-137 e Cobalto-60, opções apresentadas para investigar o *riser* (AZZI, TURLIER e BERNARD, 1991). Este radioisótopo possibilita uma maior sensibilidade no método de atenuação gama e espectro simples, onde predomina o efeito fotoelétrico (KNOLL, 1988).

### 2.4.3 Sistema de detecção

O NaI(Tl) é o detector mais eficiente utilizado na investigação em todo os tipos de *riser*, segundo revisões bibliográficas (WEIMER, GYURE e CLOUGH, 1985) e (DUDUKOVIC, 2000) .

Utilizando-se um multicanal pode-se identificar todas as interações importantes da radiação com o detector, permitindo uma visualização da qualidade do espectro gama. Este aspecto foi considerado no espectro obtido com um multicanal que pode ser visto no item 3.1.5 do Capítulo 3. Adicionalmente com um programa de aquisição e avaliação de dados (CAMBERRA, GENIE 2000). Coleta-se os resultados das medidas realizadas por meio de funções que podem avaliar todo o espectro ou só o fotopico e o erro associado, os algoritmos mais utilizados são dados pelas Equações 60 e 61 dadas no Capítulo 3.

### 2.4.4 Determinação do coeficiente de atenuação

O coeficiente de atenuação do catalisador de FCC foi determinado por Lourenço, Dantas e Santos (2003). Inicialmente ele realizou experimentos determinando os coeficientes de atenuação de materiais de interesse como chumbo, alumínio e água, para os quais se encontram dados suficientes na literatura. Utilizou um arranjo como aquele descrito no item 3.1.5 e o analisador multicanal associado ao detector. Comparou os valores experimentais com os valores da literatura (GOLDSTEIN e WILKINS, 1954) e com valores obtidos com o programa *xmudat*, que calcula o coeficiente de atenuação com base num banco de dados, para diversos materiais e numa ampla faixa de energia (BOONE e CHAVEZ, 1996) e (HUBBEL e SELTZER, 1995). Observou uma boa concordância na comparação com os valores experimentais e então com base

na metodologia já utilizada, determinou o coeficiente de atenuação para o catalisador cujo valor é igual a  $0,331 \pm 0,006 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Nesta determinação o valor da densidade aparente do catalisador foi de  $0,850 \text{ [g/cm}^3\text{]}$  dado fornecido pelo Centro de Pesquisas da Petrobrás (CENPES).

### 2.4.5 Erros nas medidas

Para uma serie de medidas da intensidade da radiação o valor médio das medidas e o desvio padrão são dados pelas Equações 1 D e 2 D do Apêndice D, respectivamente.

Demonstra-se matematicamente que, para números suficientemente grandes, a distribuição de Poisson pode ser aproximada pela distribuição Normal ou Gauss, fundamental na teoria dos erros. No caso de um multicanal com sistema de aquisição de dados as equações utilizadas se baseiam na distribuição de Poisson estão no item 3.1.5, mostrados no Capítulo 3.

Aplicando a propagação de erros nas medidas da densidade do sólido (HOLMAN, 1994), na Equação 44, observamos que  $\rho_s = f(\alpha_s, x, I_0, I_f)$ , o erro provável para esta função pode ser definido como:

$$\sigma_{\rho_s} = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho_s}{\partial x} \sigma_x\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial \alpha_s} \sigma_{\alpha_s}\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial I_0} \sigma_{I_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial I_f} \sigma_{I_f}\right)^2} \quad (46)$$

Com  $\sigma_x, \sigma_{\alpha_s}, \sigma_{I_0}$  e  $\sigma_{I_f}$ , representando os erros relativos a cada medida. Neles se incluem os erros de truncamento, arredondamento e de escala.

Uma outra forma para a estimativa do erro da Equação (44) é dada por Bartholomew e Casagrande (1957) dado pela Equação (47).

$$\sigma_{\rho_s} = \sqrt{\sigma_{\alpha}^2 + \sigma_x^2 + \frac{\sigma_{I_v}^2 + \sigma_{I_f}^2}{(\ln I_v / I_f)^2}} \quad (47)$$

## 2.5 Modelos Fluidodinâmicos

Para a descrição do comportamento fluidodinâmico em reatores verticais gás-sólido, no estado estacionário, isotérmico e unidimensional, segundo Arastoopour e Gidaspow (1979), os modelos matemáticos deve ser constituídos de equações básicas da conservação de massa do gás, conservação de massa do sólido, conservação de movimento da mistura gás-sólido e uma quarta equação característica que descreve a variação da fração volumétrica ao longo do *riser*, cuja dedução difere de modelo para modelo.

As Hipóteses adotadas na elaboração do modelo fluidodinâmico do *riser* foram as seguintes:

- ✓ escoamento em regime permanente;
- ✓ modelo unidimensional (coordenadas Cartesianas) - a distribuição radial de sólido tem variação desprezível;
- ✓ escoamento incompressível;
- ✓ sem reação química;
- ✓ o catalisador (fase sólida) é descrito como meio contínuo - o sólido entra no *riser* já totalmente fluidizado;
- ✓ o atrito do sólido com as paredes do *riser* é desprezado;
- ✓ que as partículas sólidas assumem ter formato esférico.

### Equações básicas

Conservação da massa do gás:

$$\frac{dU_g}{dz} = -\frac{U_g}{\epsilon_g} \left( \frac{d\epsilon_g}{dz} \right) \quad (48)$$

Conservação da massa do sólido:

$$\frac{dU_s}{dz} = \frac{U_s}{\epsilon_s} \left( \frac{d\epsilon_g}{dz} \right) \quad (49)$$

Conservação da quantidade de movimento da mistura

$$-\frac{dP}{dz} = -\frac{d\epsilon_g}{dz} (\rho_s U_s^2 - \rho_g U_g^2) - f_w - [(\epsilon_s \rho_s + \epsilon_g \rho_g) \cdot g] \quad (50)$$

Onde  $f_w$  é a força de atrito do gás com as paredes do *riser* e é dada pela equação de Fanning:

$$f_w = \frac{0,316 \rho_g U_g^2}{\text{Re}_g^{\frac{1}{4}} 2D} \quad (51)$$

O primeiro modelo matemático é composto das equações básicas (48 a 50) da equação característica que descreve a variação da fração volumétrica ao longo do *riser*, deduzida por Maladi e Otero (1983), que se apresenta levando-se em conta a ação das forças de sustentação e arraste nas partículas, na condição da velocidade do sólido atingir um valor constante ao longo do *riser*.

$$\frac{d\epsilon_g}{dz} = \frac{\epsilon_g \cdot g}{U_s^2} \left( 1 - \frac{\rho_g}{\rho_s} \right) \left[ \left( \frac{1 - \frac{U_s}{U_g}}{1 - S_\infty} \right)^2 - 1 \right] \quad (52)$$

A principal dificuldade no modelo de Maladi e Otero (1983), é a necessidade de determinar experimentalmente a velocidade do sólido na região completamente desenvolvida para ter a razão de escorregamento no equilíbrio.

O segundo modelo matemático proposto por Mendes e Santana (1983) utiliza também as equações básicas (48 a 50), porém a conservação da quantidade de movimento da mistura não possui a contribuição na pressão devido à fricção do gás e a equação que representa a variação da fração volumétrica do sistema, desenvolvida por Li et al, (1981), baseada num modelo de difusão vertical.

$$\frac{d\epsilon_g}{dz} = \frac{(\epsilon^* - \epsilon_g) \cdot (\epsilon_g - \epsilon_a)}{z_0 (\epsilon^* - \epsilon_a)} \quad (53)$$

onde

$$\ln \left( \frac{\epsilon_g - \epsilon_a}{\epsilon^* - \epsilon_g} \right) = - \frac{1}{z_0} (z - z_i) \quad (54)$$

As dificuldades de simulação do modelo de Mendes e Santana (1983) residem na necessidade da determinação experimental da fração volumétrica na região densa e na região diluída, em sistemas com tubo vertical curto, operando com regime de escoamento entre fase densa e diluída. E também na determinação do comprimento característico ( $z_0$ ) que é também experimental e depende da velocidade do gás, fluxo mássico do sólido, diâmetro e densidade da partícula.

O terceiro modelo é o de Santana, Rocha e Kachan (1988), que utiliza as mesmas equações básicas de Maladi e Otero (1983), e descreve o comportamento da fração volumétrica ao longo do *riser* baseado na equação da velocidade relativa proposta por Arastoopour e Gidaspow (1979).

$$\frac{d\epsilon_g}{dz} = \left[ \left( \frac{1}{-\frac{U_g}{\epsilon_g} - \frac{U_s}{\epsilon_s} (U_g - U_s)} \right) \left( g - \frac{F_{arraste}}{\rho_s} \right) \right] \quad (55)$$

Onde a força de arraste exercida pelo fluido nas partículas, por unidade de volume, dada como:

$$F_{\text{arraste}} = 3C_D \rho_g (U_g - U_s)^2 \frac{0,25}{d_p} \frac{1}{\epsilon_g^{2,6}} \quad (56)$$

O coeficiente de arraste,  $C_D$ , foi calculado a partir do número de Reynolds da partícula sólida,  $Re_s$  :

$$C_D = 24(1,0 + 0,15 Re_s^{0,687}) Re_p^{-1} \quad \text{para } Re_s < 1000 \quad (57)$$

Ou

$$C_D = 0,44 \quad \text{para } Re_s > 1000 \quad (58)$$

Onde:

$$Re_s = \epsilon_g \rho_g d_p (U_g - U_s) \mu_g^{-1} \quad (59)$$

O modelo de Santana, Rocha e Kachan (1988), tem a vantagem de não precisar de dados experimentais para simular. A Tabela 3 mostra a faixa de simulação dos modelos matemáticos, nela podemos observar que todos eles foram simulados a temperatura ambiente.

Tabela 3 – Parâmetros físicos e faixa de simulação dos modelos matemáticos

Parâmetro	MODELOS MATEMÁTICOS		
	MALADI (1983)	MENDES (1983)	SANTANA (1988)
Diâmetro, D (m)	0,0445	0,09	0,0525
Comprimento, L (m)	1,24	7,0	4,0
Temperatura, T (°C)	ambiente	ambiente	ambiente
Pressão, P (atm)	2	2	2
Velocidade superficial do gás, $U_g^0$ (m/s)	2-9	2-6	2-16
Fluxo de circulação de catalisador, W (kg/m <sup>2</sup> .s)	0,9375	99,84	0,11-6,68
Densidade do sólido $\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	2176	359	135-400
Diâmetro do sólido $d_p$ (m)	0,000071	0,000081	0,000188 - 0,0004

Observa-se a ausência da descrição relativa dos fundamentos dos modelos na literatura, ou seja, não há um detalhamento de como foram concebidas as equações envolvidas.

## 2.6 Validação de Modelos

### 2.6.1 Verificação e validação

Após passar pelas diversas etapas que compõem a modelagem de um sistema real, chega-se ao produto final - um modelo ou vários modelos. As perguntas que naturalmente surgem, e que precisam ser respondidas são: O modelo obtido serve? Ele é suficientemente bom? Em se tratando de vários modelos, pode-se perguntar: Qual dos modelos é o mais adequado? Tais perguntas nem sempre são fáceis de responder. Na realidade, será difícil obter respostas absolutas para tais questões, sendo que normalmente as respostas terão um caráter relativo, ou seja, o resultado deverá ser interpretado dentro de um determinado contexto (AGUIRRE, 2000).

Uma das tarefas mais árduas em simulação está em determinar se o modelo proposto retrata com fidelidade o sistema em estudo. Para o alcance desta meta são recomendadas as observâncias de dois preceitos básicos, que são: verificação e validação (JAGADA, BOWNE e

JORDAN, 1995). Esses preceitos devem ser observados nas várias fases do desenvolvimento de um modelo.

Verificação trata-se de um conjunto de ações para certificar-se a forma conceitual adotada na formulação do modelo foi transcrita corretamente ao se utilizar às linguagens de programação ou de simulação. Recomenda-se na condução deste procedimento:

- (a) usar duas ou mais pessoas;
- (b) rodar o programa para um conjunto variado de situações procedendo análises dos dados de saída, ou seja, fazendo a análise da sensibilidade do modelo;
- (c) rastrear o programa verificando a execução dos procedimentos;
- (d) comparar os valores gerados aos observados em sistemas reais.

Validação é uma coletânea de ações utilizadas para analisar se um dado modelo representa com fidelidade o sistema em estudo. Podendo este procedimento ser conduzido em conjunto com a verificação, fato que imprimirá maior confiabilidade ao modelo. A validação pode ser categorizada em estatística e subjetiva.

A estatística consiste no emprego de ferramentas como: análise de variância, determinação de intervalo de confiança, testes de hipótese, ajustamento de curvas, análises de regressão e análises de séries temporais. Enquanto a subjetiva é recomendada quando não há possibilidade de proceder incursões exploratórias aprofundadas sobre o sistema em estudo. Para estes casos, pode ser utilizado, por exemplo, o Teste de Turing. Este teste consiste na exposição das informações geradas pelo modelo e às obtidas do sistema real em um mesmo formato. Posteriormente, submetem-se estas a análise de um grupo conhecedor do sistema. Caso haja consenso entre eles, quanto à definição das informações, indica que o modelo está validado, caso contrário o modelo não está validado.

Como se observa em problemas de validação, a questão chave é tentar determinar se um modelo é válido ou não. O único jeito sistemático de verificar isso começa necessariamente pela seguinte pergunta: Qual é o uso pretendido para o modelo? Em outras palavras, é necessário saber como o modelo será utilizado de forma a poder julgar se ele incorpora, ou não, as

características requeridas. Essa necessidade advém do fato de que nenhum modelo, por definição, representará o sistema real em todos os aspectos. Portanto, já que o modelo provavelmente é representativo do sistema em alguns aspectos apenas, ele será considerado válido se incorporar àquelas características do sistema que são fundamentais para aplicação em questão (AGUIRRE, 2000).

Uma maneira para validar o modelo é compará-lo com resultados experimentais e observar todas as fontes de erros envolvidos no processo, assim Grace e Taghipour (2004), listaram uma série de fontes de erros entre as previsões do modelo e os dados experimentais como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 – As fontes de erros e desvios entre os valores preditos pelo modelo e dados experimentais

<b>Tipo de Erro</b>	<b>Exemplo</b>
<b>a) Erros do modelo</b>	
Erros nas hipóteses do modelo	Partículas assumem ser perfeitamente esféricas
Erro no balanço das equações	Forças não consideradas
Valores de entrada	Unidades não consistentes, digitação errada
Codificação	Erro lógico, erro na programação
Erro numérico	Erro na discretização espacial e temporal, convergência insuficiente no procedimento iterativo
<b>b) Erros experimentais</b>	
Erros nas propriedades dos fluidos ou partículas	Erros nas medidas da densidade das partículas ou coeficiente de restituição
Erros aleatórios das medidas	Espalhamento das medidas da queda de pressão, flutuações da fração e velocidade
Erros sistemáticos	Falta de calibração propriamente dita, linearização de respostas não lineares, flutuações da temperatura

A Figura 11 mostra o fluxograma das etapas do processo de validação dado por Grace e Taghipour (2004), onde os autores esquematizaram a validação num ciclo que considera a concepção do modelo matemático, avaliam as equações que descrevem o modelo, as soluções numéricas e o planejamento dos experimentos, convergindo para a comparação entre os

resultados preditos pelo modelo com os experimentais. A estimativa de um desvio aceitável é o critério para concluir ou repetir as etapas do processo de validação, após implementação de algumas modificações no modelo proposto.

Nota-se que diferente da validação, a verificação examina os números com a matemática e com a correção computacional, validam e endereçam as questões substancialmente globais do modelo contra a física real, determinado se, ou não, a fidelidade pode ser estabelecida. Assim, a verificação pode ser realizada fora do comportamento físico do processo. Já a validação precisa das predições do modelo para ser comparada com os dados experimentais. Além disso, quando o modelo foi “validado”, implica que o processo de validação obteve sucesso; que esse modelo foi fundamentado estando de acordo com o que foi proposto para sua aplicação, ou seja, uma ferramenta adequada para previsões da realidade. Note-se que para a verificação não é necessário os pré-requisitos da validação, enquanto que o contrário não é verdadeiro.

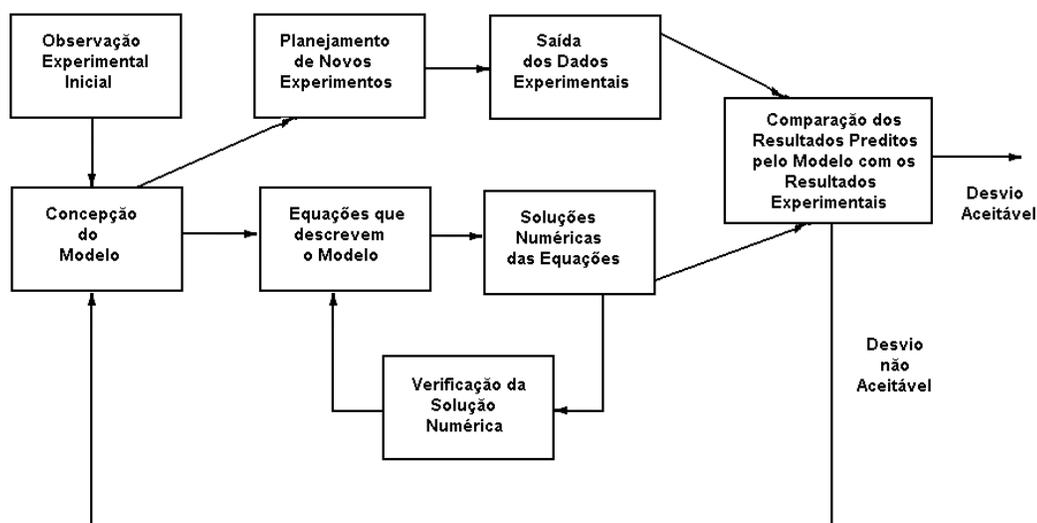


Figura 11 – Esquema do processo de validação com a verificação fazendo parte como um componente (GRACE e TAGHIPOUR, 2004)

Comparar a simulação do modelo obtido com dados medidos é provavelmente a forma mais usual de se validar um modelo. Sem dúvida, esse procedimento é importante e, em muitas aplicações, não é trivial obter um modelo cuja simulação se aproxime das observações. Por ser

relativamente simples tal procedimento é muito comum. Entretanto, há diversos cuidados que precisam ser observados (AGUIRRE, 2000).

Um cuidado básico é não usar os dados obtidos experimentalmente para obter o modelo na validação, pois se deseja saber quão geral é o modelo, em outras palavras, deseja-se saber se o modelo serve para explicar um outro conjunto de dados observados do mesmo sistema (GRACE e TAGHIPOUR, 2004).

### **2.6.2 Metodologia de comparação com dados experimentais**

De acordo com as definições e observações das ambigüidades sobre o que constitui a validação, Grace e Taghipour (2004) propuseram uma série de recomendações para os modeladores que quiserem testar seus modelos com dados experimentais.

#### Guia para modeladores:

Quando possível, trabalhar com um ou mais grupos experimentais independentes que possam colaborar e generalizar os dados experimentais. A colaboração pode envolver um conjunto de planejamentos para se obter o comportamento físico experimental e o programa numérico, observando todas as características incluindo os problemas e fontes de erro facilmente observados na física do processo e do modelo, fazer a previsão das condições iniciais. Deve-se observar o desempenho de ambas as partes numérica e experimental independentemente.

Obter uma ampla faixa de condições de entrada e separar as variáveis para serem comparadas com dados experimentais ou que façam parte do modelo. Que tenha cinco ou mais resultados utilizados válidos.

Quando dados da literatura são usados para as comparações propostas, considerar todas as condições do experimento.

Obter estimativas entre os erros experimentais e numéricos comparando quantitativamente as predições do modelo com os correspondentes dados experimentais.

Reorganizar e admitir o menor erro possível entre os dados experimentais e numéricos e usar as discrepâncias para revisar e utilizar em futuros modelos.

Considerar cuidadosamente todos os fatores que interferem na comparação. Por exemplo, se os primeiros poucos segundos após o início da fluidização do leito foi observado um comportamento e em outro tempo subsequente o comportamento é diferente, assim não comparar resultados de simulação com períodos iniciais de dados experimentais em condições diferentes.

Desprezar as correlações obtidas num ajuste entre o modelo e o processo físico, porém as correlações empíricas ou semi-impíricas podem ser utilizadas, tomando somente as correlações que representam a física do processo.

Estimar erros na modelagem e incertezas. Inclusive os erros devido às hipóteses simplificadoras. Por exemplo, os erros ao considerarmos as partículas esféricas e de mesmo tamanho e as incertezas nos parâmetros de atrito. Os efeitos das incertezas podem ser obtidos pela análise da sensibilidade do modelo.

#### Recomendações para os experimentos

Fornecer dados experimentais para testar as previsões dos modelos é muito importante, mas isso também pode fornecer outros benefícios em termos do conhecimento, ampliando a visão do problema e fornecer novas perspectivas.

O equipamento e as condições do experimento devem procurar representar a física do processo o mais fielmente possível.

Os resultados experimentais podem incluir dados relevantes da física do processo e são de grande interesse na validação dos modelos matemáticos e também suas condições iniciais e condições de contorno que serão usadas nos modelos.

È essencial fornecer vários detalhes de cada aspecto experimental a escala, particularidade do material, condições de operação e instrumentação usada.

Devem ser feitas medidas de um número de diferentes de variáveis e através de uma ampla faixa de condições se possível, incluindo variáveis locais e globais.

Ter valores para as variáveis de entrada, tal como densidade da partícula e velocidade superficial do gás, assim que for necessário os modeladores devem fazer a análise da sensibilidade do modelo.

Seguir cuidadosamente os procedimentos experimentais a fim de se obter dados precisos.

De tudo que foi dito acima, estimar qualitativamente os erros, ambos randômicos e sistemáticos, que se aplicam aos resultados experimentais. Os erros randômicos podem ser estimados fazendo novos testes, preferencialmente em dias diferentes. Os erros sistemáticos ou básicos são mais difíceis de estimar, mas estão sempre presentes para um mesmo grau ou não.

#### Critérios de validação

Os critérios de validação variam de acordo com a aplicação a qual o modelo se propõe, Silva et al (1996) considerou válido o modelo para descrever o comportamento do coeficiente partícula-parede em sistema de transporte pneumático vertical comparando os dados experimentais com os simulados pelo modelo com desvios menores que 20%.

Para validar um modelo para calcular a velocidade mínima do fluido num sistema de transporte pneumático para sistemas bicomponentes (RACZEC e PALICA, 1997) consideraram seu modelo valido quando os valores simulados pelo modelo diferiram em mais ou menos 10% com relação aos valores experimentais.

O modelo desenvolvido por Lech (2001) estudou a vazão mássica do sólido num sistema de transporte vertical de sólidos e seu modelo foi validado devido a uma boa correlação entre os valores medidos e calculados para três tipos diferentes de sólidos, mostrando uma boa faixa de operação para partículas de 80 a 3000  $\mu\text{m}$ .

## 2.7. Síntese da Revisão Bibliográfica

O presente levantamento mostra o funcionamento e a importância econômica de uma unidade de craqueamento catalítico fluido. Mostra também um modelo fluidodinâmico para representar fenômenos físicos que ocorrem no *riser* de uma FCC e a importância dos parâmetros fluidodinâmicos.

A necessidade dos modelos experimental a frio apresenta-se como importantes ferramentas para o estudo de parâmetros fluidodinâmicos relevantes do escoamento multicomponente do *riser* de FCC. Os três modelos experimentais a frio analisados, observou-se que a maior dificuldade encontrada nos mesmos consistia no controle do fluxo de sólidos, servindo de base para a construção de diferentes mecanismos injetores de sólidos na busca de regimes estacionários que possam aproximar, tanto quanto possível, os tipos de escoamentos existentes nos *risers* dos modelos a frio e da unidades industriais/piloto.

Além da determinação experimental dos parâmetros observa-se necessidade da simulação através de um modelo matemático fluidodinâmico para prever o comportamento do *riser*, o qual consta de equações básicas da conservação de massa para o gás, para o sólido e da conservação da quantidade de movimento da mistura, além de uma quarta equação característica de cada modelo fluidodinâmico proposto pela literatura. Esta última equação é responsável pelas informações sobre o perfil axial da fração volumétrica do sólido. Vimos também que as bases dos modelos não são claras tendo-se a necessidade do desenvolvimento de suas equações para uma melhor compreensão de todos os parâmetros envolvidos na fluidodinâmica.

A importância de um modelo de simulação se confirma na etapa de validação do modelo, esta consiste em mostrar a confiabilidade da solução obtida através do modelo na representação do sistema real. A validação do modelo é a confirmação de que ele realmente representa o sistema real. A diferença entre a solução real e a solução proposta pelo modelo depende diretamente da precisão do modelo em descrever o comportamento original do sistema.

Constatou-se que não existe uma metodologia para validar o modelo fluidodinâmico seja ele formulado ou adotado. Daí a importância de uma investigação profunda de como um modelo

fluidodinâmico deve ser validado, quais os procedimentos e as ferramentas estatísticas que devem ser utilizadas e quais os critérios devem ser levados em consideração, sejam eles físicos ou de operação, ou ambos.

E por último vimos à importância da técnica de atenuação gama para a obtenção da fração volumétrica do sólido, por ser não intrusiva e por ser possível sua aplicação tanto em escala de laboratório como industrial.

Em síntese, a busca por uma compreensão e conseqüente domínio sobre os fenômenos fluidodinâmicos existentes no *riser* de uma FCC requer estratégias de apoio ao desenvolvimento de modelos matemáticos mais representativos. Para isto, algumas contribuições importantes ao que existe na literatura podem definir um amplo campo de trabalho. São algumas dessas contribuições:

- Modelos a frio que permitam uma reprodução mais precisa do escoamento em um *riser* de FCC;
- Uso da técnica de atenuação da radiação gama para medidas dos parâmetros fluidodinâmicos no *riser* dos modelos a frio, onde não se pode admitir perturbações sobre o regime de escoamento, em função das reduzidas dimensões do *riser* na maioria dos modelos;
- Detalhamento e compreensão das equações que descrevem o comportamento dos parâmetros fluidodinâmicos para uma melhor avaliar os resultados simulados;
- Aplicação do processo de validação a modelos propostos pela literatura dispensa a elaboração de novos modelos, com base em banco de dados experimentais obtidos com auxílio de modelos a frio construídos dentro de critérios mais rigorosos de semelhança fluidodinâmica e técnicas de medidas desses parâmetros mais adequadas à escala de trabalho.

## CAPÍTULO 3: MATERIAL E MÉTODOS

### 3.1 Arranjo Experimental

#### 3.1.1 Modelo Experimental a Frio (MEF)

Um arranjo experimental contendo um modelo a frio de uma unidade piloto de FCC foi adaptado para obtenção de dados necessários à etapa de validação deste trabalho. O referido arranjo consta basicamente de: 1) um modelo experimental a frio (MEF); 2) um sistema auxiliar de produção e monitoração de ar comprimido; 3) um sistema auxiliar de controle computacional dos parâmetros operacionais e; 4) um sistema de medidas por meio de atenuação gama. Como critérios de projeto para construção do arranjo experimental foram utilizados aqueles apresentados pelo item 2.3.2 do capítulo sobre Revisão Bibliográfica deste trabalho, resumidos pela Tabela 1. A Figura 12 apresenta um esquema elaborado durante a fase de projeto para implantação de modificações do MEF visando sua utilização neste trabalho. O referido esquema ilustra as disposições dos componentes básicos do MEF e alguns componentes associados a alguns dos sistemas auxiliares.

O circuito de circulação do componente sólido (catalisador de craqueamento) compõe-se de um *riser* (3), um ciclone separador (4), uma coluna de retorno (5) e um transportador de sólidos do tipo helicoidal (6). Ar comprimido e catalisador são os componentes da mistura gás-sólido que circula no *riser* do MEF. A referida mistura é produzida na base do *riser* e escoar através de movimento ascendente, de transporte de sólidos em fase diluída, ao longo do *riser*. No topo do *riser* ar e catalisador são separados com auxílio de um equipamento separador do tipo ciclone. O ar sai pelo topo do ciclone, enquanto o catalisador desce para uma região à meia altura da coluna de retorno. O catalisador é então recolhido por uma câmara em forma de tremonha e transportado horizontalmente até a entrada de um conduto em formato curvo para obtenção de um tipo de selo de coluna de sólidos. O referido selo foi intercalado entre o transportador e o *riser* visando a redução considerável das oscilações do fluxo de alimentação de sólidos para o *riser*. As variações de altura de uma coluna de sólidos são bem menos influentes ao fluxo de sólidos através do *riser* que as oscilações características de um transportador do tipo helicoidal.

Para alimentar o *riser* do MEF o ar comprimido é produzido por um compressor instalado em uma cabine isolada, longe de fontes de poluição. O ar comprimido produzido passa por uma garrafa retentora de umidade e por um filtro retentor de sólidos e da umidade residual. A vazão de ar necessária ao tipo de escoamento desejado no *riser* é monitorada por um medidor de condutividade térmica, simultaneamente em série e em paralelo com duas válvulas solenóides (10 e 11) para garantir a liberação do fluxo de ar através do medidor somente em condições adequadas. O ar chega à base do *riser* à temperatura ambiente de cerca de 26 °C e pouco acima da pressão atmosférica. A mistura de ar e catalisador tem seu grau de composição (ou seja, sua diluição) ajustada de acordo com variações impostas à vazão de ar comprimido e à velocidade de rotação do transportador de sólidos, esta última resultante da combinação das rotações de um motor elétrico (8) e de um redutor de velocidade (7). A perda de pressão sofrida pela mistura em escoamento no *riser* é monitorada com auxílio de sensores (2) colocados próximos às extremidades do *riser*.

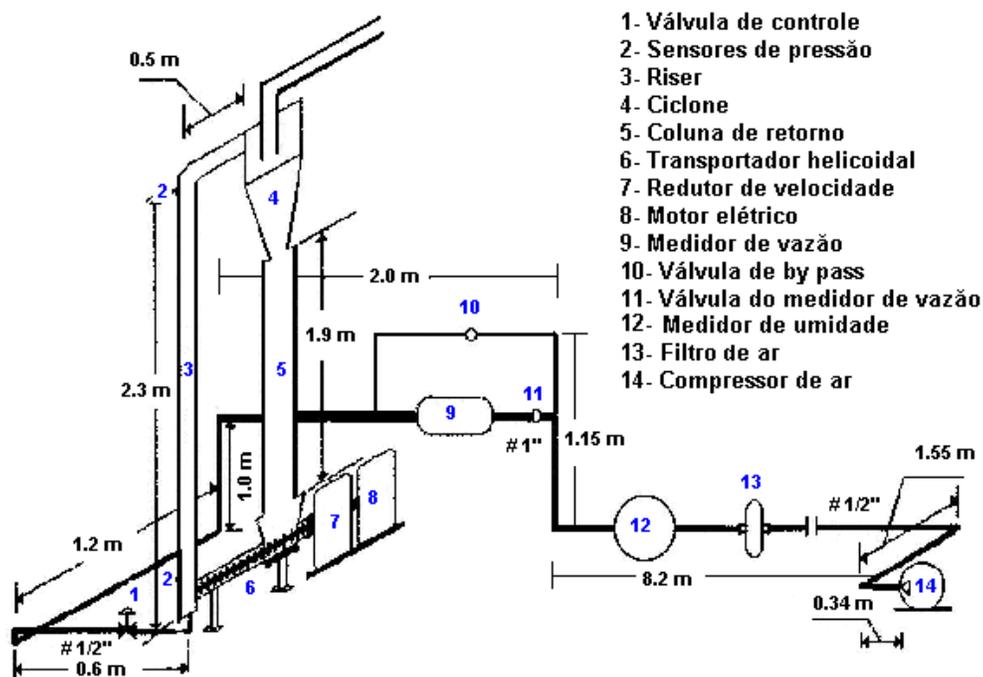


Figura 12 – Esquema do projeto do MEF

Todos os demais componentes do MEF são projetados para atenderem às condições operacionais do *riser*. O *riser* é a seção de testes do modelo a frio. É em função do tipo de

escoamento que se deseja no *riser* que se monitoram e controlam os diferentes parâmetros operacionais de todo o arranjo experimental, tais como, vazão, pressão, temperatura e umidade do ar e fluxo de sólidos.

### 3.1.2 Detalhamento do MEF

O *riser* é uma coluna cilíndrica de 0,032 m de diâmetro interno por 2,3 m de altura total e confeccionado em vidro (Pyrex) para favorecer a observações do escoamento da mistura, como por exemplo, regiões onde a concentração de sólidos é maior. É a seção de testes mais importante do MEF, uma vez que aí são realizadas medidas de pressão e de fração volumétrica do catalisador, esta última com auxílio da técnica nuclear de atenuação da radiação gama. Todos os demais componentes do MEF (Figura 13) foram dimensionados para favorecerem a obtenção de determinadas condições operacionais no *riser*.



Figura 13 – O MEF e seus principais componentes

O catalisador utilizado como componente da mistura em escoamento no *riser* é o mesmo utilizado nas unidades de FCC industrial, à base de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), com diâmetro médio de 72  $\mu\text{m}$  e massa específica esquelética de 2,2 – 2,4  $\text{g}/\text{cm}^3$ . A massa específica da partícula ( $\rho_{\text{lc}}$ ), uma esfera com sua alta porosidade, cerca de 1,2 – 1,4  $\text{g}/\text{cm}^3$ . A massa específica aparente do catalisador ( $\rho_{\text{sr}}$ ), inclui a porosidade interpartícula e é em torno de 0,8 - 0,9  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Sua composição química é dada na Tabela 5.

Tabela 5 – Composição química do catalisador

Análises químicas								
Na	Fe	C	$\text{Re}_2\text{O}_3$	V	Ni	Cu	Sb	$\text{P}_2\text{O}_5$
%p	%p	%p	%p	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
0,35	0,40	0,07	2,47	1998	2784	44	134	10858

A medição da pressão no *riser* do MEF é feita por sensores elétricos de marca SCHRODER BELLOWS; cuja faixa de pressão é de 0,0 – 3,0  $\text{Kgf}/\text{cm}^2$  na temperatura ambiente.

No topo do *riser* encontra-se um ciclone de alta eficiência (REPPENHAGEN, SCHETZSCHEN e WERTHER, 2000). Esse ciclone tem conduto de entrada retangular e foi confeccionado em acrílico, tendo suas dimensões básicas mostradas na Figura 14.

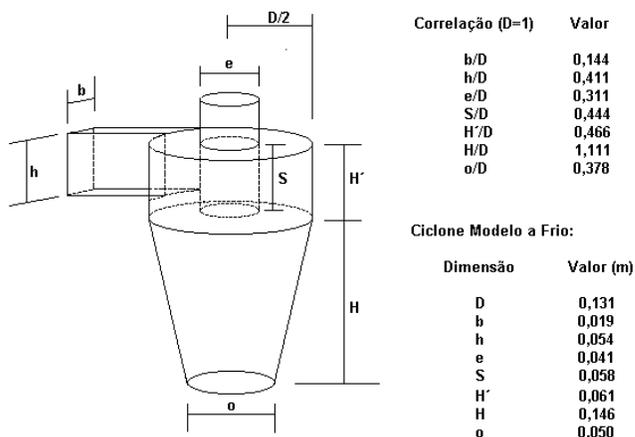


Figura 14 – Esquema com componentes do ciclone separador

A confecção do ciclone em material transparente teve como objetivo a possibilidade de identificação de fenômenos indesejáveis ao processo de separação, tais como a sedimentação de sólidos no duto de entrada, concentração de partículas próximo a pontos de ocorrência de vazamentos etc, como mostra a Figura 15.



Figura 15 – Ciclone separador

A coluna de retorno da mesma forma que o *riser*, é uma tubulação vertical confeccionada em vidro (Pyrex), porém de diâmetro maior e altura menor. Deve ter dimensões suficientes para reter todo o catalisador separado da mistura gás-sólido eflúente do *riser* e que será reintroduzido para recircular por esse mesmo *riser*, com auxílio do transportador helicoidal.

O transportador helicoidal foi confeccionado em aço inoxidável 314. Possui diâmetro externo do helicóide de  $46.10^{-3}$  m, diâmetro interno de  $26.10^{-3}$  m e comprimento de  $248.10^{-2}$  m, com um passe de  $18.10^{-3}$  m. Os componentes de entrada e saída são uma tremonha de  $10.10^{-3}$  m e um conduto cilíndrico de  $35.10^{-3}$  m de diâmetro interno. A relação entre a velocidade de rotação do motor elétrico e a do redutor de velocidade acoplado entre o motor e o helicóide é de 1/64.

Um dos componentes do MEF que mais sofreu modificações, para adaptar-se a condições operacionais adequadas à realização de experimentos que pudessem subsidiar a metodologia de validação dos modelos matemáticos, foi o sistema de injeção de sólidos. A literatura apresenta esse componente como um ponto comum de dificuldade para os diferentes modelos a frio construídos até a presente data. Nas diferentes técnicas de injeção de sólidos utilizadas, existem

dificuldades para manter um fluxo constante de sólidos através do *riser*; o que dificulta a manutenção de condições estacionárias para o escoamento da mistura ascendente gás-sólido. No caso do uso de um transportador helicoidal, na transferência de catalisador da coluna de retorno para o *riser* do MEF, era identificada uma descontinuidade do fluxo de catalisador, cuja intensidade dependia das dimensões do passo do helicóide, das dimensões do duto de saída do catalisador e da velocidade de rotação do transportador. Quanto menor o passo, quanto maior a rotação e o diâmetro do duto de saída, menor as oscilações de fluxo. Entretanto, os ajustes dessas condições de projeto e dimensionamento do transportador, encontram sérias dificuldades para serem implantados devido às próprias condições operacionais e mecânicas dos demais componentes do MEF.

Para sanar problemas com a continuidade de fluxo de catalisador, da coluna de retorno para a base do *riser*, foi intercalado um “selo”, ou coluna de catalisador, entre a saída do transportador helicoidal e a base do *riser* (Figura 16). Dessa forma, a entrada de catalisador no *riser* não fica direta e totalmente dependente do fluxo de sólidos oriundo do transportador. A manutenção de uma coluna de sólidos no selo, permite que a altura do mesmo, ou altura de carga, seja responsável pelo fluxo de sólidos estabelecido. As oscilações provocadas pelo transportador são, agora, amortecidas pela altura do selo, mantendo um fluxo de sólidos em regime estacionário. O conduto que possibilita a formação do selo de catalisador foi confeccionado em mangueira tipo cristal de 0,042 m de diâmetro interno. As condições mecânicas consideradas seguras para os demais componentes do MEF, confeccionados em vidro, foram preservadas.

Seqüências de fotografias com detalhes da passagem do fluxo de catalisador pelo *riser*, durante a operação do MEF e antes e depois das adaptações, são mostradas pelas Figuras 17 e 18, respectivamente. As fotos foram tiradas para as mesmas condições de operacionais do *riser*. Na seqüência de fotos mostrada pela Figura 17, percebe-se uma descontinuidade do fluxo intercalados por intervalos de tempo computados como com intensidade de cerca de 15 segundos. Na seqüência de fotos da Figura 18, após a implantação do selo, observa-se a inexistência de descontinuidades no fluxo de catalisador. Os tempos totais de ambas as seqüências de fotografias, realizadas com o MEF em operação, foram de intensidades iguais.



Figura 16 – Sistema de controle e alimentação do fluxo de sólidos para o *riser* do MEF.

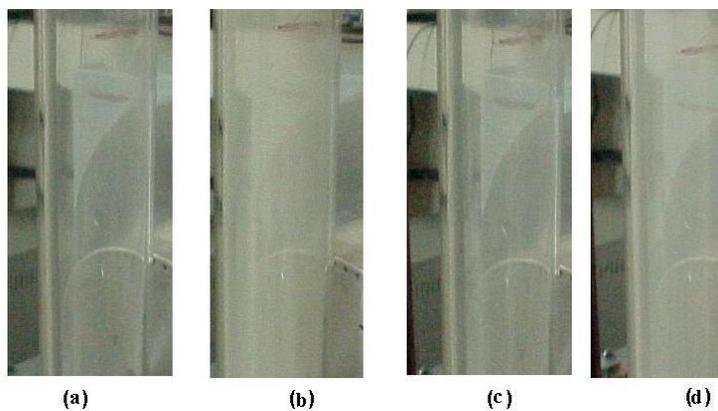


Figura 17 – *Riser* com pulsação do fluxo de catalisador

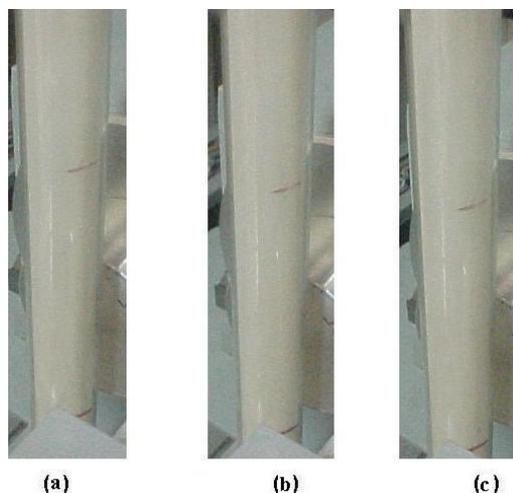


Figura 18 – *Riser* com redução da pulsação do fluxo de catalisador

### 3.1.3 Sistema de produção e monitoração do ar comprimido

O sistema de alimentação de ar comprimido para o *riser* inicia-se no compressor do tipo Super pressure - PSV 40/3503 P. O ar é liberado pelo compressor a uma pressão de  $2,94 \cdot 10^5$  N/m<sup>2</sup>. Para evitar oscilações do fluxo de ar a válvula do purgador do tanque de armazenamento de ar é mantida aberta o suficiente para que o compressor trabalhe continuamente, evitando paradas resultantes por excesso de ar armazenado e, conseqüentemente, oscilações de pressão na geração do ar comprimido utilizado.

O aquecimento do ar durante a compressão e seu acondicionamento em reservatório dá origem ao arraste de grande quantidade de vapor d' água que pode condensar quando a tubulação de ar comprimido encontra-se na temperatura do laboratório onde foi instalado o MEF. Dessa forma, cuidados com o controle da umidade trazida pelo ar para o interior do MEF é uma tarefa importante do arranjo experimental construído.

A qualidade do ar comprimido utilizado pelo MEF é garantida com auxílio de um filtro de sólidos e de dois desumidificadores – uma coluna de sílica gel e um purgador do tipo gás-líquido, acoplado ao filtro como mostra a Figura 19. A coluna de sílica gel tem dimensões de  $39 \cdot 10^{-3}$  m de comprimento e  $79 \cdot 10^{-3}$  m de diâmetro externo.

Toda a tubulação de ar é confeccionada em aço inox.



Figura 19 – Sistema de monitoração e controle da alimentação do ar

Para a medição da vazão volumétrica do ar no MEF é utilizado o medidor de condutividade térmica (marca: Smart mass flow, modelo: 5853S/BH2FA3FC3FA1B1, Fabricante: Brooks instruments B. V.) mostrado na Figura 20.

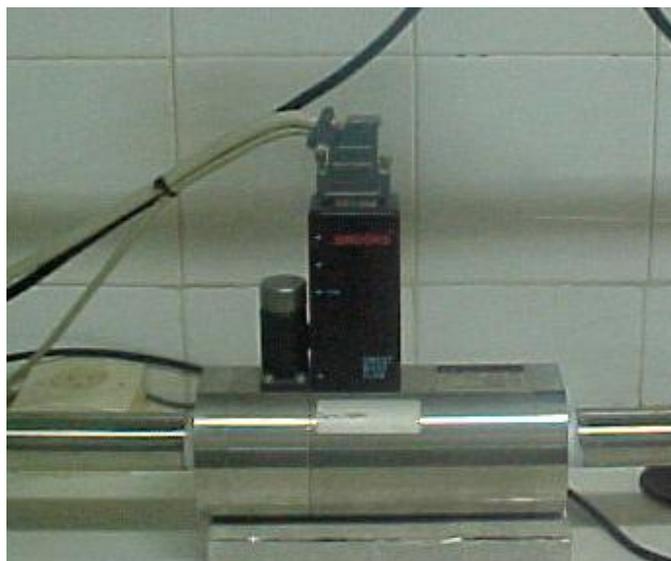


Figura 20 – Medidor de vazão de condutividade térmica

### 3.1.4 Sistema de controle computacional dos parâmetros operacionais

O objetivo do controle automático é fornecer todas as informações necessárias para operar o processo.

#### Descrição do sistema

Na tela de controle, quando o sistema está estabilizado em estado estacionário, dispõe-se através do botão controle de escoamento de uma tela com as seguintes opções:

- 1) Controle da velocidade do motor do parafuso helicoidal e conseqüentemente da vazão mássica de circulação dos sólidos;
- 2) Controle da vazão de ar através da abertura da válvula de controle;
- 3) Visualização das medidas de vazão;
- 4) Visualização das medidas de pressão na entrada e saída do *riser*;
- 5) Visualização das medidas de umidade relativa.

#### Aquisição de dados

Esta parte é composta por sensores indutivos, transdutor de pressão e tem a como função coletar dados que, são enviados para o CLP (Controlador Lógico Programável).

Os sensores indutivos, no total de dez, estão distribuídos ao longo da trajetória para informar os pontos que serão analisados na direção axial do *riser*.

O transdutor de pressão informará através de sinais elétricos da pressão em dois pontos do sistema.

#### Processamento de dados

O processamento de dados é composto por um sistema supervisor, que por sua vez será dividido em três partes:

- Programação
- Controle
- Administração de dados

O controle do sistema é feito através de um CLP, que por sua vez é composto por: CPU, placas de entradas analógicas com canais para captação dos sinais dos medidores de vazão volumétrica do ar e de pressão, placa de entrada de frequência que irão determinar a velocidade de rotação no transportador helicoidal e placa de entradas rápidas digitais que irão detectar os pontos ao longo da trajetória, e placa com saídas à relé que irão ligar os objetos de controle do sistema. A tela do sistema de controle computacional é mostrada na Figura 21.

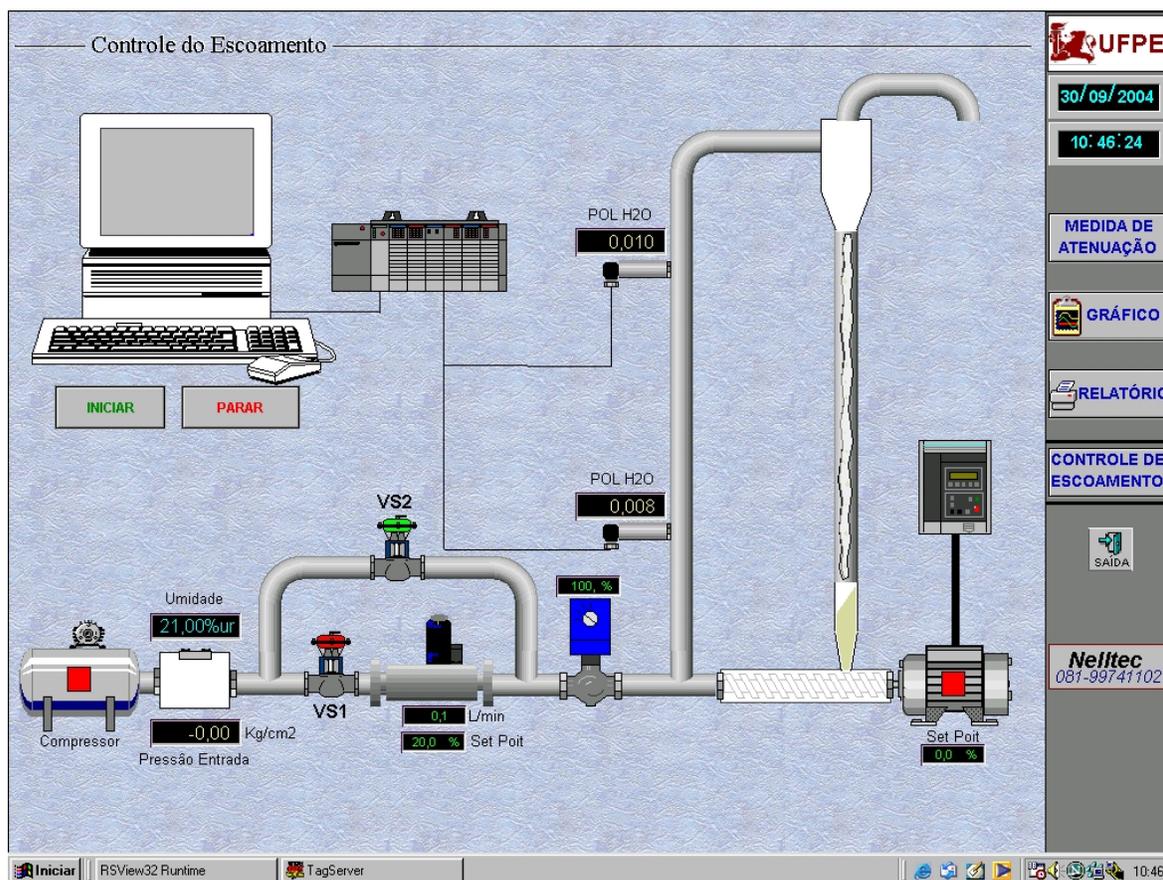


Figura 21 - Tela do sistema de controle computacional

### Painel de controle do escoamento

- Seqüência de funcionamento do sistema

O sistema está programado para o acionamento dos equipamentos em série e em intervalos de 20 segundos.

- 1) Primeiro é acionado o compressor. A válvula do By Pass (VS2) se encontra aberta e a válvula do medidor de vazão (VS1) fechada.
- 2) É aberta a válvula do medidor de vazão (VS1) e em seguida fechada à válvula do By Pass (VS2).
- 3) O motor do parafuso helicoidal é acionado por um inversor de frequência que permite o acionamento a velocidade variável do motor.

- Desligamento do sistema

Para desligar o sistema apertar o botão Parar na tela de controle. A seqüência de parada é inversa a de funcionamento.

- 1) O motor do parafuso helicoidal é desligado.
- 2) É aberta a válvula do By Pass (VS2) e em seguida fechada à válvula do medidor de vazão (VS1).
- 3) O compressor é desligado.

Pode-se acompanhar a seqüência em que os equipamentos entram em funcionamento através da cor que assume o equipamento na tela: verde quando o equipamento estiver funcionando e vermelho quando estiver parado.

### Painel do controle de deslocamento fonte-detector na direção vertical

A Figura 22 mostra o sistema de controle do elevador para o deslocamento do sistema fonte-detector, na direção vertical do riser, nela temos posições específicas que são monitoradas por sensores, pois quando sistema passa por elas acende uma luz vermelha no sistema físico e a

marcação de um x nas alturas predeterminadas. O sistema também possui velocidades diferentes para o deslocamento

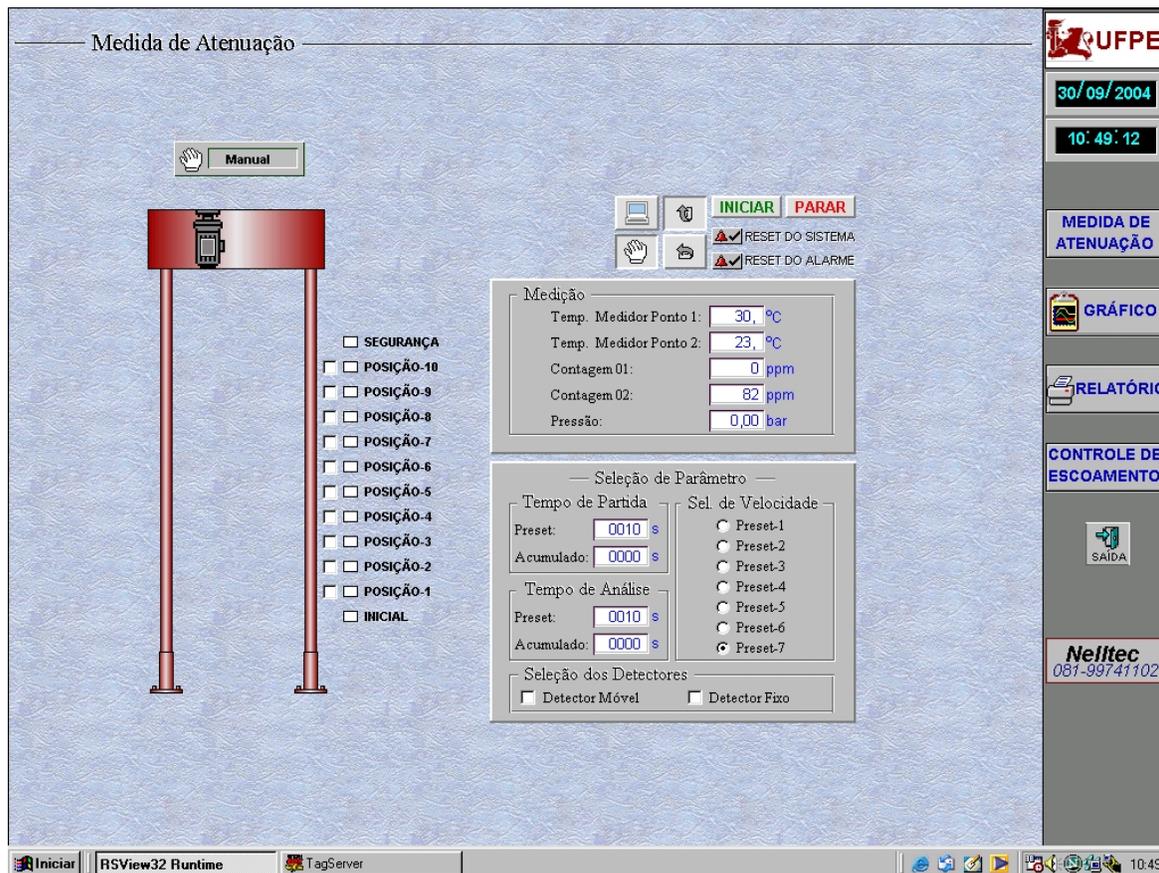


Figura 22 - Tela de controle do elevador

### Painel do histórico de operação

Podemos fazer análise das variáveis que são lidas pelos medidores e entram no sistema de controle através da interpretação de gráficos que é fornecido pelo controle de histórico do sistema. Estas variáveis são Figura 23:

- Pressão;
- Vazão volumétrica de ar;
- Umidade relativa.

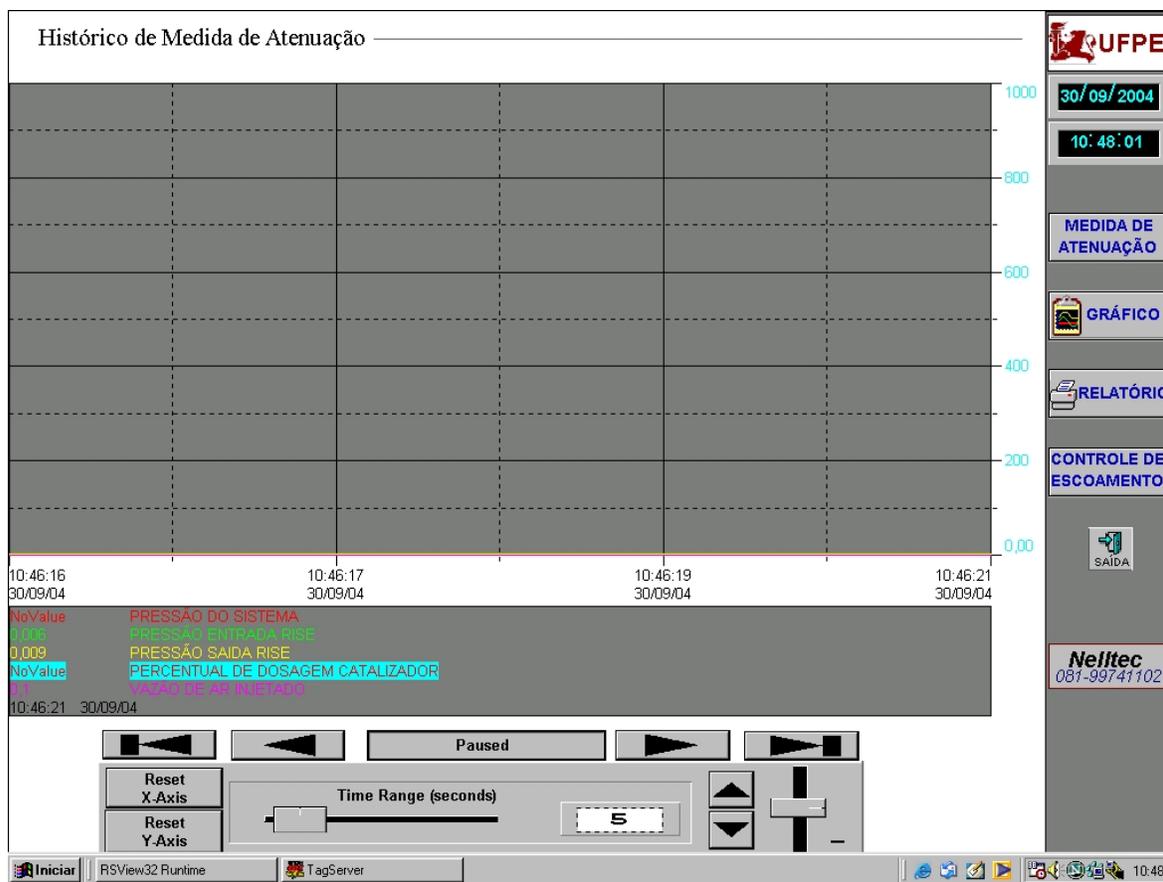


Figura 23 - Tela de resultados das variáveis do processo

Este sistema permite armazenar através de gráficos todo o histórico por data e hora e com o cursor clicando na data e hora pode-se determinar exatamente o valor do parâmetro desejado.

### 3.1.5 Sistema de medidas por meio de atenuação gama

A determinação da fração volumétrica de sólidos em um meio heterogêneo gás-sólido, por meio da absorção de radiação gama, baseia-se na variação da intensidade de radiação gama, ao incidir sobre o meio. Neste caso, uma fonte de radiação gama colocada diametralmente oposta em relação a um detector, em uma seção reta qualquer do *riser*, tem a intensidade do feixe de radiação emergente atenuada por meio das fases presentes. Como se espera que o coeficiente de atenuação do catalisador seja maior que o da fase gasosa, pode-se considerar que a atenuação da

intensidade da radiação gama se deve ao catalisador. Esta condição é considerada na Equação 2.44.

Tanto a fonte como o detector são blindados o primeiro por questão de segurança e o segundo para evitar interferências nas medidas. As blindagens da fonte e detector foram instaladas em suporte de aço que mantém a geometria fonte-*riser*-detector e que permite variar a distância fonte-detector e a posição na direção axial *do riser* conforme pode ser visto na Figura 24.

A blindagem da fonte de radiação gama é feita de chumbo com espessura de 0,05 m, para manter a radiação dentro do nível permissível pelo controle dosimétrico. Seu formato é cúbico com estrutura de aço com comprimento de 0,1 m.

A blindagem do detector é de chumbo com estrutura de aço cujas dimensões são: 0,2 m de altura, 0,2 m de largura e 0,25 m de comprimento.

O feixe gama no arranjo mostrado na Figura 24 é colimado na fonte e no detector. Na fonte possui um orifício rosqueado no qual é fixado o colimador de 0,075 m de diâmetro, 0,035 m de comprimento e abertura de 0,0055 m. No detector o colimador também é fixado com rosca e tem as seguintes dimensões: de 0,10 m de diâmetro, 0,080 m de comprimento e 0,010 m de abertura. Na Figura 24, pode-se observar as blindagens com fonte e detector e os colimadores posicionados para fazer medidas no *riser*.

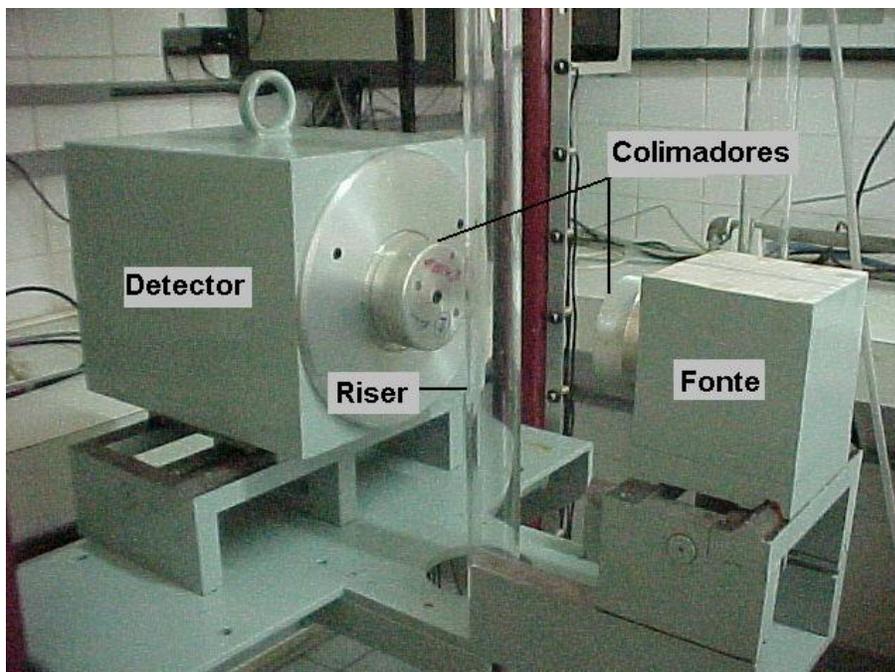


Figura 24 – Sistema de medidas da intensidade da radiação gama

Como fonte de radiação gama foi utilizada uma de Amerício-241 de atividade de  $740.10^7$  Bq, e energia de 0,06 MeV e tempo de meia-vida de 460 anos. O detector escolhido foi NaI porque um só radioisótopo e uma única energia gama é medida, então a opção foi em função da sua alta eficiência. O detector é um (NaI(Tl)) de dimensões 2"x2" acoplado a uma placa multicanal instalada em micro computador com software Genie2000 para aquisição e processamento de dados.

Na Figura 25 além do fotopico de 0,06 MeV com o qual a intensidade gama é avaliada, aparece outro fotopico que corresponde ao gama de 0,026 MeV, também emitido pelo Amerício-241. Neste espectro predomina o efeito fotoelétrico devido à faixa de energia dos gamas ser menor do que 0,26 MeV, conforme a descrição da interação da radiação gama com a matéria no item 2.4.1. No entanto, uma região Compton poderia ser esperada devido ao espalhamento no absorvedor, o *riser*, e a intensidade da fonte ( $740.10^7$  Bq). Esta possibilidade ocorreria na região de 0.011 MeV até 0.049 MeV, pela a estimativa do espalhamento Compton dada pela Equação 37. Na Figura 25 pode ser visto um espectro praticamente livre de qualquer ruído na região do contínuo. Isso se deve, certamente, à relação entre as seções de choques  $\sigma(E)/\mu(E)$ , onde  $\sigma(E)$  é a

seção de choque para o espalhamento Compton e  $\mu(E)$  a seção de choque para soma das interações fotoelétrico e Compton. Para efeito de comparação o valor desta relação é de 0,87 para a radiação gama de energia 0,6 MeV e 0,087 para a radiação gama de 0,1 MeV.

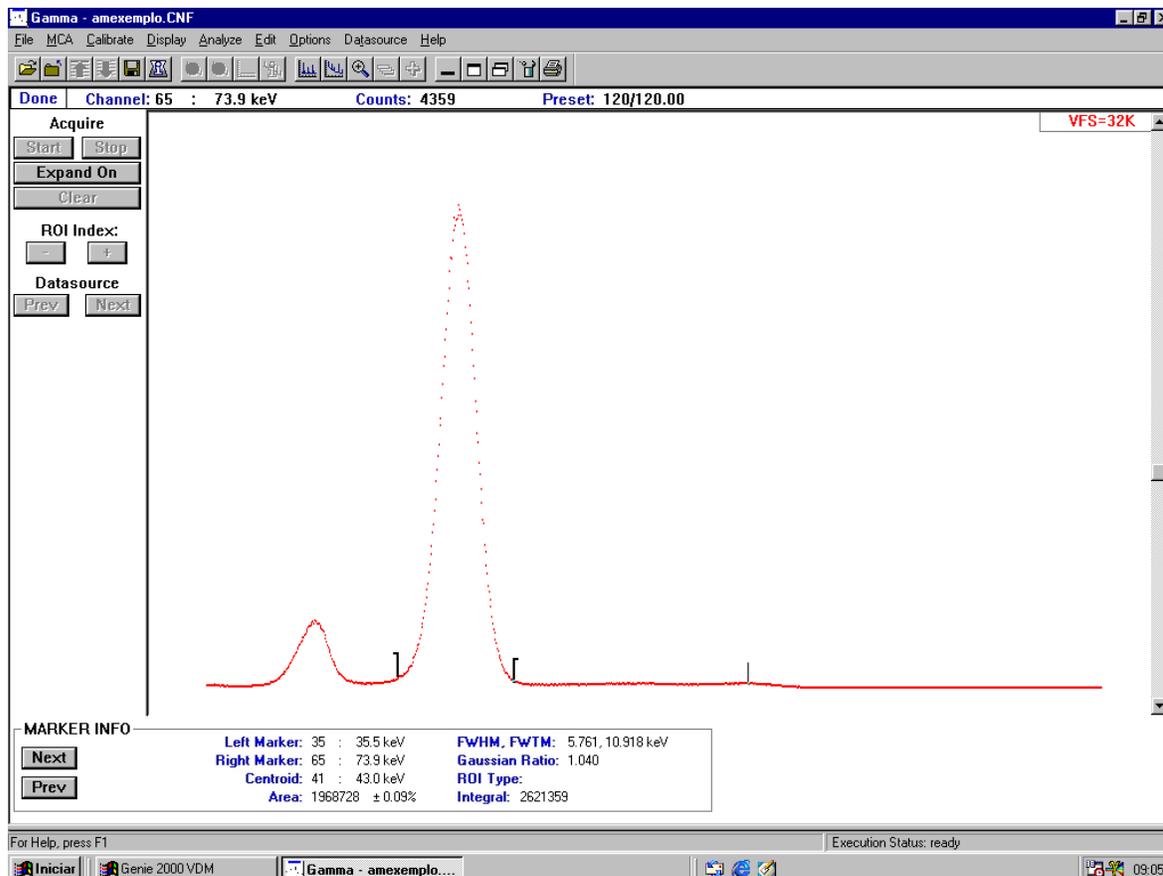


Figura 25 – Espectro do Am 241 obtido com o programa Genie2000

O espectro mostrado na Figura 3.14 foi obtido por um multicanal com o software (Genie 2000) onde o programa analisa o espectro nas seguintes variáveis: contagem total no fotopico (P), contagem liquida no fotopico (A), através das seguintes equações:

$$A = P - \frac{(x_f - x_i)}{2n} (B1 + B2) \quad (60)$$

Onde B1 e B2 são as somas das contagens nos n canais dos lados esquerdo e direito do fopico, respectivamente.

O desvio padrão é baseado na distribuição de Poisson, dado por:

$$\sigma_A = \left( P + \frac{(x_f - x_i)^2}{2n} \right) (B1 + B2)^{1/2} \quad (61)$$

Onde xi e xf correspondem aos pontos inicial e final de integração, respectivamente; n é o número de canais contínuos de cada lado do fopico.

E a resolução do fopico

$$R = \frac{\text{FWHM}}{x_0} \quad (62)$$

FWHM é a largura do pico na metade da altura máxima; e,  $x_0$  é o ponto em que ocorre a altura máxima.

### 3.2 Validação dos Modelos

A etapa de validação , segundo Grace e Taghipour (2004), segue o roteiro previsto pelo fluxograma mostrado na Figura 11 da revisão bibliográfica, onde os autores esquematizam o referido processo que considera as concepções dos modelos experimentais e matemáticos, avalia as equações que descrevem o modelo, as soluções numéricas, o planejamento dos experimentos, convergindo para a comparação entre os resultados preditos pelo modelo com os experimentais. A estimativa de um desvio aceitável é utilizada como critério para concluir ou continuar o processo de reformulação e validação do modelo. Adaptou-se então, o processo de validação esquematizado pelos autores acima citados, aos procedimentos de validação dos modelos fluidodinâmico estudados neste trabalho.

Preliminarmente avalia-se a capacidade do modelo matemático de modelar a fluidodinâmica no *riser* do MEF, a adequação das equações para descrever os fenômenos físicos

envolvidos. Realiza-se a análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo. Em seguida, formula-se um planejamento dos experimentos. Fazer a verificação do método computacional, explicitar a formulação das equações e avaliar as soluções obtidas pelo programa. É proposto um critério de  $\leq 10\%$  de erro relativo ( $E_R$ ), para aceitar ou continuar o processo de validação baseado em ferramentas estatísticas dadas no Apêndice E. A Figura 26 mostra um esquema para o MEF adaptado ao esquema de Grace e Taghipour (2004).

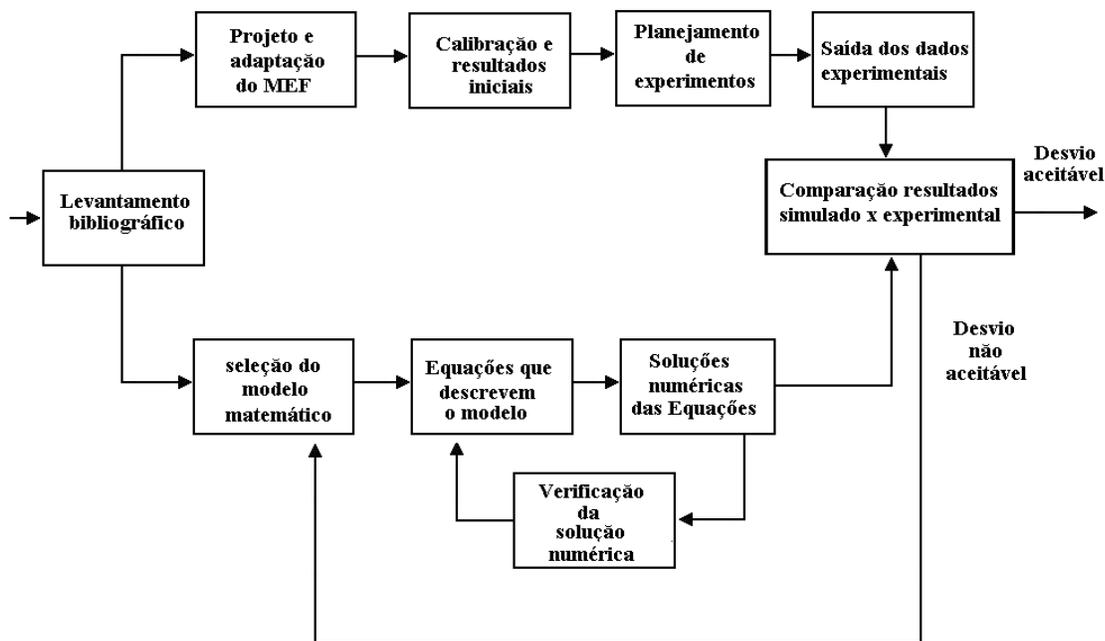


Figura 26 – Esquema da metodologia proposta

A seguir a descrição das etapas de validação baseada no Esquema da Figura 26:

Levantamento bibliográfico – No Capítulo 2 da Revisão Bibliográfica procurou-se determinar o comportamento dos principais parâmetros da fluidodinâmica do *riser* de uma FCC e como representa-los no MEF.

Projeto e adaptação do MEF – No Capítulo 2 vimos o conceito de Modelo Experimental a Frio e alguns exemplos da literatura, com base nestas informações construiu-se o MEF com alguns critérios físicos dados na Tabela 1.

Calibração e resultados iniciais – No item 3.5.1 dado a seguir foi feita a determinação das condições operacionais no MEF. Em seguida fez-se a determinação da fração volumétrica do sólido, determinando a faixa de vazão dos componentes sólido e gasoso e as posições axiais no *riser*.

Planejamento de experimentos – No item 3.3 foi feito um planejamento fatorial variando as vazões dos componentes na qual observou-se a influência das mesmas na obtenção da fração volumétrica do sólido e com esses resultados procurou-se obter as melhores condições experimentais para a obtenção mais precisa da fração volumétrica do sólido.

Saída dos dados experimentais – Para fazer a validação através de uma regressão linear são necessários pelo menos cinco dados experimentais válidos, para isso é necessário observar se os dados experimentais estão correspondendo ao comportamento esperado da fluidodinâmica do *riser*.

Seleção do modelo matemático – No Capítulo 2 analisou-se três modelos fluidodinâmicos, no Apêndice F, é mostrado o desenvolvimento de como obter as equações básicas através do balanço de massa e quantidade de movimento. Em seguida a caracterização dos mesmos no item 3.6.1 dado a seguir.

Equações que descrevem o modelo – No item 2.5 do Capítulo 2 e Apêndice F determinou-se as equações que descrevem os modelos fluidodinâmicos com suas hipóteses simplificadoras.

Soluções numéricas dos dados experimentais – No item 3.6.2 dado a seguir, mostra-se o método de resolução do modelo matemático e o algoritmo utilizado.

Verificação da solução numérica – Através da análise da sensibilidade do modelo fluidodinâmico de Santana, Rocha e Kachan (1988), determina-se através da Tabela 9 dada a seguir, quais os parâmetros que mais influenciam na obtenção da fração volumétrica do sólido nos quais foram: diâmetro do *riser*; comprimento do *riser*; vazão volumétrica do ar, densidade do sólido; viscosidade do ar e diâmetro do sólido. Dentre esses parâmetros o único que pode variar é a vazão volumétrica do ar, por isso a importância da calibração do medidor de vazão do ar. No Apêndice E fez-se uma estimativa das incertezas dos principais parâmetros envolvidos na

determinação da fração volumétrica do sólido. Mostrando que os parâmetros obtidos na literatura e determinados experimentalmente possuem uma boa precisão.

Desvio aceitável – No item 2.6.2 viu-se alguns critérios considerados na validação de modelos matemáticos, baseado nos mesmos, o critério adotado para o nosso modelo é considerar que para desvios menores ou iguais a 10% entre os valores simulados pelo modelo e os valores experimentais obtidos no MEF, pode-se considerar que o modelo é válido para o qual mesmo se propõe.

A qualidade do modelo é definida através dos seguintes questionamentos:

*Acessibilidade* – pode-se fazer o uso seletivo de suas partes para outro propósito, como por exemplo, a construção em outro modelo;

*Precisão* – os cálculos realizados pelo modelo possuem precisão do método na ordem de  $10^{-5}$ , sendo suficiente para satisfazer os objetivos de sua utilização;

*Comunicabilidade* – suas saídas são através de valores e gráficos e fáceis de interpretar dos parâmetros: velocidade do gás, velocidade do sólido, fração volumétrica do gás, fração volumétrica do sólido e pressão total no *riser*;

*Consistência* – o modelo é uniforme quanto à sua notação, terminologia e simbologia, todas as unidades estão no sistema internacional (SI);

*Estruturação* – o modelo possui um padrão definido de organização dos seus diversos módulos e componentes, como mostra o fluxograma do modelo fluidodinâmico dado na Figura 36;

*Robustez* – o modelo não produz saídas razoáveis quando ele é executado com entradas inválidas.

### 3.3 Planejamento Fatorial

As variáveis controladas e medidas no experimento são: pressão de saída do compressor (manômetro), vazão volumétrica do ar (medidor de vazão de condutividade térmica) e vazão mássica do catalisador (rotação do transportador helicoidal), já as variáveis somente medidas no experimento são: pressão total no *riser* (sensores de pressão) e fração volumétrica do sólido através da técnica de atenuação gama. A fração volumétrica do sólido é a principal variável no nosso estudo depende principalmente da vazão volumétrica do ar e vazão mássica do catalisador

Um dos problemas mais comuns que um experimentador pode enfrentar é a determinação da influência de uma ou mais variáveis sobre uma outra variável de interesse. No caso para se determinar a fração volumétrica do sólido é necessário estudar como ela será afetada se variarmos a vazão volumétrica do ar e/ou a vazão mássica do catalisador, ou seja, interessa descobrir como resposta (a fração volumétrica do sólido) na qual dependem desses dois fatores mencionados a vazão volumétrica do ar e a vazão mássica do catalisador.

A primeira coisa a fazer, no planejamento do experimento é determinar quais são os fatores e as respostas de interesse para o sistema que se deseja estudar. A Figura 27 mostra um esquema de um planejamento fatorial  $2^2$ .

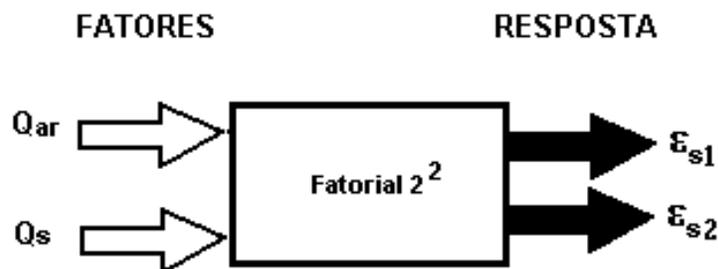


Figura 27 – Esquema do planejamento de experimento  $2^2$

Na Figura 27 mostra o esquema para observar como será afetada a fração volumétrica do sólido ao variarmos a vazão volumétrica do ar e vazão mássica do catalisador.

Para estudar o efeito de qualquer fator sobre a resposta é preciso fazê-lo variar e observar o resultado dessa variação. Um planejamento fatorial em que todas as variáveis são estudadas em apenas dois níveis é, portanto o mais simples de todos eles. No nosso caso temos 2 fatores, isto é, 2 variáveis controladas pelo experimentador.

<b>Fatores</b>	<b>(-)</b>	<b>(+)</b>
1- vazão volumétrica do ar, $Q_{ar} \cdot 10^{-5}$ (m <sup>3</sup> /s)	258 (3 m/s)	459 (5 m/s)
2- vazão mássica do sólido, $Q_s$ (kg/s)	0,0057	0,0076

A execução do planejamento  $2^2$  consiste em realizar ensaios e registrar as respostas observadas (as frações volumétricas dos sólidos) em todas as combinações possíveis dessas combinações desses níveis:  $(258 \cdot 10^{-5}; 0,0057)$ ,  $(258 \cdot 10^{-5}; 0,0076)$ ,  $(459 \cdot 10^{-5}; 0,0057)$  e  $(459 \cdot 10^{-5}; 0,0076)$ . A listagem destas combinações é chamada de matriz de planejamento, é apresentada na Tabela 6, juntamente com as frações volumétricas obtidas nos experimentos.

Tabela 6 – Resultados de um planejamento fatorial  $2^2$  para estudar o efeito da vazão das fases na fração volumétrica do sólido.

<b>Ensaio</b>	<b>Vazão do ar (<math>10^{-5}</math>) (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Vazão do sólido (kg/s)</b>	<b>Fração volumétrica do sólido (<math>10^{-4}</math>)</b>
1	258	0.00057	30
2	459	0.00057	18
3	258	0.00076	40
4	459	0.00076	24

### Efeito principal da velocidade do ar

$$E_{U_{ar}} = (1/2)\{(\bar{\epsilon}_2 - \bar{\epsilon}_1) + (\bar{\epsilon}_4 - \bar{\epsilon}_3)\}$$

$$E_{U_{ar}} = -15 \cdot 10^{-4}$$

Esse valor mostra que a fração volumétrica do sólido diminui em  $15 \cdot 10^{-4}$  em média, quando a velocidade passa do seu nível inferior (3 m/s) para o seu nível superior de (5 m/s).

### Efeito principal da vazão de sólido

$$E_{Q_s} = (1/2)(\bar{\epsilon}_3 + \bar{\epsilon}_4) - (1/2)(\bar{\epsilon}_1 + \bar{\epsilon}_2)$$

$$E_{Q_s} = +80 \cdot 10^{-4}$$

Esse valor mostra que a fração volumétrica do sólido aumenta em  $+80 \cdot 10^{-4}$ . Ao trocar a vazão de sólidos de nível menor (0,0057 kg/s) pela vazão de sólido de nível maior (0,0076 kg/s).

### Efeito da interação entre $E_{U_{ar}}$ e $E_{Q_s}$

$$E_{U_{ar}} \times E_{Q_s} = E_{U_{ar}Q_s} = (1/2)(\bar{\epsilon}_4 - \bar{\epsilon}_3) - (\bar{\epsilon}_2 - \bar{\epsilon}_1)$$

$$E_{U_{ar}Q_s} = -21 \cdot 10^{-5}$$

Esse valor mostra que a fração volumétrica do sólido diminui com o efeito da interação da velocidade do gás e vazão do sólido em  $-21 \cdot 10^{-5}$

A seguir a Figura 28, utilizada para interpretação dos resultados:

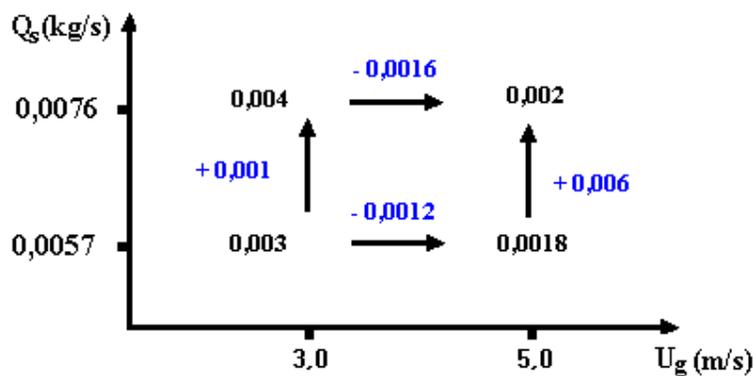


Figura 28 – Diagrama para interpretação dos resultados do planejamento fatorial  $2^2$

Interpretação dos resultados:

- ✓ A elevação da velocidade do ar diminui a fração volumétrica de sólido, mais esse efeito é mais pronunciado com a vazão do sólido maior;
- ✓ A troca da vazão de sólido menor pela vazão de sólido maior aumenta a fração volumétrica do sólido, e esse é mais pronunciado para a menor velocidade da fase gasosa;
- ✓ A maior fração volumétrica é obtida empregando a menor velocidade do componente gasoso e a maior vazão mássica do sólido.

A Tabela 7 mostra os resultados da nossa análise dos dados da Tabela 6, nela incluímos a fração volumétrica média global, que também é uma combinação linear de todas as observações.

Como se pode observar a vazão dos componentes sólido e gasoso influenciam bastante a fração volumétrica do sólido, pois apesar dos valores serem pequenos, não podemos esquecer que estamos trabalhando num sistema bicomponente diluído, logo são importantes suas variações nos procedimentos experimentais no MEF.

Tabela 7 - Efeitos calculados para o planejamento fatorial  $2^2$  da Tabela 6.

<b>Estimativa <math>\pm</math> erro padrão</b>	
<b>Média Global:</b>	0,0028
<b>Efeitos Principais:</b>	
$E_{U_{ar}}$	-0,0015
$E_{Q_s}$	+0,0080
<b>Efeito de interação</b>	
$E_{U_{ar}/E_{Q_s}}$	-0,00021

A existência de um efeito de interação significativo indica que os efeitos principais devem ser interpretados conjuntamente, ou seja, os efeitos das vazões mássica do sólido e volumétrica do ar devem ser analisados simultaneamente.

Os experimentos se baseiam na variação dessas vazões para medidas da fração volumétrica de sólidos em posições axiais estabelecidas, sendo que sempre se fixa a vazão

mássica do sólido e varia a vazão volumétrica do sólido, pois como vimos a efeito conjunto das vazões é significativo, pois o sistema é diluído.

### 3.4 Análise da Sensibilidade dos Parâmetros Envolvidos

Os modelos matemáticos são desenvolvidos a partir de observações sobre o sistema em estudo, visando obter projeções sobre o comportamento do mesmo em determinadas situações. Pode-se então determinar as variáveis que realmente influenciam o modelo e suas relações, formulando-se a partir daí uma relação matemática que descreva o sistema e que possibilite prever diferentes situações do mesmo. Porém os modelos matemáticos são fontes de incerteza porque nem sempre representam, com precisão suficiente, os fenômenos que se passam no interior dos equipamentos e dos fluxos entre estes. Por exemplo, no caso do *riser*, o emprego da distribuição radial das fases constante constitui uma aproximação.

Os parâmetros de ajuste dos modelos são incertos, pelos seguintes motivos principais:

- Os valores de alguns parâmetros físicos são obtidos sob condições de erro experimental, ou são estimados a partir de dados conhecidos para condições que não aquelas previstas durante os experimentos e;
- Além de imprecisos, os valores desses parâmetros físicos variam durante a operação do processo, devido a modificações na estrutura dos equipamentos.

Desta forma, uma importante etapa na verificação e validação, dado no item 2.6.1 da revisão bibliográfica, de um modelo é a estimativa precisa de seus parâmetros, sem a qual, por mais realista que seja o modelo, o mesmo não terá aplicação prática satisfatória. Os modelos matemáticos que representam a fluidodinâmica de um *riser* de um MEF, contêm um elevado número de parâmetros, sendo uma tarefa difícil a estimativa simultânea de todos eles. Assim, a análise da sensibilidade paramétrica pode identificar quais parâmetros têm maior importância sobre as previsões do modelo. Os parâmetros que provocam uma maior sensibilidade nas previsões do modelo devem ser estimados com maior precisão (STREMEL et al., 1996).

A sensibilidade de um modelo com relação a um parâmetro é definida como sendo a variação no valor da previsão feita pelo modelo, causada por uma pequena mudança no valor do parâmetro (HIMMELBLAU, 1970). O efeito da incerteza a um parâmetro  $\xi$  sobre uma previsão do modelo,  $F$ , é medido pela derivada  $\partial F(\xi)/\partial \xi$  calculada no ponto – base  $\bar{\xi}$ , ou seja, com todos os parâmetros e variáveis especificadas em seus valores – base. No entanto, para que o resultado se torne independente das dimensões de  $F$  e de  $\xi$ , utilizam-se os valores de  $F$  e de  $\xi$  relativos aos seus valores – base  $F(\bar{\xi})$  e  $\bar{\xi}$ . Define-se, então, a função sensibilidade de  $F$  em relação ao parâmetro  $\xi$  como:

$$S_{\xi}^F(\bar{\xi}) = \left[ \frac{\partial F(\xi)}{\partial \xi} \right]_{\bar{\xi}} \quad (63)$$

Em função dos valores relativos fica:

$$S_{\xi}^F(\bar{\xi}) = \left[ \frac{\partial [F(\xi)/F(\bar{\xi})]}{\partial (\xi/\bar{\xi})} \right]_{\bar{\xi}} \quad (64)$$

Rearrajando torna-se:

$$S_{\xi}^F(\bar{\xi}) = \left[ \frac{\partial F(\xi)}{\partial \xi} \right]_{\bar{\xi}} \cdot \frac{\bar{\xi}}{F(\bar{\xi})} \quad (65)$$

Em algumas situações muito especiais, a derivada  $\partial F(\xi)/\partial \xi$  pode ser obtida analiticamente, permitindo o cálculo exato da sensibilidade. Entretanto, na maioria dos casos, isso se mostra impraticável, tendo que recorrer a sua aproximação numérica, através do teorema do valor médio (PERLINGEIRO, 2000):

$$\frac{\partial F(\xi)}{\partial \xi} = \frac{F(\bar{\xi} + \Delta\xi) - F(\bar{\xi})}{\Delta\xi} \quad (66)$$

onde,  $\Delta\xi$  é um incremento tomado a partir do ponto base.

Substituindo a equação (3.7) em (3.6) a sensibilidade pode ser estimada como:

$$S_{\xi}^F(\bar{\xi}) = \frac{F(\bar{\xi} + \Delta\xi) - F(\bar{\xi})}{\Delta\xi} \cdot \frac{\bar{\xi}}{F(\bar{\xi})} = \frac{F(\bar{\xi} + \Delta\xi) - F(\bar{\xi})}{F(\bar{\xi})} \cdot \frac{\bar{\xi}}{\Delta\xi} \quad (67)$$

Por exemplo para um incremento de 1%, ou seja,  $\frac{\Delta\xi}{\xi} = 0,01$

$$S_{\xi}^F(\bar{\xi}) = \frac{F(1,01 \cdot \bar{\xi}) - F(\bar{\xi})}{F(\bar{\xi})} \cdot 100\% \quad (68)$$

Os valores - base dos parâmetros do modelo empregados nesta análise são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores-base dos parâmetros do modelo empregados na análise da sensibilidade para  $\pm 10\%$

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor base</b>	<b>+10%</b>	<b>-10%</b>
<b>W(kg/m<sup>2</sup>.s)</b>	37,72	41,49	33,09
<b>Q(L/h)</b>	15915,865	17507,451	14,324279
<b>D (m)</b>	0,032	0,0352	0,0288
<b>L(m)</b>	2,3	2,53	2,07
<b><math>\varepsilon_s</math></b>	0,003	0,033	0,027
<b><math>\rho_g</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2,26	2,486	2,034
<b><math>\rho_s</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	850	935	765
<b><math>d_p</math> (m)</b>	0,000072	0,0000792	0,0000648
<b><math>\mu_g</math> (kg/m.s)</b>	0,0000186	0,0000205	0,0000167

As sensibilidades paramétricas foram calculadas com valores médios obtidos pelo modelo matemático. A Tabela 9 ilustra os efeitos de uma variação de +10% e -10%, nos valores da fração volumétrica do sólido, em termos percentuais.

Tabela 9 – Sensibilidade da fração volumétrica do sólido (%)

$\xi$	<b>10%</b>	<b>-10%</b>
W	0	0
Q	0	0
D	+7,7	+7,7
L	-7,7	-7,7
$\rho_{ar}$	0	0
$\rho_s$	0	0
$d_p$	+15,4	-15,4
$\mu_g$ (kg/m.s)	-7,7	-7,7

Os resultados apresentados devido às variações de +10% e -10% nos valores selecionados, permitiu verificar que os parâmetros que influenciaram o modelo matemático na fração volumétrica do sólido foram:

- ✓ Diâmetro do sólido;
- ✓ Viscosidade do ar;
- ✓ Comprimento do *riser*;
- ✓ Diâmetro do *riser*;

Nesse caso é necessário que os parâmetros cujos efeitos influenciaram o modelo matemático sejam determinados de forma precisa. Dentre esses parâmetros o único que pode variar é a vazão volumétrica do ar. O Apêndice E mostra análise das incertezas dos parâmetros estudados.

## 3.5 Realização de Medidas

### 3.5.1 Definição das condições operacionais do MEF

O trabalho para realização dos experimentos foi direcionado em duas etapas. A primeira etapa ajustar o Modelo Experimental a Frio (MEF), com o objetivo de fornecer condições para termos um processo cíclico para o sólido como numa FCC industrial e a montagem da aparelhagem da atenuação gama, mostrado nos itens 3.1. A segunda etapa foi à utilização do MEF para a realização de medidas experimentais no *riser* em condições bem definidas, da vazão volumétrica do componente gasoso e da vazão mássica do componente sólido, onde foi realizada a determinação das condições de operação que será mostrada a seguir, para em seguida fazer medidas diretas da fração volumétrica do catalisador ao longo do comprimento axial do *riser*, para condições operacionais no estado estacionário e medidas da pressão na altura de 0,17 e 1,99 m da base do *riser*.

Para ajustar as condições operacionais com precisão na obtenção dos parâmetros fluidodinâmicos fez-se primeiramente a calibração dos sensores de pressão com outro sensor calibrado. Para a medida da vazão mássica de sólidos, utilizou-se um béquer para recolher a massa de catalisador em um determinado tempo e pesada na balança analítica calibrada. Através do inversor de frequência foi variada a velocidade do motor do transportador helicoidal no qual foram realizadas medidas na rotação entre 115 e 1150 RPM, esses resultados são mostrados na Figura 29 com os resultados mostrados na Tabela A1 do Apêndice A. O medidor de vazão volumétrica do ar foi calibrado em função do set point de entrada no sistema de controle para ver qual a faixa de linear e os resultados são mostrados na Figura 30.

#### Calibração do transportador helicoidal

A Figura 29 mostra a faixa de operação da vazão mássica do sólido é de  $(9,5 \cdot 10^{-4} - 95 \cdot 10^{-4})$  kg/s, correspondente à rotação do transportador helicoidal de 1,8 – 18 RPM. Nela observa-se que a melhor faixa de operação de se trabalhar é nas rotações de 7,2 – 14,4 RPM que correspondem às vazões mássicas de sólidos de  $(38 \cdot 10^{-4} - 76 \cdot 10^{-4})$  kg/s, pois para taxas menores

que a rotação de 7,2 RPM não há detecção da radiação gama e que acima da rotação de 14,4 RPM temos o problema da vibração excessiva que pode prejudicar a coluna de retorno.

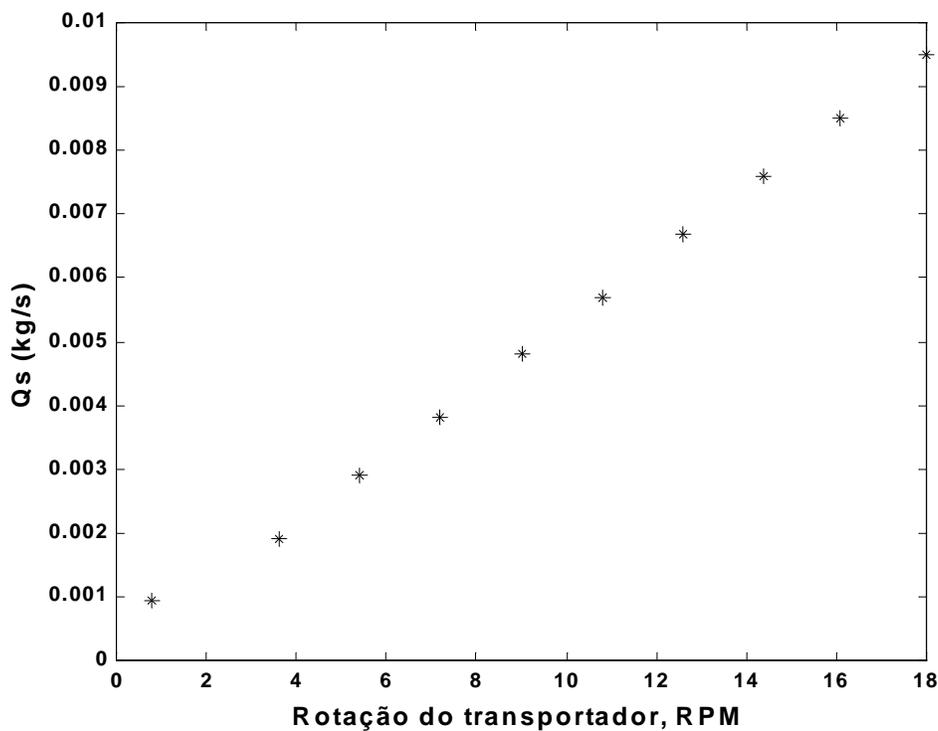


Figura 29 – Vazão mássica do catalisador em função da rotação do transportador

#### Calibração da vazão com o medidor de condutividade térmica

A calibração da vazão volumétrica do ar foi feita em função do percentual de vazão de 0 a 100% da vazão de 500 L/min, de forma a se determinar a faixa linear de operação.

A Figura 30, mostra que a faixa de operação para se trabalhar é na faixa linear onde ocorre arraste das partículas que correspondem ao percentual da vazão de 30 – 60, que em termos de vazões volumétricas correspondem a  $(2,6 \cdot 10^{-3} - 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s})$ .

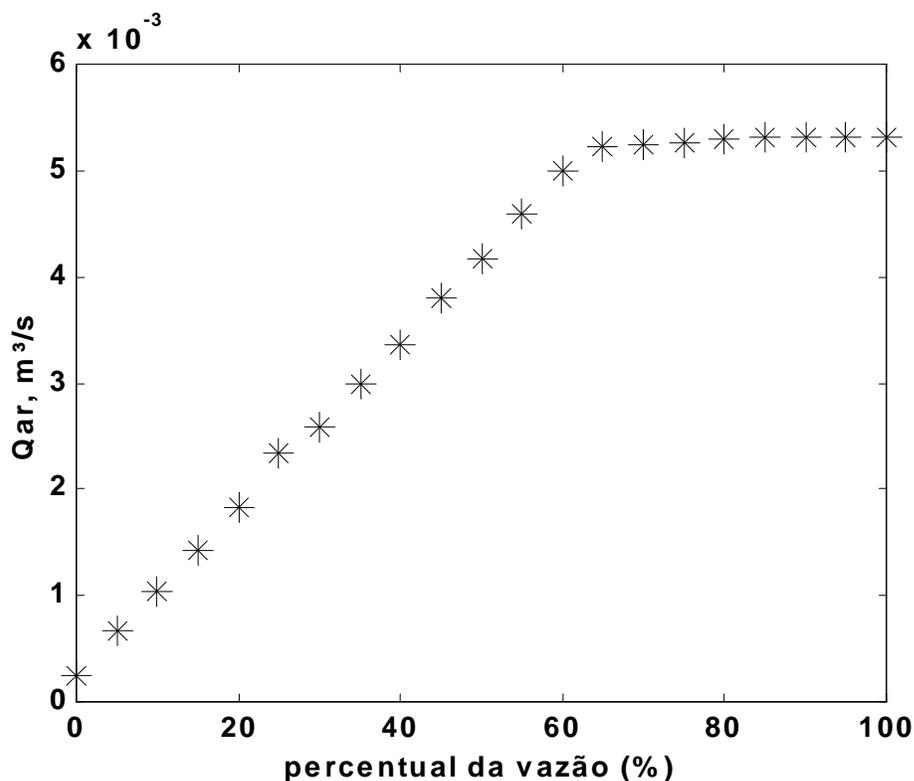


Figura 30 – Variação da vazão do ar em função do percentual de vazão

#### **Posições para as medidas da fração volumétrica do sólido na direção axial do riser**

As medidas da fração volumétrica do sólido foram feitas na direção axial do *riser* em cinco posições diferentes: 0,410; 0,570; 0,730; 0,890 e 1,050 m, todas em relação à base do *riser* como mostra a Figura 31. Essas medidas foram escolhidas de maneira que se pegasse a região de aceleração de sólidos e a região de escoamento completamente desenvolvido. Dividindo as posições de medida pela altura efetiva do *riser*, altura entre os sensores de pressão, que é de 1,82 m, temos as seguintes alturas relativas aproximadamente de: 0,20; 0,30; 0,40; 0,50 e 0, 60, respectivamente.

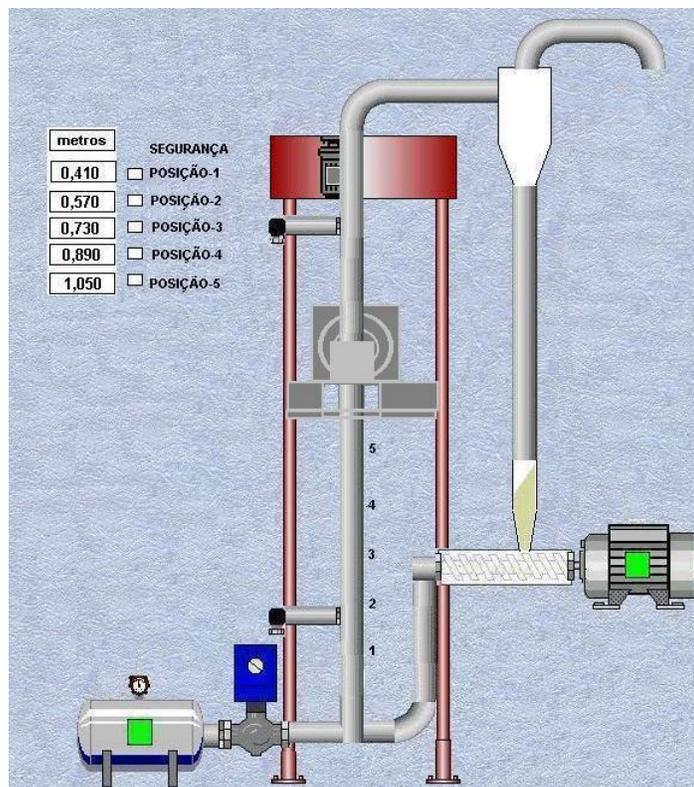


Figura 31 – Posições axiais das medidas de atenuação gama

Para determinar as melhores combinações das vazões dos componentes realizou-se experimentos para determinar a fração volumétrica do sólido na posição axial do *riser* de 1,050 m, por ser a posição de medida mais diluída do escoamento. As condições de medidas da fração volumétrica do sólido são mostradas na Tabela 10.

Tabela 10 – Condições experimentais para as medidas da fração volumétrica do sólido.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Fonte	Americio- 241
Abertura do colimador da fonte	(0,0055 m) ou (5,5 m m)
Abertura do colimador do detector	(0,01 m) ou (10 m m)
Tempo de contagens	120 s
Canais	35-65
Centróide	53
Tempo morto	$\pm 0,15\%$
Distancia fonte-detector	(0,085 m) ou (8,5 cm)

Foram realizados 54 experimentos, baseados nas faixas de operações dadas pelas Figuras 29 e 30, combinando as vazões dos componentes de modo que fixou-se a vazão mássica do sólido e variou-se a vazão volumétrica do ar, para se determinar a fração volumétrica de sólidos como mostra a Tabela A3 do Apêndice A.

Os resultados dos experimentos para a obtenção da fração volumétrica de sólidos são mostrados a nas Figuras 32 e 33, e seus resultados são dados na Tabela A3 do Apêndice A.

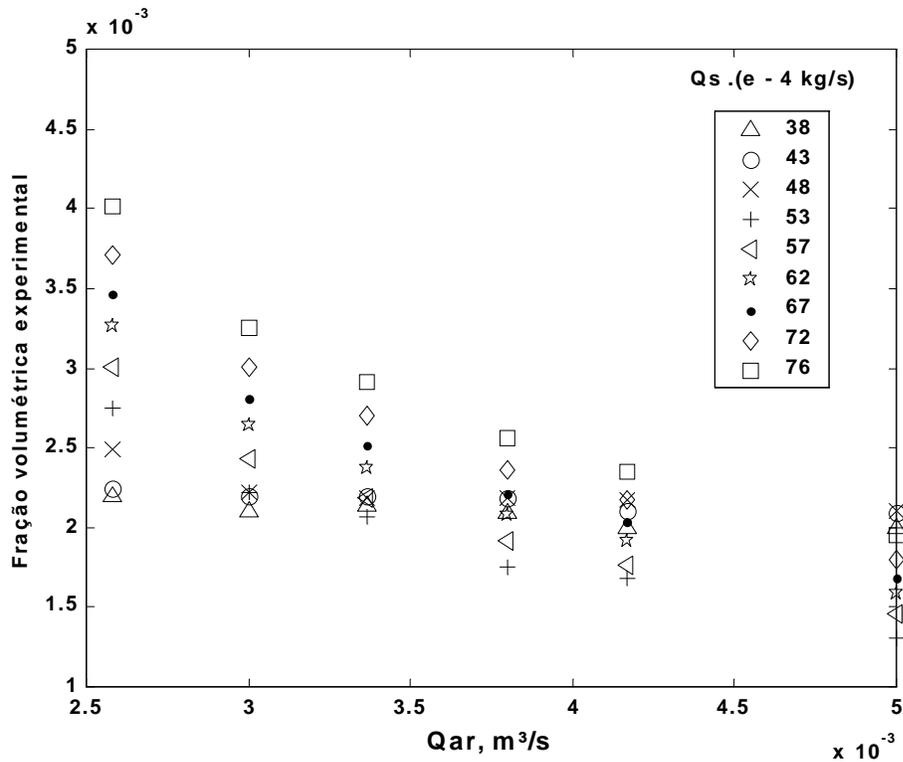


Figura 32 – Variação da fração volumétrica em função da vazão do ar

Como se observa na Figura 32 para as vazões mássicas do sólido de  $38 \cdot 10^{-4}$  a  $47 \cdot 10^{-4}$  kg/s as variações da fração volumétrica do sólido são praticamente constante com o aumento da vazão volumétrica do ar. A partir da vazão mássica de  $52 \cdot 10^{-4}$  kg/s começa a ser mais clara essa variação e é na vazão mássica  $57 \cdot 10^{-4}$  kg/s que o comportamento da fração volumétrica do sólido diminui com o aumento da vazão do ar de forma bem definida.

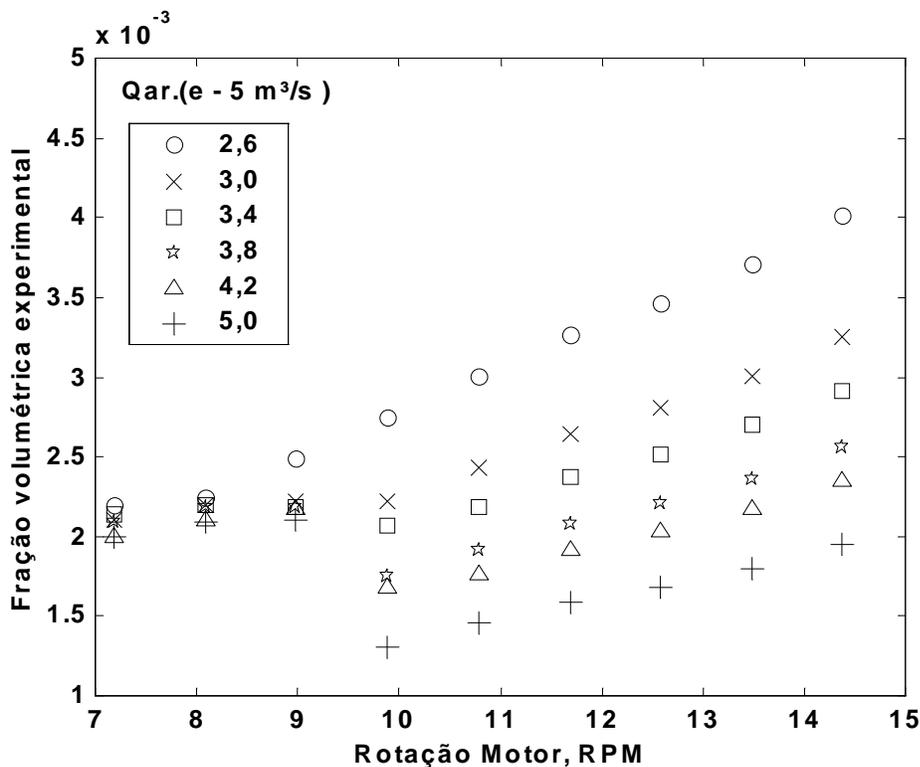


Figura 33 – Variação da fração volumétrica em função da rotação do motor

A Figura 33 mostra que com o aumento da rotação do motor ocorre aumento da fração volumétrica do sólido, porém para a rotação de 10,8 RPM ocorre uma pequena queda para todas as vazões volumétricas do ar exceto o na vazão volumétrica do ar de  $2,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  e então a partir desse ponto a fração só aumenta com o aumento da rotação do motor.

Pode-se observar também na Figura 33 que a maior fração volumétrica se dá com a menor vazão volumétrica do ar e maior rotação do motor e que o inverso também é verdadeiro, ou seja, a menor fração volumétrica se dá com a maior vazão volumétrica do ar e menor rotação do motor, como era de se esperar.

Conclui-se então que a faixa de vazão volumétrica do ar para trabalhar é de  $2,6 \cdot 10^{-5} - 5,0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  ou 3-6 m/s que corresponde aos percentuais de vazão de 30-60%) e a faixa de fluxo do sólido é de  $57 \cdot 10^{-4} - 76 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s}$ . Para as medidas axiais das alturas dadas na Figura 31.

### 3.5.2 Procedimentos de medidas dos parâmetros fluidodinâmicos

#### Fração volumétrica do sólido

Para a verificação se o detector estava funcionando adequadamente foi feito uma estatística para as medidas de intensidade ( $x_i$ ) no *riser* vazio, como é mostrado na Tabela 1 G do Apêndice G, Em seguida realizou-se os experimentos com relação à altura axial do *riser* nas seguintes condições experimentais das vazões dos componentes, para os fluxos de 0,71 e 0,95 kg/m<sup>2</sup>.s e vazões volumétricas do ar de  $258.10^{-5}$ ;  $300.10^{-5}$ ;  $337.10^{-5}$ ;  $380.10^{-5}$ ,  $417.10^{-5}$  e  $500.10^{-5}$  m<sup>3</sup>/s, nas alturas correspondentes à Figura 31.

A determinação experimental da fração volumétrica do sólido ao longo do *riser* seguiu o mesmo procedimento adotado por Santos, Melo e Dantas (2001), quando determinou os perfis da fração volumétrica no *riser* utilizando a técnica de atenuação gama. Para tanto foi utilizada uma fonte de <sup>241</sup>Am, cujo raio gama mais abundante tem energia de 0,06 MeV, e o detector de cintilação NaI (TI).

Foram efetuadas medidas das intensidades, com o *riser* vazio e em regime de fluxo, nos pontos de medida. A Figura 24 mostra o arranjo fonte-*riser*-detector, com blindagem e suporte para sustentação da fonte e detector que permite o deslocamento vertical na direção axial do *riser*.

Com os valores  $I_0$  e  $I$ , intensidade de radiação com o tubo vazio e em regime de fluxo, respectivamente, em cada ponto de medida, foi aplicada a Equação 45 dada no Capítulo 2. E através de um programa denominado *porosidade.m* dado no Apêndice B, no qual utiliza a Equação 45 da revisão bibliográfica determinamos a fração volumétrica do sólido.

#### Velocidade dos sólidos

A determinação da velocidade dos sólidos na direção axial do *riser* foi determinada através da equação da continuidade para o sólido dada na Equação 20.

### Velocidade do gás

A determinação da velocidade do gás na direção axial do *riser* foi determinada através da equação da continuidade para o gás, equação 21, utilizando a vazão volumétrica e fração volumétrica do gás obtida experimentalmente:

### Razão de escorregamento

A razão de escorregamento entre os componentes é dada pela razão entre as velocidades dos componentes, obtidos nas Equações 20 e 21:

### Queda de pressão no *riser*

A medida da queda de pressão no *riser* é feita através de sensores de pressão fixados nas posições de 0,17 e 1,99 m da base do *riser*. Primeiramente mediu-se a queda de pressão somente com a presença do ar, através da variação da vazão volumétrica do mesmo. Em seguida mediu-se a queda da pressão do sistema bicomponente, fixando uma vazão mássica do sólido e variando a vazão volumétrica do ar.

## **3.6 Simulação da Fluidodinâmica do *Riser***

### **3.6.1 Estimativas de valores de contorno**

Qualquer modelo fluidodinâmico analisado neste trabalho é composto pelas equações conservação de massa do fluido, conservação de massa do sólido e conservação da quantidade de movimento da mistura, além de uma quarta equação que é característica para cada modelo; a Eq. 52 para o modelo de Maladi e Otero (1983), Eq. 53 Mendes e Santana (1983) e Eq. 55 para o de Santana, Rocha e Kachan (1988). Ao se analisar as equações dos sistemas que compõem qualquer dos modelos observa-se que elas:

- ✓ são equações diferenciais ordinárias;
- ✓ são de primeira ordem;

- ✓ são não lineares;
- ✓ são homogêneas;
- ✓ determinam um problema de contorno.

Os modelos baseados em equações diferenciais são convertidos, por diversas técnicas numéricas, em sistemas de equações algébricas. Quase sempre, estes sistemas de equações algébricas não admitem soluções analíticas e, por isto, precisam ser resolvidos numericamente (PINTO e LAGE, 2001). Assim os sistemas formados pelas equações dos modelos analisados aqui podem ser resolvidos por vários métodos numéricos, como por exemplo, o método de Runge –Kutta.

Para fazer uma estimativa dos valores iniciais de importantes parâmetros da fluidodinâmica do *riser* do MEF, visando atender ao banco de dados necessário às simulações dos modelos dinâmicos foi elaborado um fator de correção para as variações dos valores de parâmetros fluidodinâmicos estimados por correlações algébricas que descrevem os fenômenos no *riser*. Essas variações são devido às variações de fração volumétrica ao longo do comprimento axial do *riser*. Dessa forma, um fator de *holdup*, como foi denominado, foi elaborado de dados experimentais apresentados na literatura (NAMKUNG, WON KIM e DONE KIM,1999). Valores médios experimentais da fração volumétrica de sólidos em um *riser* de um modelo a frio de uma piloto de FCC, de 0,1 m de diâmetro interno por 5,3 m de altura, permitiram ajustes de um modelo algébrico baseado nas Equações 20 a 35, utilizadas para estimativas das propriedades de um *riser* a frio (Figura 34).

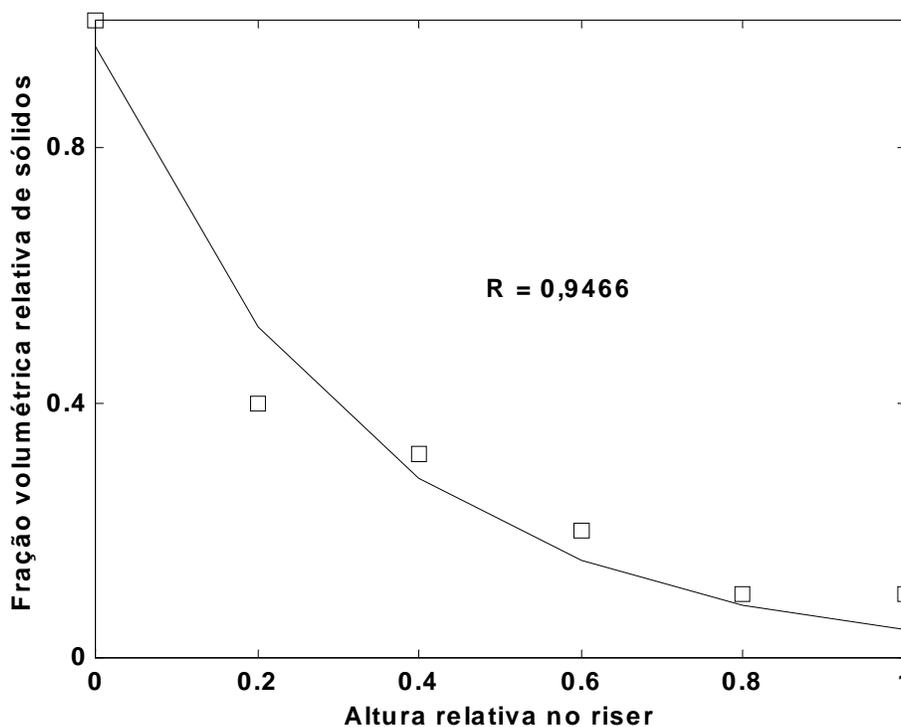


Figura 34 – Comparação entre os valores experimentais e calculados da fração volumétrica do sólido no *riser* de uma piloto tipo FCC

A Figura 34 apresenta um gráfico com os dados experimentais, ajustados a um modelo matemático, onde correlacionamos a razão entre as frações volumétrica de sólidos, ao longo do *riser* com relação à base do mesmo (região de aceleração de sólidos), em função da posição axial relativa no *riser*, tendo - se obtida uma expressão para o fator de *holdup*, dada pela Equação 69.

$$f_{\text{holdup}} = 0,95858 \cdot e^{-\left(3,06675 \frac{z}{L}\right)} \quad (69)$$

Assim o modelo algébrico teve seus termos ajustados pelo fator de *holdup* dando origem a um sistema de equações algébricas que permitem a obtenção de valores de contorno ( $z=0$ ) que são utilizados na simulação de modelos dinâmicos:

i) Fração volumétrica do gás

$$\varepsilon_g(z) = \varepsilon_g(\text{simulado}) \cdot f_{\text{holdup}} \quad (70)$$

ii) Fração volumétrica do sólido

$$\varepsilon_s(z) = 1 - \varepsilon_g(z) \quad (71)$$

iii) Velocidade local do gás

$$U_g(z) = \frac{U_{g0}}{\varepsilon_g(z)} \quad (72)$$

iv) Velocidade local do sólido

$$U_s(z) = \frac{U_{g0}}{\varepsilon_s(z)} \quad (73)$$

v) Pressão total local no *riser*

$$P(z) = f(\varepsilon_z, \rho_z, U_z, g, D, L) \quad (74)$$

### 3.6.2 Programa de simulação

As equações diferenciais ordinárias descrevem como as taxas de variação das variáveis de um sistema são influenciadas por variáveis do sistema e por estímulos externos, ou seja, por entradas. Quando as equações não podem ser resolvidas prontamente de forma analítica, é conveniente resolvê-las numericamente.

A partir de um conjunto de equações, as funções do MATLAB ode23 e ode45 podem ser usadas para encontrar a variação dos parâmetros do modelo em função da posição axial do *riser*.

Isso requer que escreva-se um arquivo M de função que retorna as derivadas do modelo dinâmico, dados os seus valores iniciais. No MATLAB, as derivadas são dadas por um vetor coluna, da mesma forma os parâmetros são escritos como um vetor coluna de  $y$ .

A Figura 35 mostra a sub-rotina cuja denominação é *friser*, O nome da função se escolhe aleatoriamente. A única exigência é que se crie um arquivo com o mesmo nome da função escolhida. Este arquivo é idêntico a qualquer arquivo criado no Matlab, porém de extensão M, onde será arquivado o programa, para que o mesmo possa ser utilizado posteriormente.

A função *friser* forma uma matriz de quatro linhas e uma coluna em seguida iguala as derivadas do modelo dinâmico a zero, formando um sistema de equações diferenciais a ser resolvido dado a condição de contorno.

Os índices 1, 2, 3 e 4, atribuídos às variáveis, são respectivamente a velocidade do gás, velocidade do sólido, fração volumétrica do gás e pressão total no *riser*.

```
function fv = friser (z,x)
fv = zeros (4,1)
fv(1) = conservação de massa do gás;
fv(2) = conservação de massa do sólido;
fv(3) = conservação de massa da mistura;
fv(4) = conservação da quantidade de movimento da mistura;
```

Figura 35 – Algoritmo da sub-rotina de arquivo M

Para armazenar os dados de saída da função *friser*, cria-se um novo arquivo, no qual chamamos de *sdriser*, que também pode ser escolhido com o nome aleatoriamente, como mostra a Figura 36, nela temos o esquema script de saída dos resultados, no qual contém a variável independente  $z$  e as condições de contorno ( $x_{in}$ ) dos parâmetros a serem analisados.

```

xin =[ Ug0, Us0,  $\mathcal{E}g0$ , P0 ];

[z x] = ode45 ( 'riser', z, xin);

plot (z, x ( : , 1 ) );
plot (z, x ( : , 2 ) );
plot (z, x ( : , 3 ) );
plot (z, x ( : , 4 ) );

```

Figura 36 – Programa script que armazena os dados de saída

Os dois parâmetros de saída são um vetor de coluna z, contendo os pontos da altura onde a resposta foi estimada, e a matriz y, que tem tantas colunas quantas forem às equações diferenciais (nosso caso quatro) e tantas linhas quantas existirem em z.

A função ode45 é usada exatamente da mesma maneira que a ode23. A diferença entre as duas funções está relacionada com o algoritmo interno utilizado: ode45 usa um algoritmo mais complicado, que não tem de calcular tantos pontos sobre uma dada faixa de posição, mas necessita de mais cálculos por ponto de posição. Também a precisão para resolução de um sistema de equações diferenciais é melhor na ode45, pois a mesma utiliza o método de Runge - Kutta de quarta e quinta ordem tendo uma precisão na ordem de  $10^{-5}$ .

Com auxílio do fator de hold-up e das equações do modelo dinâmico foi elaborado um programa computacional (Apêndice B), para simular gráfica e numericamente algumas variáveis fluidodinâmicas do *riser* do MEF. As etapas do programa são comentadas a seguir:

### ***Programa Script***

- i) Solicita as dimensões do *riser* (L e D) e condições de operações (W, T, e P);
- ii) Solicita a vazão volumétrica da fase gasosa ( $Q_{ar}$ );
- iii) Calcula as frações volumétricas médias dos componentes na base do *riser*;
- iv) Calcula o fator de hold-up para a fração volumétrica de sólidos com base no modelo de distribuição axial de sólidos elaborado;
- v) Calcula iterativamente os valores iniciais das frações volumétricas e velocidades dos componentes e da razão de escorregamento para o *riser*;
- vi) Calcula os coeficientes e os termos de perda de pressão total através do *riser*;

- vii) Transforma os resultados em unidades adequadas para termos os valores iniciais das frações volumétricas e velocidades dos componentes e da pressão no *riser*, e;

***Sub-rotina***

- viii) Com os valores iniciais das variáveis do modelo fluidodinâmico resolve o sistema de equações diferenciais através do método de Runge-Kutta, obtendo perfis axiais da fração volumétrica, velocidades, razão de escorregamento dos componentes e pressão total no *riser*.

O fluxograma correspondente ao algoritmo elaborado para a simulação do modelo dinâmico da fluidodinâmica do *riser* encontra-se ilustrado na Figura 36:

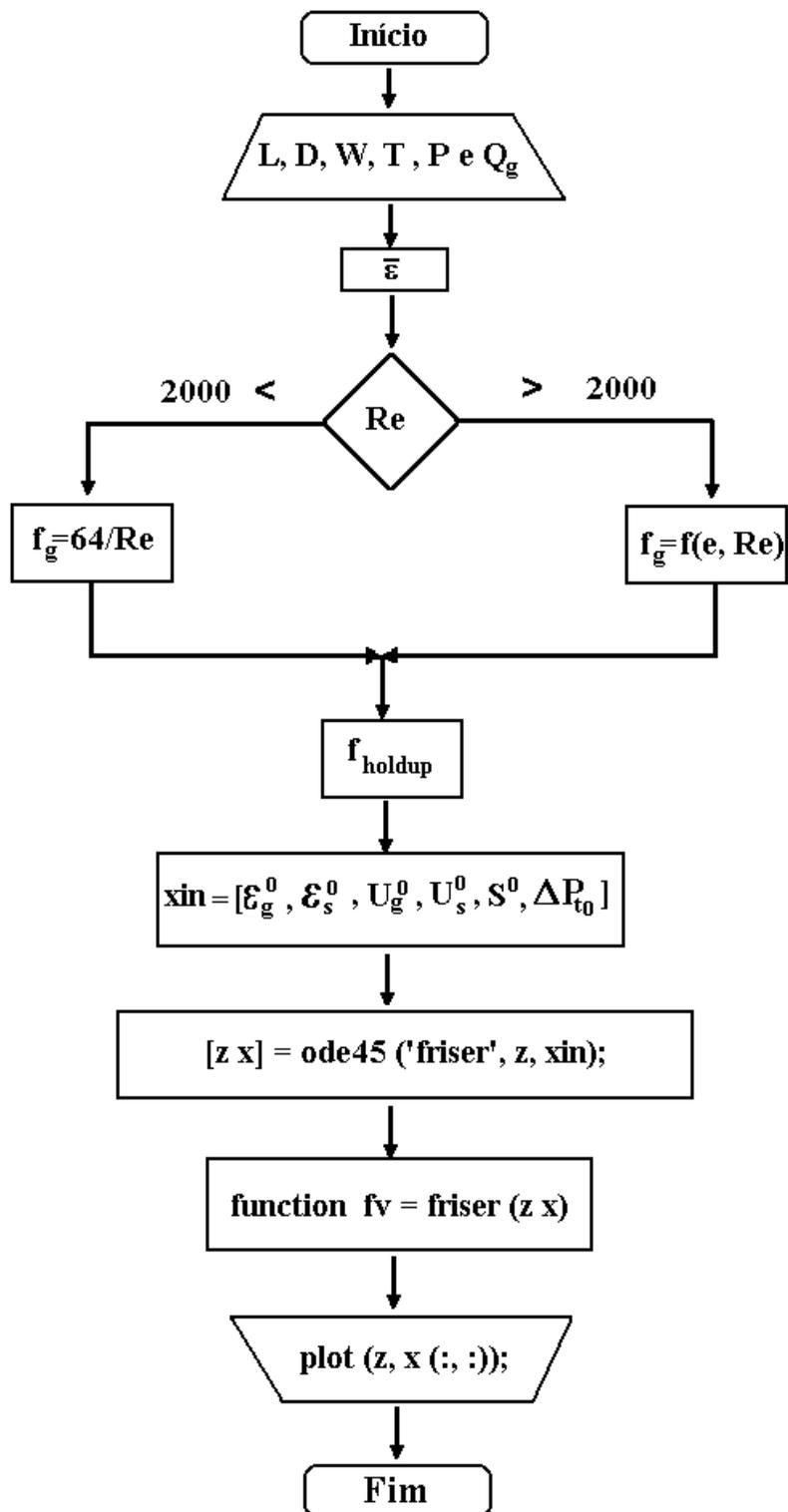


Figura 37 – Fluxograma do algoritmo de simulação dos modelos fluidodinâmicos

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Dados Experimentais

A realização de experimentos com o MEF, para permitir observações de importantes fenômenos fluidodinâmicos no *riser*, foi realizada visando a obtenção dos perfis desses parâmetros para diferentes vazões dos componentes da mistura gás-sólido. Com base nesses experimentos foram utilizados modelos selecionados da literatura, expondo-se em forma de gráficos valores simulados contra valores experimentais. Compararam-se então os valores calculados de parâmetros estatísticos como ordem crescente de prioridade os seguintes parâmetros: erro padrão, coeficiente de correlação e erro relativo máximo, como critério de escolha do modelo a ser adotado como o mais adequado.

Inicialmente o MEF era colocado em operação é após o estabelecimento de condições estacionárias para as vazões de ar e catalisador, eram realizadas medidas da concentração volumétrica de sólidos. Durante todas as realizações dos experimentos o fluxo de catalisador foi mantido a 7,1 kg/m<sup>2</sup>.s, uma vez que não foram constatadas variações consideráveis nos comportamentos dos parâmetros observados com um aumento ou redução desse fluxo. As condições operacionais do MEF distinguiram-se entre si pelas diferentes vazões volumétricas de ar, fixadas durante os experimentos. Foram adotadas para as vazões simbologias relacionadas no Tabela 11 a seguir.

Tabela 11- Vazões e respectivas simbologia adotadas para representar os gráficos

Vazão volumétrica do ar, 10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup> /s	Simbologia adotada
258	●
300	×
337	
380	★
417	△
500	+

### Perfil da fração volumétrica do sólido

A Figura 38 apresenta um gráfico do perfil experimental da distribuição axial da fração volumétrica do catalisador, cujos valores estão contidos no Apêndice A, Tabela 4 A. Com auxílio do referido gráfico observa-se que o perfil mencionado não obedece a uma função linear do comprimento axial relativo do *riser*.

A partir de uma análise estatística dos dados contidos na Tabela 4 A e observando-se o gráfico mostrado pela Figura 38 percebe-se uma maior concentração de catalisador na base do *riser*, numa região cujo topo fica próximo de um comprimento relativo em torno de 0,3. Contudo somente para os três menores valores de vazão ficaram caracterizadas as existências dessa região de maior densidade de catalisador, com essa amplitude, semelhante a uma região de aceleração dos sólidos, ou seja, abaixo de uma região de escoamento completamente desenvolvido. Por outro lado, para as três vazões de valores relativamente maiores essa região de maior densidade tem uma amplitude relativa ao comprimento axial do *riser* de aproximadamente 0,25. Dessa forma percebe-se que os efeitos da gravidade sobre o catalisador são mais pronunciados para vazões maiores do gás, isto é, para essas vazões a componente de arraste do gás atua no sentido de reduzir os efeitos da gravidade.

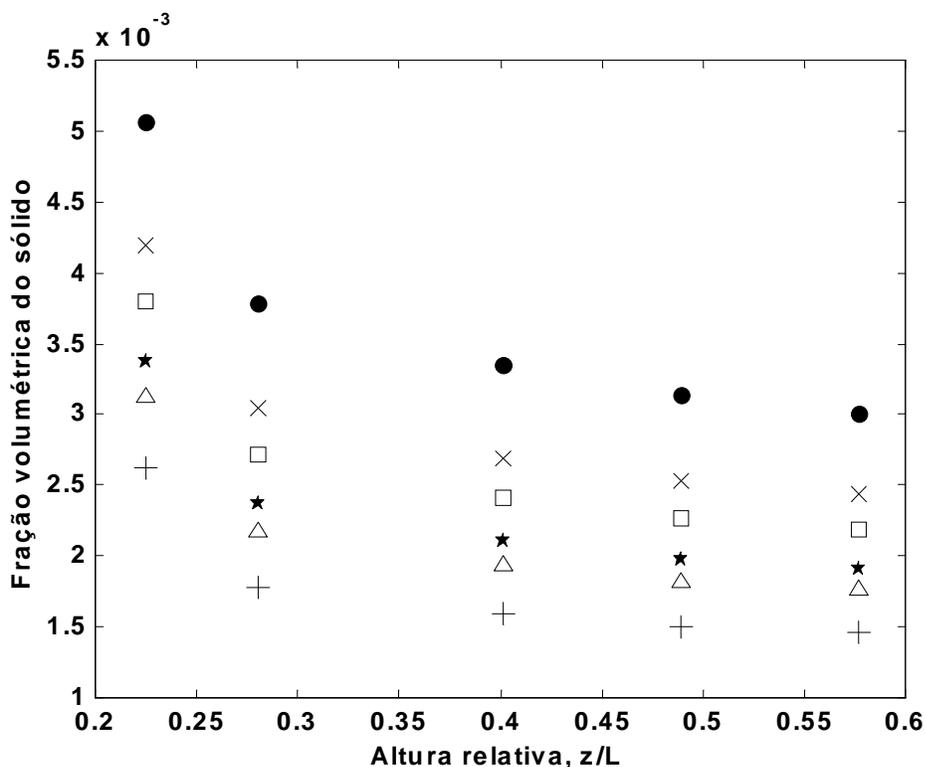


Figura 38 - Fração volumétrica do sólido em função da altura relativa do *riser*

#### Perfil da fração volumétrica do gás

A Figura 39 apresenta gráficos ilustrando as frações volumétricas do gás, em função da altura relativa do *riser*, para as mesmas vazões volumétricas da Figura 38. Observa-se então que a fração volumétrica do gás tem comportamento oposto ao da fração volumétrica do sólido. Pode-se então confirmar a ocorrência de uma região de aceleração dos sólidos e uma região de escoamento completamente desenvolvido a partir das observações dessas duas figuras e das análises estatísticas dos dados que deram origem aos gráficos. Essa informação pode ser importante para a elaboração de fatores corretivos, visando valores mais precisos, quando se deseja fazer previsão do tempo real de contato entre o catalisador e os vapores dos hidrocarbonetos em um *riser* comercial.

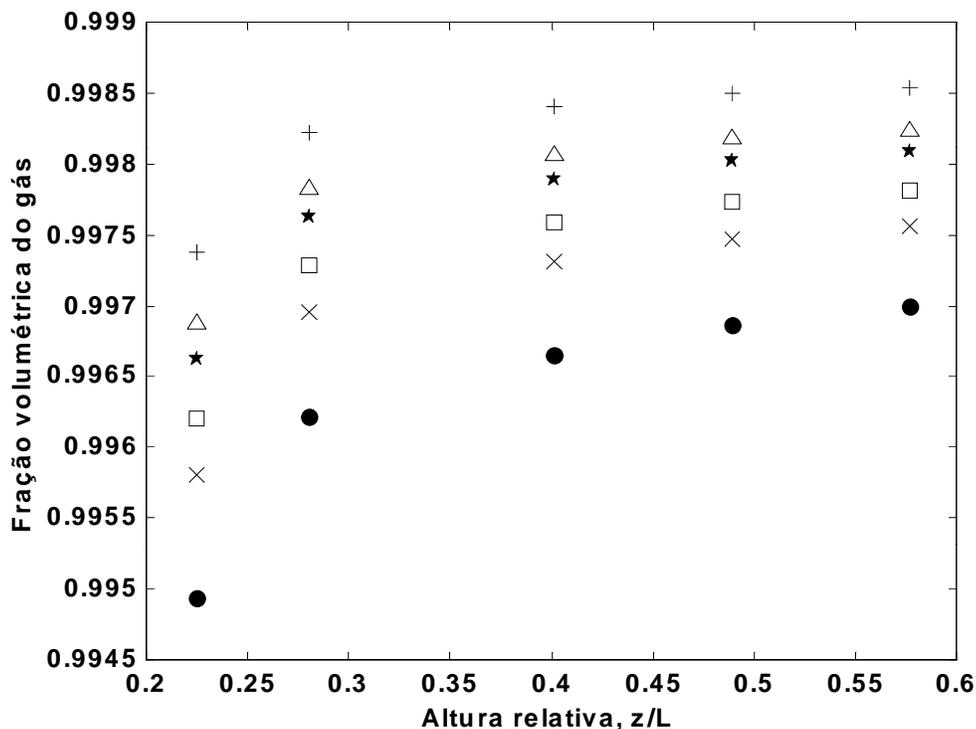


Figura 39 - Fração volumétrica do gás em função da altura relativa do *riser*

#### Perfil da velocidade do sólido

Por ser a relação entre a velocidade superficial e sua respectiva fração volumétrica, a velocidade local de qualquer componente tem perfil oposto em relação a sua própria fração volumétrica. No caso do catalisador no *riser* do MEF, por exemplo, uma maior fração volumétrica na base desse *riser* indica uma menor velocidade do sólido nesta região. A Figura 40 apresenta esse tipo de comportamento para o catalisador no *riser* em função da altura relativa. Dessa forma, o perfil de velocidade local do catalisador também não é função linear da altura relativa no *riser*. Uma vez que a velocidade superficial do catalisador (razão entre a vazão volumétrica do catalisador e a área total da seção reta do *riser*) é constante, uma análise estatística dos valores de velocidade local também pode caracterizar a existência de regiões diferenciadas no *riser* - uma região de aceleração e outra de escoamento completamente desenvolvido. Dessa forma, como previsto pela concentração volumétrica do catalisador (Figura 38) o catalisador ao entrar no *riser* é acelerado até uma altura relativa (0,3 ou 0,25) e dessa região por diante adquire uma velocidade constante. Isso significa dizer que nas condições

operacionais do *riser* do MEF, não foram detectadas as formações de regiões de escoamento do tipo *downflow*, com conseqüente formação do conhecido efeito *core-annulus*, dentro da faixa de operação praticada durante as medidas de fração volumétrica por meio de atenuação gama. Isto sugere uma interessante aplicação dessa técnica utilizada, uma vez que a monitoração da fração volumétrica do catalisador pode dar indicações de efeitos indesejáveis ao escoamento, o que poderia levar à aplicação de ações corretivas nas condições operacionais do *riser* em estudo.

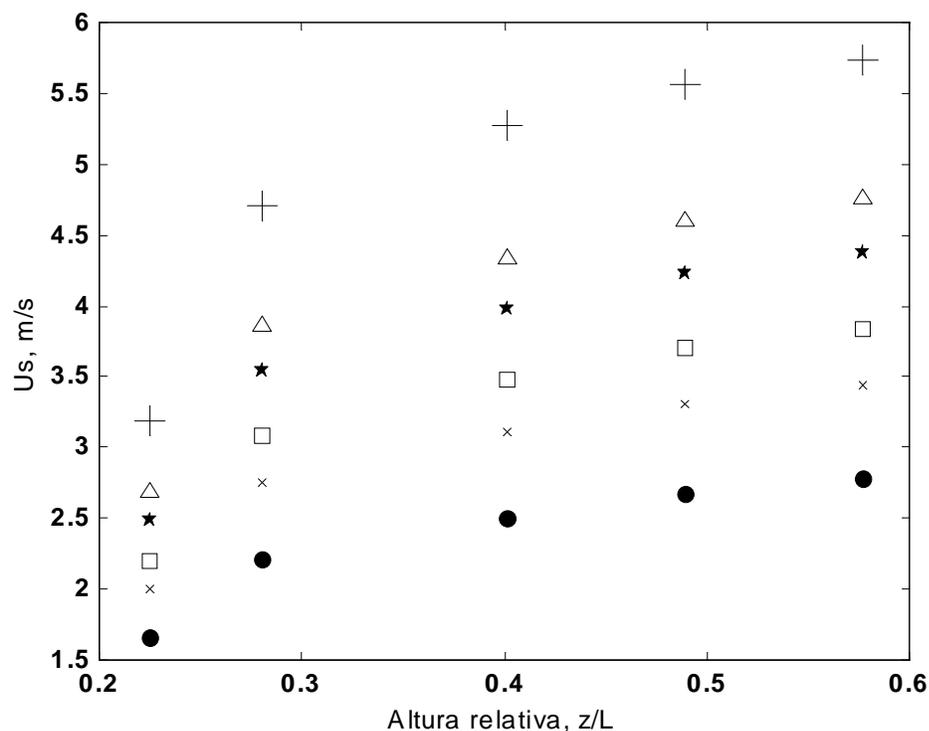


Figura 40 – Velocidade do sólido em função da altura relativa do *riser*

#### Perfil da velocidade do gás

A Figura 41 mostra o perfil axial da velocidade do gás no *riser* do MEF em função da altura relativa. Sabe-se que quanto maior é a vazão volumétrica do gás e, conseqüentemente, maior a velocidade do gás. Contudo, não ocorre uma variação visível do gradiente da velocidade do gás com relação à altura relativa do *riser*, sendo esta constante para quaisquer das diferentes vazões volumétrica do ar através do *riser*. É que por estar trabalhando em um sistema de transporte de sólidos em fase diluída, as variações de velocidade do gás são muito mais difíceis

de serem representadas em gráficos com a mesma escala que aquela utilizada para apresentar os perfis de velocidade do catalisador. Entretanto, as mesmas características do escoamento no *riser* previstas pelos perfis de velocidades do sólido devem ser confirmadas com o uso de uma escala conveniente para essa representação gráfica, embora possamos adiantar que esses mesmos valores experimentais obtidos também dificultam o estabelecimento da existência de regiões diferenciadas de escoamento por análise estatística dos mesmos.

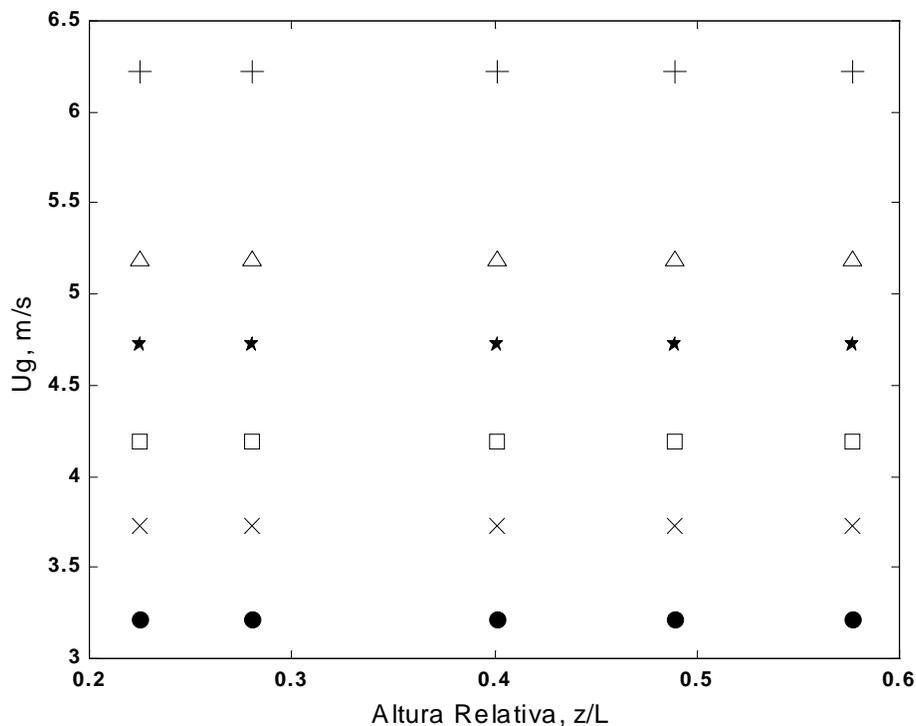


Figura 41 - Velocidade do gás em função da altura relativa do *riser*

#### Perfil da razão de escorregamento dos componentes

Devido às diferenças maiores entre as velocidades do ar e do catalisador ocorrerem na base do *riser*, quando o sólido entra em contato inicial com o gás, esperam-se aí valores muito maiores de razão de escorregamento, *slip*, nessa região do *riser*, do que valores considerados bons para um *riser* de FCC (1 a 2).

A Figura 42 apresenta os perfis experimentais, na direção axial do *riser*, da razão de escorregamento para o fluxo dos sólidos fixado em  $0,71 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ . Neles observa-se que as razões

de escorregamento são maiores na base e tendem a diminuir com o aumento do comprimento relativo do *riser*, quando acontece o estabelecimento da região de escoamento completamente desenvolvido.

Como era de se esperar, a região de escoamento completamente desenvolvido ocorre a uma altura relativa próximo de 0,3 para todas as vazões volumétricas do ar com as quais o MEF operou. Os valores dessa razão de escorregamento entre os pontos de medidas (Figura 42), variaram dentro da faixa de valores que se consideram como aceitáveis para o contato entre o gás e o sólido ao longo do *riser*. Os valores máximo e mínimo foram de 1,94 e 1,08, respectivamente. Esses valores do *slip* encontram-se dentro da faixa considerada ideal e confirmam a inexistência de um *downflow*, caracterizando o escoamento através do *riser* do MEF nas condições de operação adotadas neste trabalho. Valores acima de 2 indicariam uma elevada razão de escorregamento e caracterizariam fluxos descendentes de catalisador, geralmente próximos às paredes do *riser*.

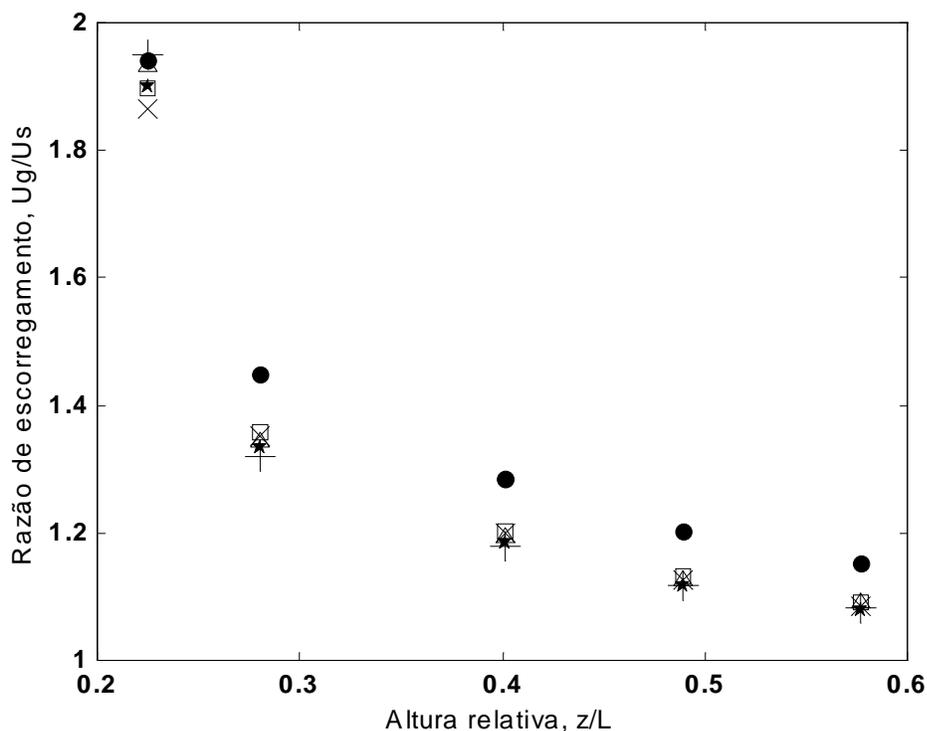


Figura 42 – Razão de escorregamento em função da altura relativa do *riser*

## 4.2 Comparação entre valores experimentais e simulados

Os gráficos da comparação podem ser vistos nas Figuras 43 a 44 mostradas a seguir com dados experimentais e simulados calculados mostrados nas Tabelas 1 C a 4 C do Apêndice C.

### Fração volumétrica do sólido

A Figura 43 mostra a fração volumétrica do sólido em função das posições axiais relativas do riser de dados experimentais obtidos no MEF e valores simulados pelos modelos de Santana, Rocha e Kachan (1988) e Maladi e Otero (1983).

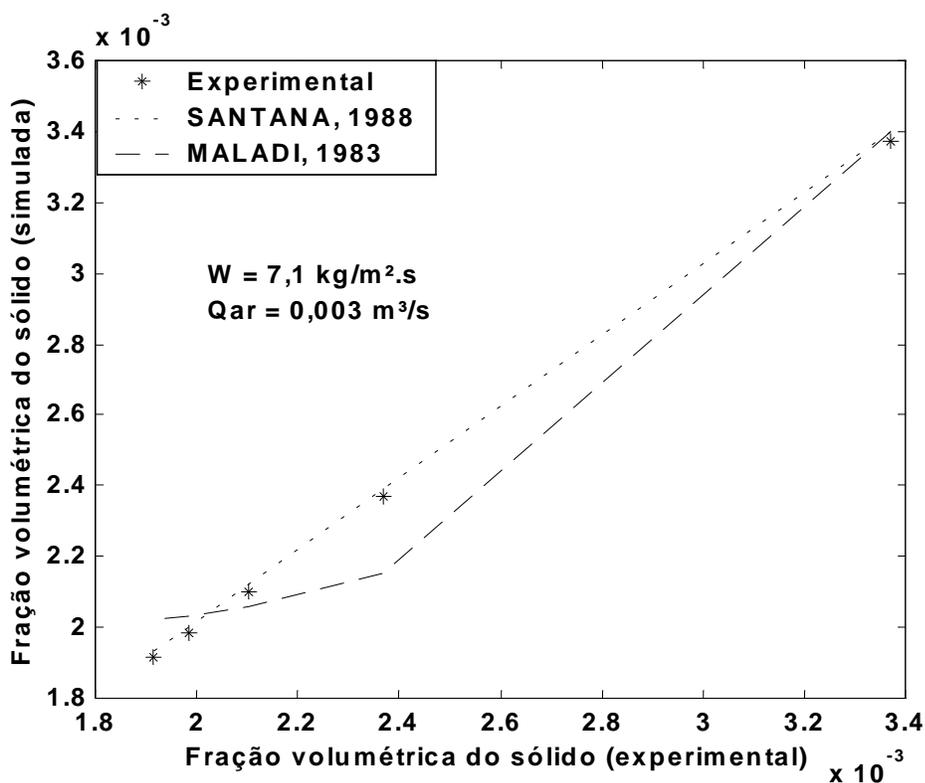


Figura 43 – Fração volumétrica do sólido experimental e simulada pelos modelos adotados

### Velocidade do sólido

A Figura 44 mostra a velocidade do sólido em função das posições axiais relativas do *riser* de dados experimentais obtidos no MEF e valores simulados pelos modelos de Santana, Rocha e Kachan (1988) e Maladi e Otero (1983).

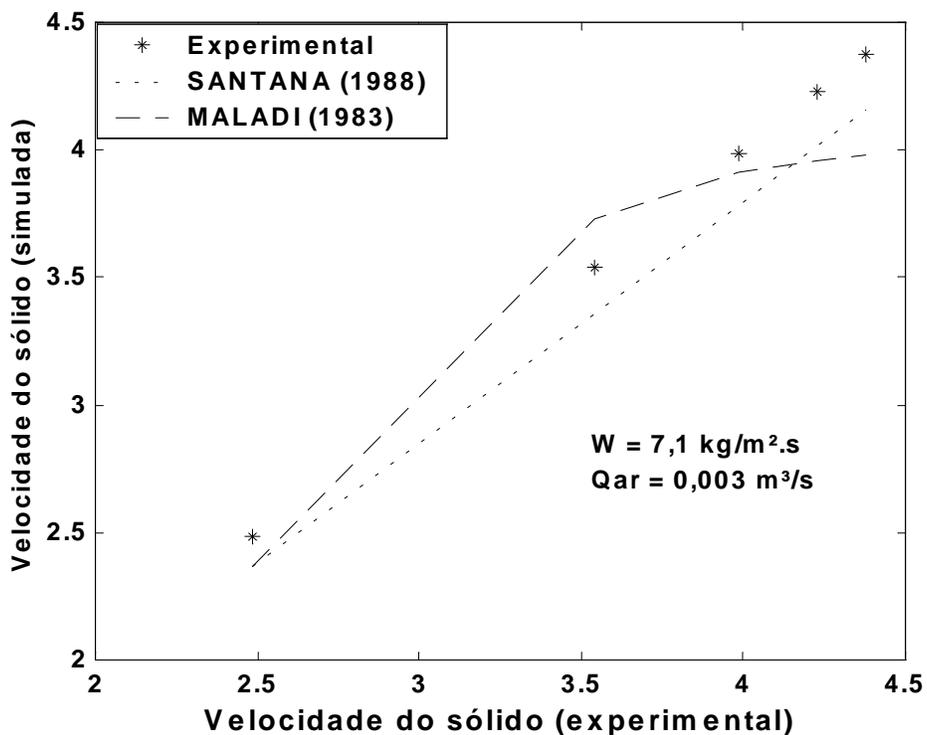


Figura 44 – Velocidade do sólido experimental e simulada pelos modelos adotados

### Razão de Escorregamento

A Figura 45 mostra a razão de escorregamento em função das posições axiais relativas do *riser* de dados experimentais obtidos no MEF e valores simulados pelos modelos Santana, Rocha e Kachan (1988) e Maladi e Otero (1983).

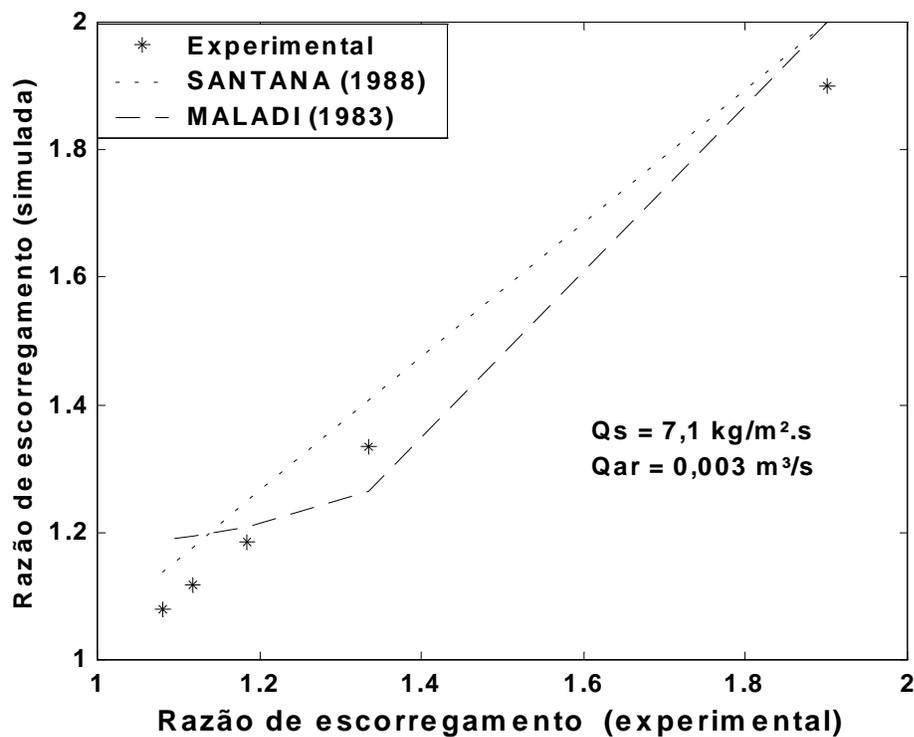


Figura 45 – Razão de escorregamento experimental e simulada pelos modelos adotados

As simulações com o modelo de Santana, Rocha e Kachan (1988) e o ajuste aos dados experimentais obtidos no MEF mostrados nas Figuras de 43 a 45, apresentam erros relativos menores do que 10%. Já os erros correspondentes à simulação com o modelo de e Maladi e Otero (1983)., foram bem maiores na velocidade do sólido e razão de escorregamento de 20 e 38% respectivamente. Os valores calculados do erro relativo para cada altura relativa e a equação utilizada são mostrados no Apêndice C.

### Queda de pressão

A Figura 46 mostra a comparação da queda de pressão no *riser* dos dados experimentais com os valores simulados pelos modelos de Santana, Rocha e Kachan (1988) e Maladi e Otero (1983).

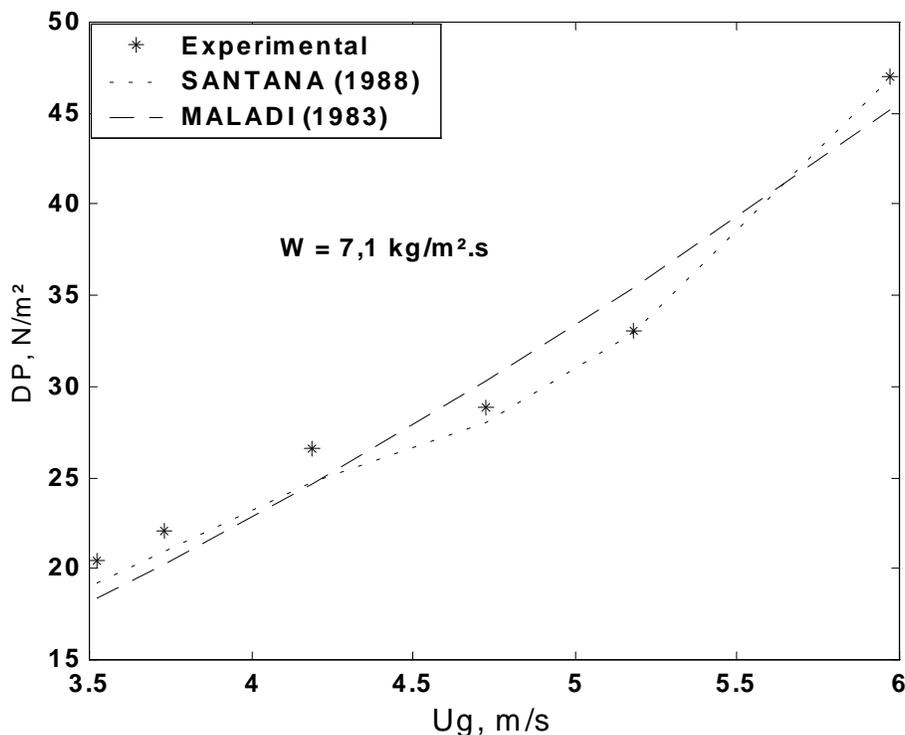


Figura 46 – Queda de pressão em função da velocidade do gás experimental e simulada pelos modelos adotados

Os erros relativos à simulação com os modelos de Santana, Rocha e Kachan (1988) e Maladi e Otero (1983) com os ajustes aos dados experimentais obtidos no MEF apresentados na Figura de 46, foram menores que 7 e 10%, respectivamente.

### 4.3 Modelos fluidodinâmicos validados

#### Fração volumétrica do sólido

A fração volumétrica do sólido foi obtida experimentalmente utilizando o método de atenuação gama descrito no Capítulo 3. As Figuras 47 e 48 mostram a comparação dos dados obtidos experimentalmente no MEF com os simulados pelos modelos Santana, Rocha e Kachan (1988) e Maladi e Otero (1983). Nos gráficos são apresentadas as condições de medidas experimentais, nas quais foram fixadas a vazão volumétrica do ar e o fluxo de sólidos. A Tabela

12 mostra a análise da correlação e os erros das Figuras 47 e 48. Onde as Equações do coeficiente de correlação, erro padrão e erro relativo são dadas no apêndice D.

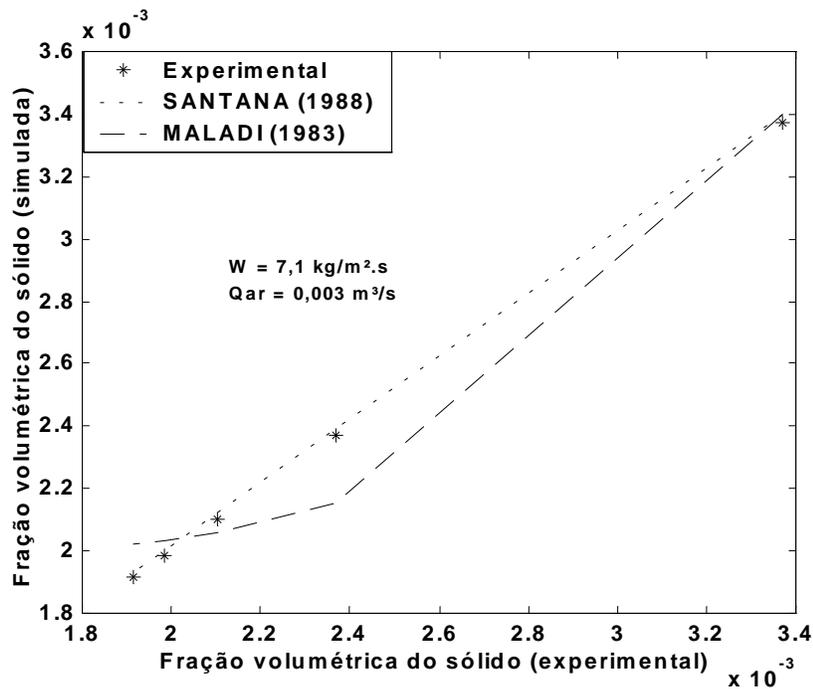


Figura 47 – Comparação dos valores experimentais e simulados da fração volumétrica do sólido

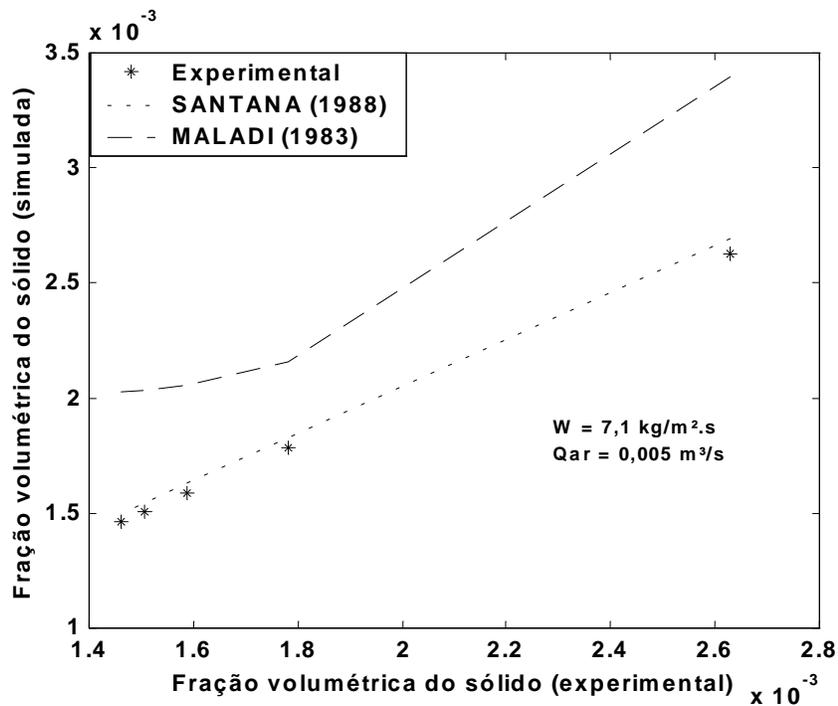


Figura 48 – Comparação dos valores experimentais e simulados da fração volumétrica do sólido

### Velocidade do sólido

A Figura 44 mostra a velocidade do sólido em função das posições axiais relativas do *riser* de dados experimentais obtidos no MEF e valores simulados pelos modelos de Santana, Rocha e Kachan (1988) e Maladi e Otero (1983).

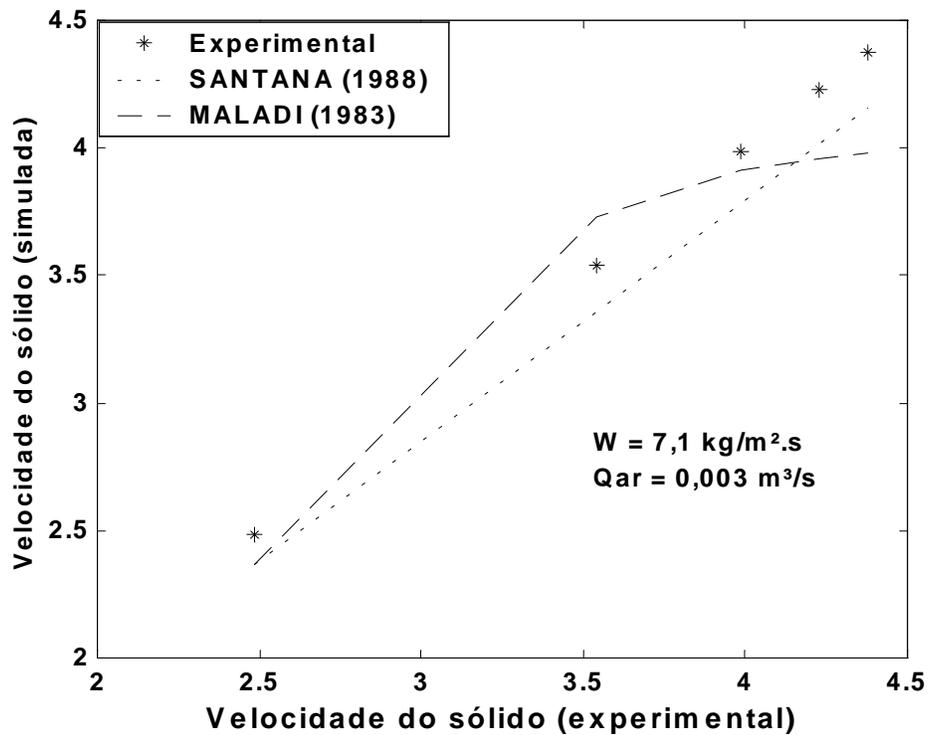


Figura 44 – Velocidade do sólido experimental e simulada pelos modelos adotados

### Razão de Escorregamento

A Figura 45 mostra a razão de escorregamento em função das posições axiais relativas do *riser* de dados experimentais obtidos no MEF e valores simulados pelos modelos Santana, Rocha e Kachan (1988) e Maladi e Otero (1983).

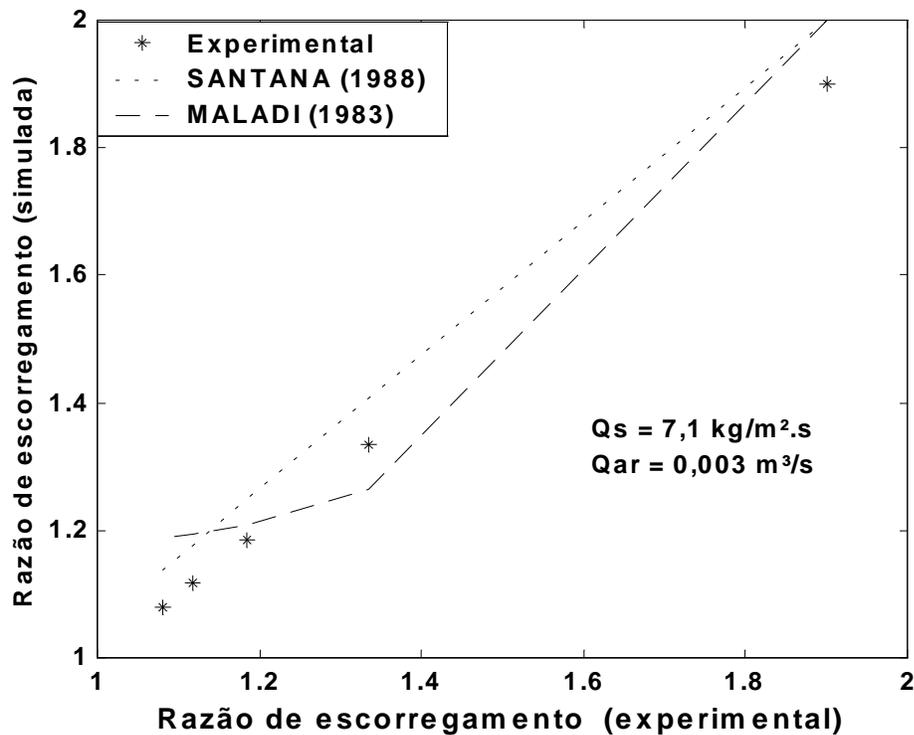


Figura 45 – Razão de escorregamento experimental e simulada pelos modelos adotados

As simulações com o modelo de Santana, Rocha e Kachan (1988) e o ajuste aos dados experimentais obtidos no MEF mostrados nas Figuras de 43 a 45, apresentam erros relativos menores do que 10%. Já os erros correspondentes à simulação com o modelo de e Maladi e Otero (1983)., foram bem maiores na velocidade do sólido e razão de escorregamento de 20 e 38% respectivamente. Os valores calculados do erro relativo para cada altura relativa e a equação utilizada são mostrados no Apêndice C.

### Queda de pressão

A Figura 46 mostra a comparação da queda de pressão no *riser* dos dados experimentais com os valores simulados pelos modelos de Santana, Rocha e Kachan (1988) e Maladi e Otero (1983).

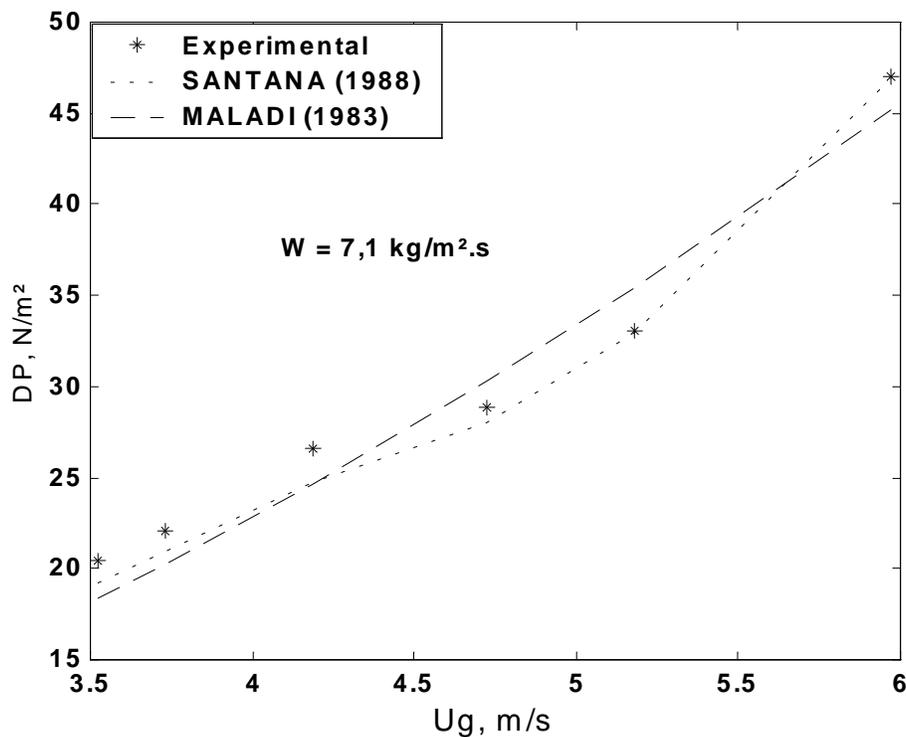


Figura 46 – Queda de pressão em função da velocidade do gás experimental e simulada pelos modelos adotados

Os erros relativos à simulação com os modelos de Santana, Rocha e Kachan (1988) e Maladi e Otero (1983) com os ajustes aos dados experimentais obtidos no MEF apresentados na Figura de 46, foram menores que 7 e 10%, respectivamente.

### 4.3 Modelos fluidodinâmicos validados

#### Fração volumétrica do sólido

A fração volumétrica do sólido foi obtida experimentalmente utilizando o método de atenuação gama descrito no Capítulo 3. As Figuras 47 e 48 mostram a comparação dos dados obtidos experimentalmente no MEF com os simulados pelos modelos Santana, Rocha e Kachan (1988) e Maladi e Otero (1983). Nos gráficos são apresentadas as condições de medidas experimentais, nas quais foram fixadas a vazão volumétrica do ar e o fluxo de sólidos. A Tabela

12 mostra a análise da correlação e os erros das Figuras 47 e 48. Onde as Equações do coeficiente de correlação, erro padrão e erro relativo são dadas no apêndice D.

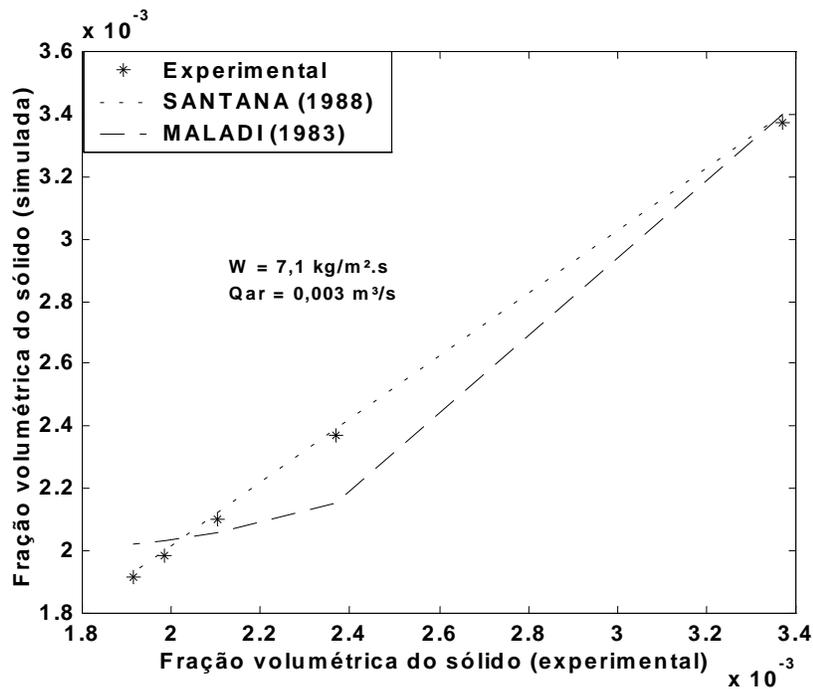


Figura 47 – Comparação dos valores experimentais e simulados da fração volumétrica do sólido

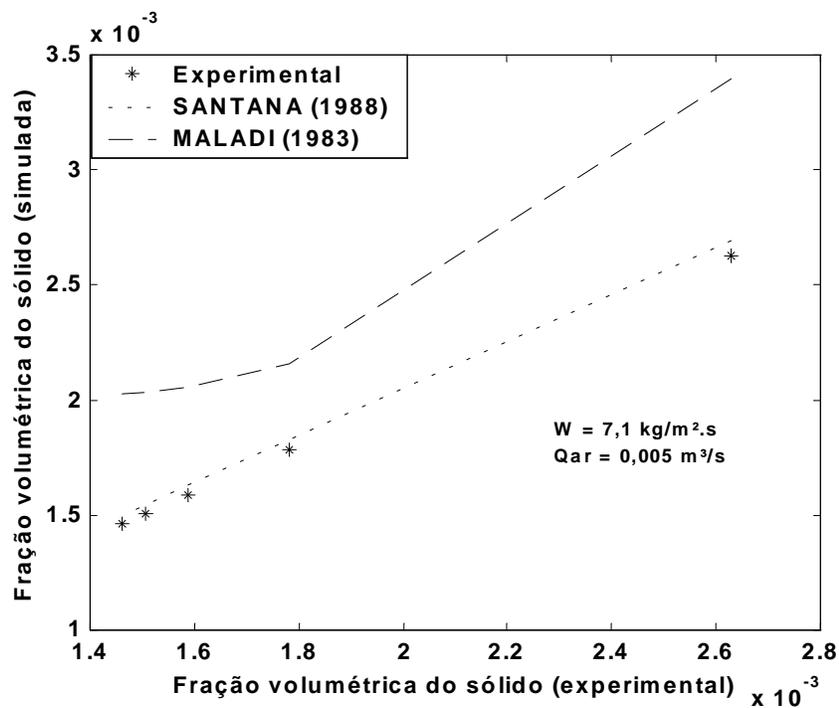


Figura 48 – Comparação dos valores experimentais e simulados da fração volumétrica do sólido

Tabela 12 – Análise dos resultados experimentais e simulados da fração volumétrica do sólido

	<b>Santana, Rocha e Kachan (1988)</b>		<b>Maladi e Otero (1983).</b>	
	W = 7,1 kg/m <sup>2</sup> .s Qar = 0,003 m <sup>3</sup> /s	W = 7,1 kg/m <sup>2</sup> .s Qar = 0,005 m <sup>3</sup> /s	W = 7,1 kg/m <sup>2</sup> .s Qar = 0,003 m <sup>3</sup> /s	W = 7,1 kg/m <sup>2</sup> .s Qar = 0,005 m <sup>3</sup> /s
Coeficiente Correlação, R	0,999	0,999	0,957	0,945
Erro padrão, E <sub>p</sub>	7,62. 10 <sup>-8</sup>	2,41. 10 <sup>-7</sup>	7,62. 10 <sup>-8</sup>	1,45. 10 <sup>-5</sup>
Erro relativo Maximo, E <sub>R</sub>	1%	3%	9%	7%

Pelos resultados mostrados nas Figuras 47 e 48 e a análise dos valores da Tabela 12, observa-se que o modelo de é o que melhor representa os valores experimentais da fração volumétrica do sólido.

#### Velocidade do sólido

As Figuras 49 e 50 mostram a comparação dos dados obtidos experimentalmente no MEF com os simulados pelos modelos de Santana, Rocha e Kachan (1988) e Maladi e Otero (1983). A Tabela 13 mostra a análise da correlação e os erros das Figuras 49 e 50.

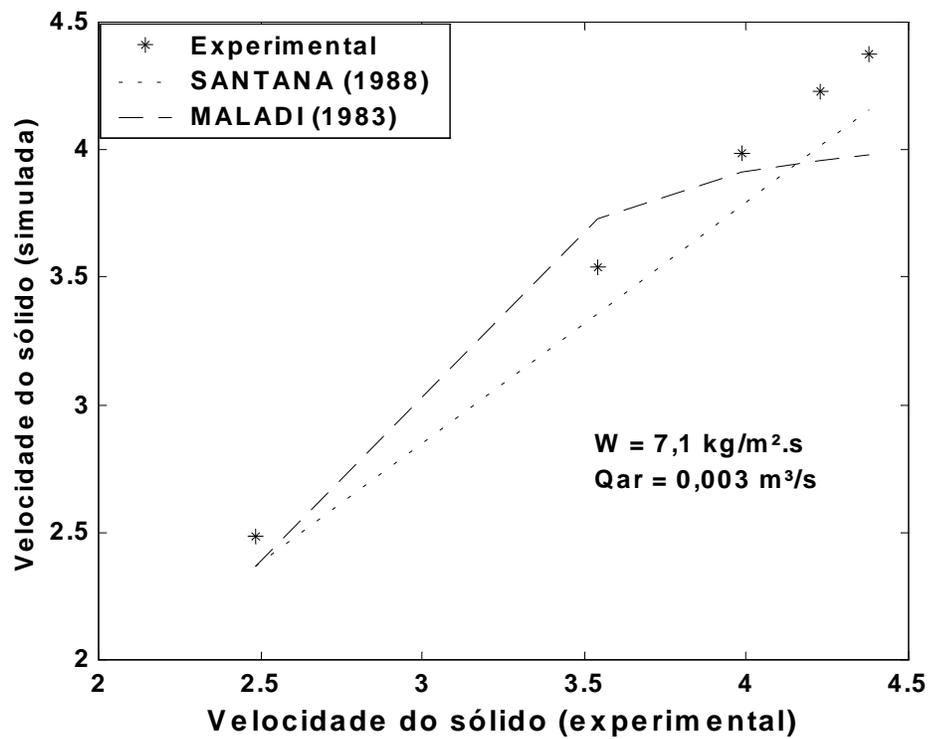


Figura 49 – Comparação dos valores experimentais e simulados da velocidade do sólido

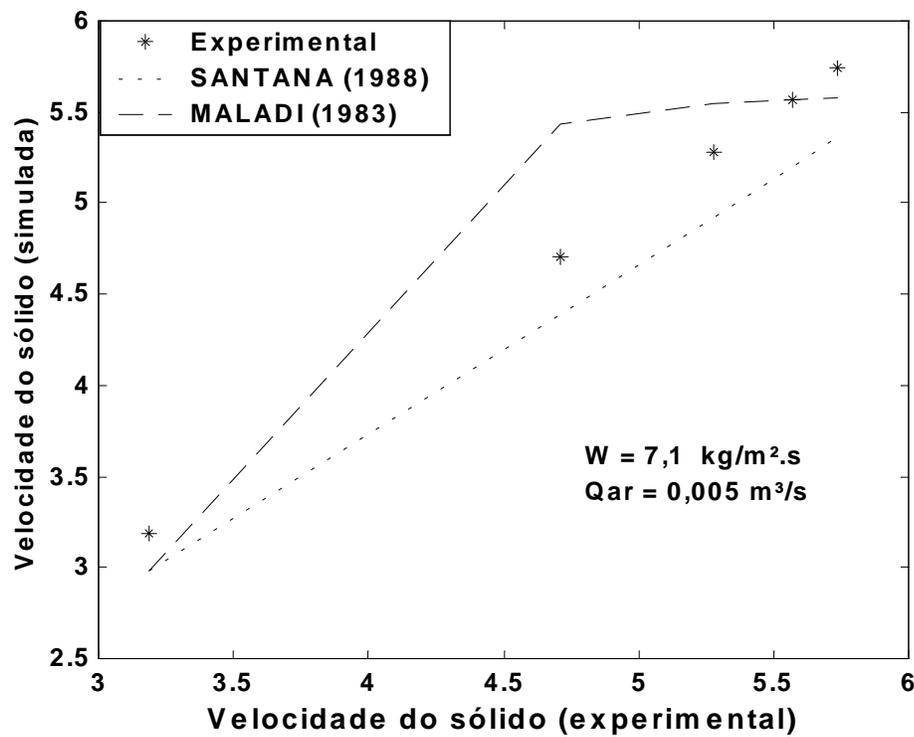


Figura 50 – Comparação dos valores experimentais e simulados da velocidade do sólido

Tabela 13 – Análise dos resultados experimentais e simulados da velocidade do sólido

	<b>Santana, Rocha e Kachan (1988)</b>		<b>Maladi e Otero (1983).</b>	
	W = 7,1 kg/m <sup>2</sup> .s Qar = 0,003 m <sup>3</sup> /s	W = 7,1 kg/m <sup>2</sup> .s Qar = 0,005 m <sup>3</sup> /s	W = 7,1 kg/m <sup>2</sup> .s Qar = 0,003 m <sup>3</sup> /s	W = 7,1 kg/m <sup>2</sup> .s Qar = 0,005 m <sup>3</sup> /s
Coeficiente Correlação, R	0,999	0,999	0,916	0,888
Erro padrão, E <sub>p</sub>	9,06. 10 <sup>-4</sup>	0,005	0,231	0,005
Erro relativo Maximo, E <sub>R</sub>	5%	7%	9%	7%

Pelos resultados mostrados nas Figuras 49 e 50 e a análise dos valores da Tabela 13, observa-se novamente que o modelo de Santana, Rocha e Kachan (1988) é o que melhor representa os valores experimentais da velocidade do sólido.

#### Razão de Escorregamento

As Figuras 51 e 52 mostram a comparação dos modelos obtidos experimentalmente no MEF com os simulados pelos modelos de Santana, Rocha e Kachan (1988) e Maladi e Otero (1983). A Tabela 14 mostra a análise da correlação e os erros das Figuras 51 e 52.

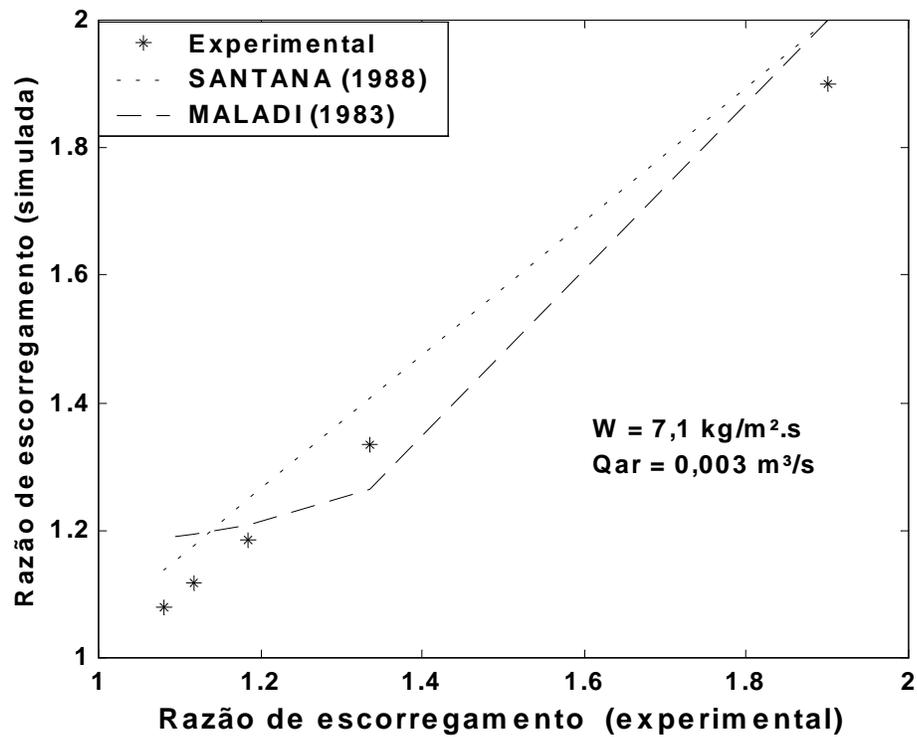


Figura 51 – Comparação dos valores experimentais e simulados da razão de escorregamento

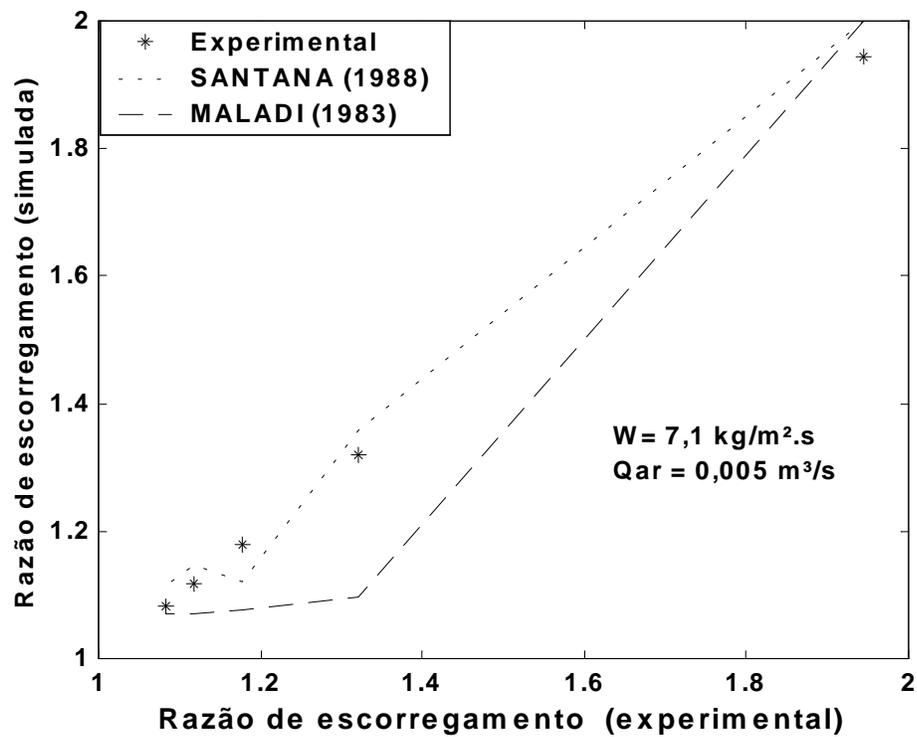


Figura 52 – Comparação dos valores experimentais e simulados da razão de escorregamento

Tabela 14 – Análise dos resultados experimentais e simulados da razão de escorregamento

	<b>Santana, Rocha e Kachan (1988)</b>		<b>Maladi e Otero (1983).</b>	
	W = 7,1 kg/m <sup>2</sup> .s Qar = 0,003 m <sup>3</sup> /s	W = 7,1 kg/m <sup>2</sup> .s Qar = 0,005 m <sup>3</sup> /s	W = 7,1 kg/m <sup>2</sup> .s Qar = 0,003 m <sup>3</sup> /s	W = 7,1 kg/m <sup>2</sup> .s Qar = 0,005 m <sup>3</sup> /s
Coefficiente Correlação, R	0,999	0,947	0,957	0,947
Erro padrão, E <sub>p</sub>	3,79. 10 <sup>-4</sup>	0,109	0,084	0,109
Erro relativo Maximo, E <sub>R</sub>	10%	3%	10%	3%

Pelos resultados mostrados nas Figuras 51 e 52 e a análise dos valores da Tabela 14, observa-se que no fluxo de sólido de 7,1 kg/m<sup>2</sup>.s e Qar = 0,003 m<sup>3</sup>/s o modelo de Santana, Rocha e Kachan (1988) é o que melhor representa os valores experimentais da razão de escorregamento entre os componentes devido ao coeficiente de correlação ser melhor e o erro padrão ser bem menor, já no fluxo de sólido de 7,1 kg/m<sup>2</sup>.s e Qar = 0,005 m<sup>3</sup>/s tanto o modelo de Santana, Rocha e Kachan (1988) como o de Maladi e Otero (1983) representam os valores experimentais com coeficiente de correlação, erros padrões e relativos iguais.

#### Queda de pressão no riser

Uma importante hipótese dos modelos estudados é que todos desprezam a queda de pressão no riser devido ao atrito do sólido com as paredes do mesmo. Assim acrescentou-se ao modelo adotado essa contribuição para observar se essa hipótese é válida.

A queda de pressão devido a atrito do sólido é dada pela Equação 28 da revisão bibliográfica e as correlações do fator de atrito do sólido encontrados na literatura são dados pelas Equações 29, 30 e 31.

As Figuras 53 e 54 mostram a comparação dos dados experimentais com os valores simulados pelo modelo de Santana, Rocha e Kachan (1988) e Maladi e Otero (1983),

respectivamente. Sem atrito de sólido e com atrito de sólido para três fatores de atritos da literatura, de Hariu e Molstad (1949), Yang (1978) e Marcus et al (1990).

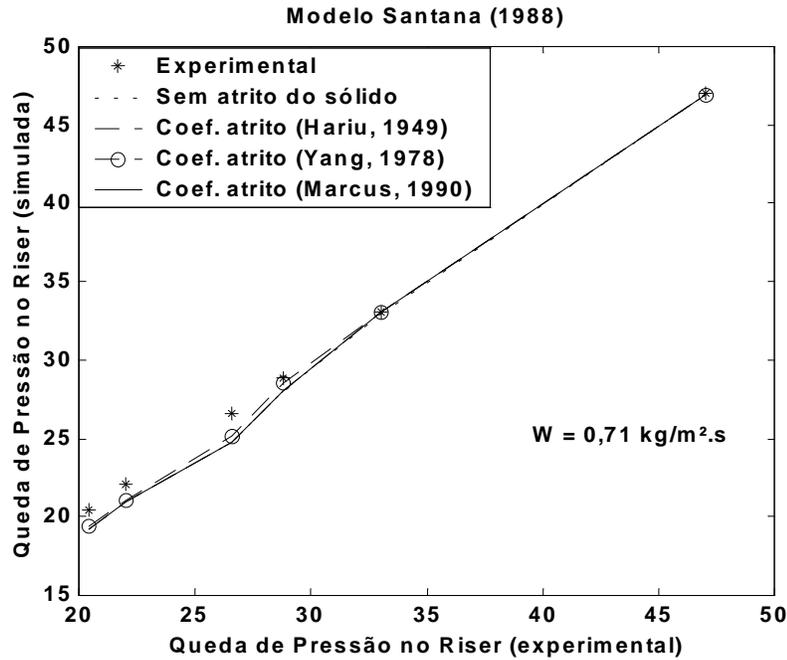


Figura 53 – Comparação dos valores experimentais e simulados da queda de pressão no *riser*, modelo Santana, Rocha e Kachan (1988)

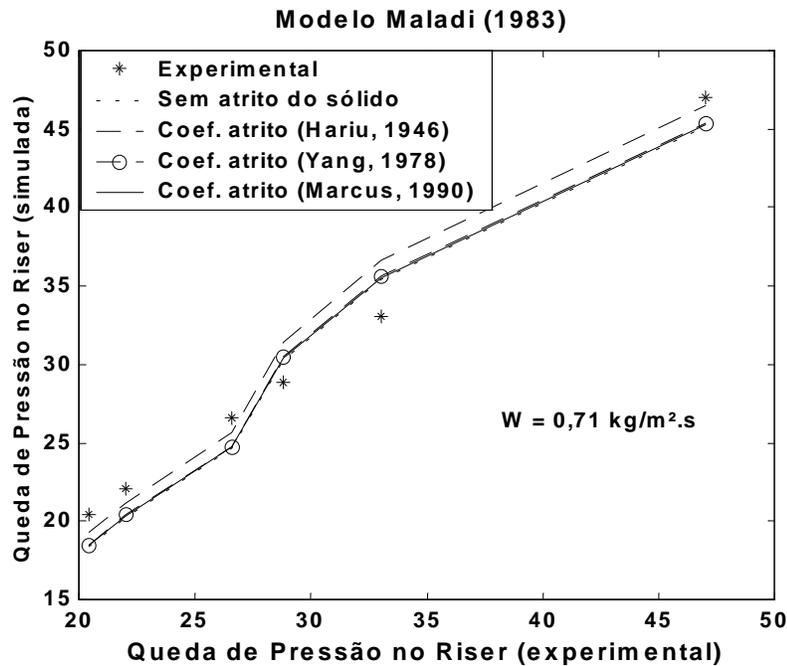


Figura 54 – Comparação dos valores experimentais e simulados da queda de pressão no *riser*, modelo Maladi e Otero (1983)

Tabela 15 – Análise dos resultados experimentais e simulados da queda de pressão modelo Santana, Rocha e Kachan (1988)

	Sem atrito	Coef. de atrito Hariu e Molstad (1949)	Coef. de atrito Yang (1978)	Coef. de atrito Marcus et al (1990)
Coeficiente Correlação, R	0,9977	0,9978	0,9982	0,9977
Erro padrão, $E_p$	0,53	0,52	0,46	0,53
Erro relativo Maximo, $E_R$	6,87%	6,72%	5,38%	6,87%

Tabela 16 – Análise dos resultados experimentais e simulados da queda de pressão modelo Maladi e Otero (1983)

	Sem atrito	Coef. de atrito Hariu e Molstad (1949)	Coef. de atrito Yang (1978)	Coef. de atrito Marcus et al (1990)
Coeficiente Correlação, R	0,9614	0,9610	0,9614	0,9614
Erro padrão, $E_p$	2,22	2,28	2,23	2,22
Erro relativo Maximo, $E_R$	9,93%	10,95%	9,37%	9,56%

Pelos resultados mostrados nas Figuras 53 e 54 e na análise dos valores das Tabelas 15 e 16, observa-se que os coeficientes de correlações, os erros padrões e os erros relativos da pressão com e sem atrito são muito próximos. Isso se deve por que o atrito do sólido com as paredes do *riser* é pequeno quando comparado a uma FCC, pois o catalisador é um pó muito fino e quando entra em contato com as paredes do *riser*, no qual é de vidro, ou seja, possui uma rugosidade relativa muito baixa quando comparada ao *riser* de uma FCC, que é constituído de concreto refratário e aço, além das incrustações adquiridas no próprio processo que aumentam a rugosidade relativa apreciavelmente, além de diminuir o diâmetro efetivo.

A rugosidade relativa do *riser* do MEF é da ordem de  $10^{-6}$ , enquanto para FCC é em torno de  $10^{-3}$  (MOODY, 1944), confirmando que a contribuição devido ao atrito do sólido no *riser* do MEF é muito pequena, pois no escoamento turbulento o fator de atrito é função do número de Reynolds e da rugosidade relativa, ele cai gradualmente ao longo da curva para tubo liso, o mesmo não ocorre para tubos com  $e/D \geq 0,001$ , no caso da FCC.

A Figura 40 e a Tabela 15 mostram que o modelo de Santana, Rocha e Kachan (1988) com o coeficiente de atrito de Yang (1978) foi o que melhor representou a queda de pressão no *riser* do MEF, logo o mesmo deve ser o escolhido, pois, como vimos que a contribuição devido ao atrito do sólido é importante para uma FCC.

A comparação dos modelos fluidodinâmicos adotados com os dados experimentais obtidos no MEF mostrou que o modelo de Santana, Rocha e Kachan (1988) mais a contribuição na queda de pressão devido ao atrito do sólido, através do fator de atrito de sólido dado por Yang (1978), foi o que melhor modelo que representou os parâmetros fluidodinâmicos no *riser* do MEF, sendo considerado válido para as faixas de velocidade do gás e fluxo de sólidos de 3 a 6 m/s e 7,1 kg/m<sup>2</sup>.s, respectivamente. Onde essas faixas estão dentro dos critérios de semelhança fluidodinâmica estabelecida na Tabela 2 com auxílio da Tabela 1.

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Para validação do modelo fluidodinâmico no *riser* do modelo a frio, a necessidade de adequar as condições de operação, foi certamente, aquela que exigiu maior esforço no trabalho. Deve ser considerado que o modelo a frio, ou seja, o ciclo do catalisador, funcionou adequadamente de acordo com o projeto elaborado. Exceção, o injetor de sólidos, que está em desenvolvimento na literatura consultada, apresentou uma série de problemas. Inicialmente, apresentou problemas de corrosão por abrasão com pouco tempo de operação. Em seguida, devido à pulsação introduzida no fluxo de sólidos e à necessidade de se obter uma faixa mais concentrada de catalisador ao longo do *riser*, foi projetado e instalado um novo injetor com uma variante da coluna de retorno. A necessidade de obter as condições de operação do modelo experimental a frio, MEF, em regime estacionário, requereu desenvolvimento específico nos sistemas associados: Sistema de Produção e Monitoração de Ar Comprimido, Sistema de Controle Computacional e Sistema de Medidas por Meio da Atenuação Gama.

A seleção de modelos matemáticos foi definida em função das equações básicas que descrevem a fluidodinâmica de um sistema gás-sólido e de utilizar um modelo unidimensional, inicialmente. Com esta restrição a procura bibliográfica passou então a considerar a concepção e as dimensões dos modelos experimentais descritos com a finalidade de fazer as simulações. Neste processo de seleção a questão da validação do modelo fluidodinâmico surgiu recursivamente à medida que se exigia melhor compreensão da simulação do *riser*. Então, foi preciso procurar uma definição da validação, para utilizar como critério de seleção dos modelos fluidodinâmicos.

Ao fazer simulação do *riser* e comparar com dados (experimentais) da literatura, qual o erro aceitável e em que condições? Ao analisar a fluidodinâmica em função de comportamento teoricamente previsto, surgem dúvidas quanto à adequação das equações do modelo e também quanto à solução numérica implementada em algoritmos computacionais. Paralelamente a bibliografia é freqüentemente indefinida quanto ao conceito e as conclusões apresentadas nos trabalhos de validação de modelos. Foi necessário estudar a questão, selecionar uma metodologia que inclui desde a concepção dos modelos experimental e fluidodinâmico até a comparação entre os resultados segundo um critério para aceitar ou rejeitar a validação. Esta metodologia foi

implementada e os trabalhos foram orientados segundo as etapas previstas na validação de modelos fluidodinâmicos.

As medidas da concentração do catalisador foram o ponto de referencia da calibração das variáveis fluidodinâmicas, uma vez que depende do escoamento do leito fluidizado. Obter um arranjo fonte/ *riser*/detector que otimizasse a eficiência de detecção em função da qualidade do espectro, é uma questão da geometria de irradiação e da atenuação da intensidade do feixe gama. A concentração do catalisador induzida pela injeção de sólidos causa a atenuação e a pulsação do fluxo acrescenta incerteza nas medidas. A análise da fluidodinâmica, com os dados da distribuição de concentração do catalisador, requer precisão das medidas da velocidade dos componentes e da queda de pressão no *riser*. Não foi encontrado outro medidor de vazão de ar, com precisão para calibrar o medidor (condutividade térmica), instalado MEF. Então medidas em experimentos separados foram comparadas com valores calculados por meio da variação de pressão, até que foi obtida uma boa concordância com as especificações do instrumento. Ainda ocorreram, causadas pela umidade na linha de ar comprimido, perturbações no medidor de vazão e no controle de pressão associado. Motivo da instalação de coluna desumidificadora e válvulas para retirada da água, inclusive para operação do medidor de umidade. O Sistema de Controle Computacional sendo sensível às perturbações requer contínuos ajustes dos sinais e parametrização das variáveis medidas e controladas. Este sistema de automação foi decisivo para se medir a distribuição axial da concentração do catalisador com registro simultâneo do comportamento das variáveis fluidodinâmicas.

Os testes com os modelos fluidodinâmicos selecionados, comparando-se as medidas experimentais e os valores simulados, levou a validação do modelo adotado, nas condições estudadas com um critério definido. Com base nesta metodologia de validação, a análise da fluidodinâmica do MEF permite fazer inferências sobre a necessidade de adotar modelos mais completos, como por exemplo, a inclusão de um termo referente ao atrito de sólidos. Ficou implícito que um modelo unidimensional descreve a fluidodinâmica do *riser* do MEF, nas condições estudadas, satisfatoriamente.

Uma descrição mais detalhada da fluidodinâmica do MEF, certamente será obtida com o estudo de um modelo bidimensional, num futuro trabalho. Então, será necessário o desenvolvimento de técnicas de medidas da distribuição radial da concentração do catalisador no

*riser*. Nesta linha de pesquisa, se espera poder aplicar a metodologia de validação aqui definida a outras faixas de operação e a modelos fluidodinâmicos mais complexos.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ABADIE, E. Processos de Refinação, Petrobrás, Rio de Janeiro, 1999.

AGUIRRE, A.L. Introdução à Identificação de Sistemas Técnicas Lineares e Não-Lineares Reais. Editora Guanabara, 2000.

ALI, H; ROHANI, S; CORRIOU, J. P. Modeling and control of a riser type fluid catalytic cracking (FCC) unit. Transactions of the Institution of Chemical Engineers Part A, v.75, p.401, 1997.

ARASTOPOUR, H; GIDASPOW, D. Vertical pneumatic using four hydrodynamic models. . *Ind. & Eng. Chem.* v.18, p.123-130, 1979.

AVIDAN, A, Fluid Catalytic Cracking. *Science and technology*, Elsevier: Amsterdam, v.1 ,n. 76 ,1993.

AZZI. M; TURLIER.P; BERNARD.J.R. Mapping solid concentration in a circulating fluid bed using gammametry. *Powder Technology.* v.67, p.23-26, 1991.

BARTHOLOMEW, R.N.; CASAGRANDE, R.M. - Measuring Solids Concentration in Fluidized Systems by Gamma-Ray Absorption. *Ind. & Eng. Chem.* v.49, p.428-431, 1957.

BOONE, J.M; CHAVEZ,A. E. Medical Physics. V.23, n.12, p. 1997-2005, 1996.

CAMBERRA. Instruments Catalog. Ninth edition, Camberra Industries, Inc., Cap. 1, p.33-36, 2000.

(CENPES).Centro de Pesquisas da Petrobrás . Relatório técnico.

DUDUKOVIC, M.P. Opaque multiphase reactors experimentation, modeling and troubles hooting. Oil & gas Science and Technology – Rev. IFP. v.55, n.2, p.135-158, 2000.

ECKERT, E.R.G; DRAKE, R.M; Analysis of heat and mass transfer, Mc Graw-Hill, New York, 1972.

EVANS, R.D. The Atomic Nucleus. New York, McGraw-Hill, Inc. Cap. 25, p.711-736, 1955.

FAKEEHA, A. H.; SOLIMAN, M. A.; IBRAHIM, A.A.; Modeling of circulating fluidized bed for ammoxidation of propane to acrylonitrile. *Chemical Engineering and Processing*. v. 39, p. 161-170, 2000.

FEI, W. *et al.*. A Dispersion Model for Fluid Catalytic Cracking Riser and Downer reactors. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Washington, v. 36, n. 12, p.5049–5053, Dec. 1997.

FOX, R.W; McDONALD. A. T. Introdução à Mecânica dos Fluidos. Ed Livros Técnicos e Científicos, 1992.

GAUTHIER, T.; BAYLE, J.; LEROY, P. FCC: Fluidization Phenomena and Technologies. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, v. 55, n. 2, p. 187-207, 2000.

GOLDSTEIN, H.; WILKINS, JR. J, E. United States Atomic Energy Commission, New York, 1954.

GRACE, J.R; TAGHIPOUR, F. Verification and validation of CFD models and dynamic similarity for fluidized beds. *Powder Technology*. v.139, p.99-110, 2004.

HARIU, O. H. and MOLSTAD, M. Pressure drop in vertical tubes in transport of solids by gases. *Ind. & Eng. Chem*. v. 41, n. 6, p.1148-60, 1949.

HIMMELBLAU, D. M. Process Analysis by Statistical Methods. Ed McGraw-Hill, 1970.

HOLMAN, J.P.*Experimental methods for engenieers*. New York: McGraw-Hill, 1994.

HUBBEL,J.H; SELTZER,S.M.Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy- Absorption Coefficients 1 keV to 20 keV for Elements Z=1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest. NISTIR 5632, 1995. (also <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/cover.html>).

ISSANGYA.S.A; GRACE.J.R; BALD. ZHU.J. Further measurements of flow dynamics in a high-density circulating fluidized bed riser. *Powder Technology*. v.111, p.104-113, 2000.

JAGADA, H. S ; BOWNE, J; JORDAN, P. Verification and validation issues in manufacturing models. *Computers in Industry*. v.25, p. 331- 353,1995.

KNOLL, Glenn F. *Radiation detection and measurement*. New york. J. Wiley, 1989.

KNOWLTON, M.T.,Tools and techniques for diagnosing and solving operating problems in fluidized bed systems. *Oil & Gas Science and Technology*, v.55, p.209-217, 2000.

KUNNI, D.; LEVENSPIEL, O. *Fluidization Engineering* 2.ed.Boston:Butterwort-Heinemann, 1991.

LECH, M. Mass flow rate measurement in vertical pneumatic conveying of solid. *Powder Technology*. v.114, p.55-58, 2001.

LEUNG, L.S., e WILES, R.J., Contributions in the fall of total pressure drop in vertical tubes in transport of solids by gases *Ind. Eng. Chem., Proc. Des. Dev.*, v. 15, n.4,1976.

LI.Y; CHEN.B; WANG. Y; AND GUO.M.; *International Chemical Engineering*, v.21, n. 4, p.670,1981.

LOURENÇO, H.R.S, DANTAS.C.C, SANTOS, V.A. Perfil de densidade de catalisador em modelo experimental de riser de FCC utilizando a técnica de atenuação gama. *1º Congresso de P&D e 3º Reunião de Avaliação do PRH/ANP em Petróleo e Gás da UFPE*, 2003.

MALADI, M. P. H.; OTERO-SCHIPPER, F. J. An Analysis of gas solid transport in small and large diameter riser reactor. *Mobil Research & Develop. corp.*, Research department, march 2, 1983.

MARCUS, R. D; LEUNG, L.S; KLINZING, G.E. E RIZK, F. *Pneumatic Conveying of Solids. 1 ed. Great Britian, Edmundsbury Press*, p. 546,1990.

MARIANO, B. J. Impactos Ambientais do Refino de Petróleo. Dissertação de Mestrado, UFRJ – Rio de Janeiro, 2001.

MARTIN, M. P. *et. al.* Catalytic Cracking in Riser Reactors: Core-Annulus and Elbow Effects. *Chemical Engineering Science*, Pergamon, v. 47, n. 9-11, p.2319-2324, June-July 1992.

MENDES.S.E; SANTANA,C.C. Contato gás-sólidos em leito fluidizado recirculante: Um modelo matemático para o movimento vertical com aceleração. *IX ENENP*. 75-83. Rio de Janeiro, 1983.

MOODY.L; Friction factors for pipe flow, transactions of the ASME. v.66. p.684, 1944.

MOORTEL, T.V; AZARIO.E; SANTINI.R and TADRIST.L; Experimental analysis of the gas-particle flow in a circulating fluidized bed using a phase Doppler particle analyzer. *Chemical Engineering Science*, v.53, n. 1, p.1883-1899, 1998.

NAMKUNG, W., KIM, S. W. and KIM, S. D., Flow regimes and axial pressure profile in circulating fluidized bed. *Powder Technology*. v.72, p.245-252, 1999.

PINTO, C. J; LAGE, P. L. G. Métodos Numéricos em Problemas de Engenharia Química. Editora e-papers, COPPE/UFRJ, 2001.

PERLINGEIRO, C.A.G. Notas de aula de engenharia de processos. UFJB, Rio de Janeiro, 2000.

PERRY, ROBERT H.; CHILTON, Cecil H. (Editores). *Manual de Engenharia Química*, Quinta edição, Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1986.

RACZEK, J; PALICA, M. Selection of the gas working velocity in vertical pneumatic conveying systems for binary mixtures. *Powder Technology*. v.36, p. 167-170, 1997.

REPPENHAGEN, J.; SHETZSCHEN, A.; WERTHER, J. Find the optimum cyclone size with respect to the fines in pneumatic conveying systems. *Powder Technology*. v.112, p. 251-255, 2000.

ROLIM, T.L. et al., 1995, Numerical Simulation of the Vertical Flow in a Gas-Solid System Basead on Nuclear Techniques, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, v. 198, n.1, p. 69-76.

SANTANA, C.C; ROCHA, S.C.S e KACHAN, G.C. Modelagem dinâmica do escoamento gás-sólido aplicada à secagem pneumática. *Anais do 8º Congresso Brasileiro de Engenharia Química*. p. 371-377. São Paulo, 1988.

SHAPIRO.A.H; Shape and flow, the fluid dynamics of drag. New York: Anchos, 1961.

SILVA, E. M. E; MAZUCHELI, J; FERREIRA, M. C e FREIRE, J.T. Coeficiente de Atrito Partícula-Parede em Sistemas de Transporte Pneumático Vertical. *Anais do XXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados* v. 1, p.147-151. Uberlândia MG, 1996.

STEMERDING, S., The pneumatic transport of cracking catalyst in vertical risers. *Chemical Engineering Science*. v.17, p. 599-608, 1962 .

STREMEL, D. P; DECHECHI, E.C; OLIVEIRA,S.C; SUAZf, C.A.T; MACIEL FILHO, R. Análise Da Sensibilidade Paramétrica Do Processo De Fermentação Etanólica Em Biorreator Tipo Torre Com Células Imobilizadas. *Anais do 11º Congresso Brasileiro de Engenharia Química*. São Paulo, 1996.

STRUMILLO,C. KUDRA,T. Drying: Principles, Applications and Design. Gordon and Breach Science Publishers, 1986.

THOBER, C. W. A e SANTANA, C.C. Perfil Radial de Concentração de Sólidos em Leito Fluidizado Circulante. *Anais do XXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados* v.2, p.393-398. Uberlândia MG, 1996.

VAN K.E; WIRTH. M; MOLERUS. O. Feststoffkonzentration und – geschwindigkeiten in wandnahen bereichen zirkulierender wirbelschichten. *VGB kraftwerkstechnik*. v.7, p.925-929, 1991.

WEIMER, A. W.; GYURE, D.C.; CLOUGH. Application of gamma-radiation density gauge for determining hydrodynamic properties of fluidized beds. *Powder Technology*. v.44, p. 179-144, 1985.

WOCZIKOSKY,L.V.G. Construção de um modelo de reator de craqueamento catalítico a frio para visualização fluido-dinâmica (“Riser” e “Downer”) *II Encontro dos Programas de Recursos Humanos em Petróleo e Gás Natural no Paraná*. (2002).

YANG, W. C. A Unified Theory on Dilute-Phase Pneumatic Transport. *Int. Powder and Bulk Solids Handling*, Chicago, May . p.11-13,1978.

ZLOKARNIK, M; Dimensional Analysis and Scale-up in chemical engineering. Ed. Springer – Verlag, Berlin, 1991.

## APÊNDICE A: CALIBRAÇÕES DOS MEDIDORES DE VAZÃO DOS COMPONENTES E RESULTADOS PRELIMINARES

Tabela 1A – Calibração da vazão mássica de sólidos no transportador helicoidal

Set point	Rotação do Motor (RPM)	Rotação do Motor (RPM) com redução de 64	Vazão mássica de catalisador (g/min)	Vazão mássica de catalisador $10^{-4}$ (kg/s)
100	115	1,8	6,8	9,5
200	230	3,6	12,0	19
300	345	5,4	18,0	29
400	460	7,2	23,0	38
500	575	9,0	28,0	48
600	690	10,8	34,0	57
700	805	12,6	39,0	67
800	920	14,4	46,0	76
900	1035	16,1	51,0	85
1000	1150	18,0	54,0	95

Tabela 2A – Variação da vazão volumétrica do ar em função do percentual de vazão de 0 a 100% da vazão de 500 L/mim

Percentual de vazão (%)	Qar (L/min)	Set point	Qar (L/min)
0	15	55	276
5	40	60	300
10	62	65	314
15	85	70	315
20	110	75	316
25	140	80	318
30	155	85	319
35	180	90	319
40	202	95	319
45	228	100	319
50	250		

Tabela 3 A – Fração volumétrica do sólido em função das variações da vazão mássica do sólido e vazão volumétrica do ar, na posição de 1,050 m da base do *riser*

Vazão mássica do sólido, $10^{-4}$ kg/s	Vazão volumétrica do ar , $10^{-5}$ m <sup>3</sup> /s					
	258	300	337	380	417	500
38	$22.10^{-4}$	$21.10^{-4}$	$21.10^{-4}$	$21.10^{-4}$	$20.10^{-4}$	$20.10^{-4}$
43	$22.10^{-4}$	$22.10^{-4}$	$22.10^{-4}$	$22.10^{-4}$	$21.10^{-4}$	$21.10^{-4}$
48	$25.10^{-4}$	$22.10^{-4}$	$22.10^{-4}$	$22.10^{-4}$	$22.10^{-4}$	$21.10^{-4}$
52	$27.10^{-4}$	$22.10^{-4}$	$21.10^{-4}$	$17.10^{-4}$	$17.10^{-4}$	$13.10^{-4}$
57	$30.10^{-4}$	$24.10^{-4}$	$22.10^{-4}$	$19.10^{-4}$	$17.10^{-4}$	$15.10^{-4}$
62	$33.10^{-4}$	$26.10^{-4}$	$23.10^{-4}$	$21.10^{-4}$	$19.10^{-4}$	$16.10^{-4}$
67	$35.10^{-4}$	$28.10^{-4}$	$25.10^{-4}$	$22.10^{-4}$	$20.10^{-4}$	$17.10^{-4}$
71	$37.10^{-4}$	$30.10^{-4}$	$27.10^{-4}$	$24.10^{-4}$	$22.10^{-4}$	$18.10^{-4}$
76	$40.10^{-4}$	$32.10^{-4}$	$29.10^{-4}$	$26.10^{-4}$	$23.10^{-4}$	$19.10^{-4}$

Tabela 4 A – Resultados da fração volumétrica do sólido ( $10^{-4}$ ), para o fluxo de sólidos de 7,1 kg/m<sup>2</sup>.s

z/L	Vazão volumétrica do ar , $10^{-5}$ m <sup>3</sup> /s					
	258	300	337	380	417	500
0,2	51	42	38	34	31	26
0,3	38	30	27	24	22	18
0,4	33	27	24	21	19	16
0,5	31	25	23	20	18	15
0,6	30	24	22	19	18	15

## APÊNDICE B: PROGRAMAS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS

### PROGRAMA B1 – SIMULAÇÕES DOS PARÂMETROS FLUIDODINÂMICOS DO *RISER*

*sdriser.m*

clear

% Programa "sdriser" para simulação dinâmica de um riser de um

% Modelo a Frio com perfil axial não uniforme da fase sólida

% O programa auxiliar (rotina) é: friser2

L=input ('Entre com o comprimento do riser, m: ');

D=input ('Entre com o diâmetro médio do riser, m: ');

d= 000075; % Diâmetro médio do catalisador, m

e=0.0000015; % Altura média da rugosidade, m

M=28; % Massa molecular média do gas, kg-mol

R=8312; % Constante dos gases, N.m/(kg-mol.K)

P=104364; % Pressão no riser, N/m<sup>2</sup> (Pa)

T=273+29; % Temperatura no riser; K

g=9.806; % Aceleração gravitacional, m/s<sup>2</sup>

mig=0.0000186; % Viscosidade gás (29 °C); kg/(m.s)

W=input ('Entre com a taxa de circulação de sólidos, kg/(m<sup>2</sup>.s): ');

ves=0.00025; % Vol. espec.(catalisador SD-X), m<sup>3</sup>/kg

a=2134; % Const. da massa espec. do catalisador

b=892; % Const. da massa espec. do catalisador

alfa=0.0075; % coeficiente de absorção mássica do cat., m<sup>2</sup>/kg

alum=33; % Percent. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na compos. do cat.,%

beta=.95858; % constante do fator de correção da porosidade sólida

gama=3.06675; % expoente do fator de correção da porosidade sólida

Rog=M\*P/(R\*T); % massa específica do gás, kg/m<sup>3</sup>

Rosap=input ('Entre com a massa específica aparente do sólido: ');

Q1=input ('Entre com a vazão do gás, Q, (L/h): ');

Q=Q1/3600000;

% Estimativa da velocidade superficial da fase gasosa, m/s

Ug0=Q/(0.7854\*(D^2));

```

% Estimativa do número de Reynolds para a fase gasosa
Re=Ug0*D*Rog/mig;
% Massa específica do esqueleto sólido (catalisador de FCC SDX), kg/m3
Rosk=a+b*(alum/100);
% Massa específica do sólido poroso; kg/m3
Rosp=Rosk/(1+Rosk*ves);
% Estimativa para o coeficiente de atrito do gás, ffg
if Re<2000;
    ffg=64/Re;
else
    ffg=(2*log10(0.27*(e/D)+((7/Re)^0.9)))^(-2);
end
% Fração volumétrica do gás na base do riser
epsongb=(Ug0*Rosap)/((2*W)+(Ug0*Rosap));
% fração volumétrica básica de sólido no riser
epsonsb=(1-epsongb);
% Estimativa da velocidade superficial da fase sólida, m/s
Us0=W/(epsonsb*Rosap);
% Slip
% Slip=Ug0/Us0;
% frações volumétricas locais
z=0;L1=1;L2=1;h=.01;MM=L/h;
for j=1:MM
    Fholdup(j)=beta*exp(-gama*(z/L));
    epsonz(j)=epsonsb*Fholdup(j);
    epsongz(j)=1-epsonsz(j);
% Massa específica local do catalisador no riser, kg/m3
Rosrz=epsonsz(j)*Rosap;
% Velocidades médias de sólido e gás no riser, m/s
Ugz=Ug0/epsongz(j);
Usz=Us0*(1-Fholdup(j));
% Logaritmo neperiano da razão entre as taxas de contagens, ln(Iv/Iz)
Ln=Rosrz*alfa*D;

```

```

% Preparando gráficos
x(j)=z/L;
r(j)=Rosrz;
s(j)=Usz;
ss(j)=Ugz;
y(j)=Ugz/Usz;
rr(j)=Ln;
z=z+h;
end
Usf=s(j);
Usi=s(1);
Ugf=ss(j);
Ugi=ss(1);
% Coeficiente de atrito para os sólidos, ffs
ffs=(0.0206*(((epsomb)*(1-(Us0/Ug0)))^(-0.896)))/((epsomb^3)/(epsomb));
% Queda de pressão devido à fricção do gás (DPfg), N/m2
DPfg=ffg*(L/D)*Rog*((Ug0^2)/2);
% Queda de pressão por fricção do sólido,DPfs
% Us=Ug/Slip;
DPfs=ffs*(L/D)*epsomb*Rosap*((Us0^2)/2);
% Queda de pressão devido à coluna estática de sólidos, DPEs
DPEs=L*epsomb*Rosp*g*epsomb;
% Queda de pressão devido à aceleração, DPAc
DPAc=(((Usf^2)-(Usi^2))*(epsomb*Rosap))/2;
% Queda de pressão total, DPt
DPt=DPfg+DPfs+DPEs+DPAc;
z=[0 L];
xin=[ss(1) s(1) epsongz(1) P]';
% xin=[Ug0 Us0 epsongz(1) P]';
[z x]=ode45('frisersantana3',z,xin);
figure(1);
plot(z/L,x(:,1),'r');
%title('Velocidade da fase gasosa em função da altura relativa')

```

```

xlabel('Altura relativa no riser');ylabel('Ug, m/s');
figure(2);
plot(z/L,x(:,2),'b');
%title('Velocidade da fase s33lida em fun33o da altura relativa')
xlabel('Altura relativa no riser');ylabel('Us, m/s');
figure(3);
plot(z/L,x(:,3),'r');
%title('Porosidade do g33s em fun33o da altura relativa')
xlabel('Altura relativa no riser');ylabel('Fra33o volum. do g33s');
figure(4);
plot(z/L,1-x(:,3),'b');
%title('Porosidade do s33lido em fun33o da altura relativa')
xlabel('Altura do riser');ylabel('Fra33o volum. de s33lidos');
figure(5);
plot(z/L,x(:,4),'k');
xlabel('Altura relativa no riser');ylabel('Press33o Total, N/m2');
m=length(z);
for i=1:1:m
    v1(i)=x(i,1);
    v2(i)=x(i,2);
    S(i)=v1(i)./v2(i);
end
figure(6);
plot(z/L,S,'m');
xlabel('Altura relativa no riser');ylabel('Raz33o de escorregamento (Ug/Us), -');

```

### PROGRAMA B2: AUXILIAR DO PROGRAMA B1

*friser.m*

```
function fv=friser(z,x)
```

```
global L D d e M R P g mig T W ves a b alfa alum beta gama Rog Rosap Rosk Rosp Q1 Q Ug0
epsongb epsonsb Us0
```

```

fv=zeros(4,1);
fv(1)=(-x(1)/x(3))*(((1-(18*mig/((d^2)*Rosap))*((1+.15*((Rog*d/mig)*(x(1)-
x(2))))^2))^2)/(((x(1)/x(3))-((x(2)/(1-x(3)))*(x(1)-x(2))))*x(3)^2.65));
fv(2)=(x(2)/(1-x(3)))*(((1-(18*mig/((d^2)*Rosap))*((1+.15*((Rog*d/mig)*(x(1)-
x(2))))^2))^2)/(((x(1)/x(3))-((x(2)/(1-x(3)))*(x(1)-x(2))))*x(3)^2.65));
fv(3)=(((1-(18*mig/((d^2)*Rosap))*((1+.15*((Rog*d/mig)*(x(1)-x(2))))^2))^2)/(((x(1)/x(3))-((x(2)/(1-x(3)))*(x(1)-x(2))))*x(3)^2.65));
fv(4)=-((((1-(18*mig/((d^2)*Rosap))*((1+.15*((Rog*d/mig)*(x(1)-x(2))))^2))^2)/(((x(1)/x(3))-((x(2)/(1-x(3)))*(x(1)-x(2))))*x(3)^2.65))*((Rosap*x(2)^2)-
(Rog*x(1)^2)-.156*Rog*(mig^.25)/(D*((D*Rog)^.25)))*(x(1)^1.75)-(Rosp*(1-
x(3))+Rog*x(3))*g;

```

### **PROGRAMA B2: PARA CALCULAR A FRAÇÃO VOLUMÉTRICA EXPERIMENTAL *porosidade.m***

```

%Programa para calcular a fração volumétrica do sólido
%com os dados experimentais no riser
%diretamente na hora do experimento
clear
epsong=(1-epsong)
D=3.2;%cm
Rosap=0.85;%g/cm3
migs=0.3310;%cm2/g
I0=input('Entre com o valor de I0: ');
m=input('Entre com valor do número de pontos do experimento: ');
for i=1:m;
    If(i)=input('Entre com o valor de If: ');
    Ifm=mean(If);
    %epsong=((1/(migs*Rosap*D))*(log(I0/Ifm)));
    epsong=(log(I0/Ifm))/((migs*Rosap*D));
    epsong=1-epsong;
end

```

## APÊNDICE C: RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULADOS

Tabela 1 C – Resultados experimentais (obtidos experimentalmente utilizando a Equação 74) e simulados de Santana, Rocha e Kachan (1988) e Maladi e Otero (1983) da fração volumétrica do sólido ( $10^{-4}$ )

	<b>z/L</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>
W = 7,1 kg/m <sup>2</sup> .s Qar = 0,003m <sup>3</sup> /s	$\epsilon_{s \text{ exp}}$	34	24	21	20	19
	$\epsilon_{\text{santana}}$	34	24	21	20	19
	$\epsilon_{\text{maladi}}$	34	22	21	20	20

Tabela 2 C – Resultados experimentais e simulados de Santana, Rocha e Kachan (1988) e Maladi e Otero (1983) da fração volumétrica do gás

	<b>z/L</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>
W = 7,1 kg/m <sup>2</sup> .s Qar = 0,003 m <sup>3</sup> /s	$\epsilon_{g \text{ exp}}$	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	$\epsilon_{\text{gantana}}$	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	$\epsilon_{\text{maladi}}$	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99

Tabela 3 C – Resultados experimentais (utilizando a equação da continuidade para o sólido, Equação 20) e simulados de Santana, Rocha e Kachan (1988) e Maladi e Otero (1983) da velocidade do sólido

	<b>z/L</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>
W = 7,1 kg/m <sup>2</sup> .s Qar = 0,003 m <sup>3</sup> /s	$U_{s \text{ exp}}$	2,5	3,5	3,9	4,2	4,4
	$U_{\text{santana}}$	2,4	3,4	3,8	4,0	4,2
	$U_{\text{maladi}}$	2,4	3,7	3,9	4,0	4,0

Tabela 4 C – Resultados experimentais (utilizando a equação da continuidade para o gás, Equação 21) e simulados de Santana, Rocha e Kachan (1988) e Maladi e Otero (1983) da velocidade do gás

	<b>z/L</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>
W = 7,1 kg/m <sup>2</sup> .s Qar = 0,003 m <sup>3</sup> /s	$U_{g \text{ exp}}$	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7
	$U_{\text{gantana}}$	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7
	$U_{\text{maladi}}$	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7
	$U_{\text{maladi}}$	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0

Tabela 5 C – Resultados experimentais e simulados da razão de escorregamento, utilizando a razão ( $U_g/U_s$ ) dados nas Tabelas 2 D e 3 D.

	$z/L$	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>
$W = 7,1 \text{ kg/m}^2.\text{s}$ $Q_{ar} = 0,003 \text{ m}^3/\text{s}$	$Slip_{exp}$	1,9	1,3	1,2	1,1	1,1
	$Slip_{santana}$	1,9	1,4	1,2	1,2	1,1
	$Slip_{maladi}$	1,9	1,7	1,6	1,6	1,6

Erro relativo

$$E_R = \left| \frac{\text{valor experimental} - \text{valor simulado}}{\text{valor experimental}} \right| \times 100 \quad (1.C)$$

Tabela 6 C – Erros relativos ( $E_R$  %) da fração volumétrica do sólido

	$z/L$	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>
$W = 7,1 \text{ kg/m}^2.\text{s}$ $Q_{ar} = 0,003 \text{ m}^3/\text{s}$	$E_R$ ( $\epsilon_{santana}$ )	0,89	0,97	1,0	0,96	0,94
	$E_R$ ( $\epsilon_{maladi}$ )	0,89	9,03	2,2	2,4	5,6

Tabela 7 C – Erros relativos ( $E_R$  %) da velocidade do sólido

	$z/L$	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>
$W = 7,1 \text{ kg/m}^2.\text{s}$ $Q_{ar} = 0,003 \text{ m}^3/\text{s}$	$E_R$ ( $U_{santana}$ )	5,0	5,1	5,1	5,06	5,0
	$E_R$ ( $U_{maladi}$ )	5,0	5,5	1,9	6,3	9,1

Tabela 8 C – Erros relativos ( $E_R$  %) da velocidade do gás

	$z/L$	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>
$W = 7,1 \text{ kg/m}^2.\text{s}$ $Q_{ar} = 0,003 \text{ m}^3/\text{s}$	$E_R$ ( $U_{g,santana}$ )	0,034	0,034	0,034	0,035	0,039
	$E_R$ ( $U_{g,maladi}$ )	0,034	0,036	0,034	0,033	0,034

Tabela 9 C – Erros relativos ( $E_R$  %) da razão de escorregamento

	$z/L$	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>
$W = 7,1 \text{ kg/m}^2.\text{s}$ $Q_{ar} = 0,003 \text{ m}^3/\text{s}$	$E_R$ ( $Slip_{santana}$ )	5,2	5,2	1,9	6,7	10,0
	$E_R$ ( $Slip_{maladi}$ )	5,2	5,2	1,9	6,7	10,0

## APÊNDICE D: TÉCNICAS ESTATÍSTICAS UTILIZADAS NA VALIDAÇÃO DE MODELOS

### Média e desvio padrão

$$\bar{x} = \sum_i \frac{x_i}{n} \quad (1 D)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (2 D)$$

### Teste-t

No teste de significância estamos testando a chamada “hipótese nula”, que é usada para demonstrar que não existe diferença entre um valor observado e outro conhecido, além dos erros aleatórios. É importante observar que a decisão de aceitar a hipótese nula, não significa que foi provado ser verdadeira, apenas que não foi demonstrado ser falsa.

Para amostras de tamanho  $n < 30$  deve-se utilizar a distribuição de Student, onde depende do valor de  $n$  e dos graus de liberdade  $v$ .

### Coefficiente de correlação

Seja a equação da reta

$$y = a + bx \quad (3 D)$$

Onde  $b$  é inclinação da reta e  $a$  é interseção no eixo dos  $y$ .

Os pontos individuais na reta vão ser representados como  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3) \dots (x_i, y_i) \dots (x_n, y_n)$ ; isto é, para um conjunto de  $n$  pontos. A média dos valores de  $x$ , é referida como  $\bar{x}$ , e média dos valores de  $y$  por  $\bar{y}$ ; o ponto  $(\bar{x}, \bar{y})$  é conhecido como centróide de todos os pontos. Para estimar o ajuste dos pontos a reta, nós calculamos o coeficiente de correlação linear,  $R$ , que é dado por:

variação total = variação devido a regressão + variação devido ao erro

$$\sum (y - \bar{y})^2 = \sum (\hat{y} - \bar{y})^2 + \sum (y - \hat{y})^2 \quad (4 D)$$

A razão entre a variação devido à regressão e a variação total é chamado de coeficiente de correlação na qual é dada por:

$$R = \pm \sqrt{\frac{\text{variação devido a regressão}}{\text{variação total}}} = \pm \sqrt{\frac{\sum (\hat{y} - \bar{y})^2}{\sum (y - \bar{y})^2}} \quad (5 D)$$

Como admitimos que é uma relação linear entre as duas variáveis a Equação 5D torna-se:

$$R = \frac{\sum_i \{(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})\}}{\left\{ \left[ \sum_i (x_i - \bar{x})^2 \right] \left[ \sum_i (y_i - \bar{y})^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (6 D)$$

Esta equação mostra que R pode assumir valores variando entre -1 e +1. Os sinais  $\pm$  são usados para correlação linear positiva e para a negativa, respectivamente. Nota-se que R é uma quantidade sem dimensões, isto é, independe das unidades adotadas. Quando não existe correlação entre x e y, o valor de R é zero.

Uma maneira de verificar se o coeficiente de correlação é significativo, levando em conta o número de pontos usados é através do teste-t, dado a seguir:

$$t = \frac{R \sqrt{(n-2)}}{\sqrt{(1-R^2)}} \quad (7 D)$$

O valor de t é comparado com o valor tabelado no nível de significância requerido, usando um teste bilateral e (n-2) graus de liberdade. A hipótese nula, neste caso, é a correlação

entre  $x$  e  $y$ . Caso o valor calculado de  $t$  seja maior que o valor tabelado, a hipótese nula é rejeitada, se conclui que existe uma correlação significativa.

### Regressão

Consiste na técnica, no caso particular em estudo, de plotar os valores experimentais de um parâmetro no eixo dos  $x$  e os valores simulados desse mesmo parâmetro no eixo dos  $y$ . Admitindo que existe uma correlação linear entre os valores experimentais  $x$  e os valores simulados  $y$ , se calcula a “melhor” reta através dos pontos do gráfico, cada um sujeito a erros. Assumindo que todos esses erros estão em  $y$ , ou seja, nos valores simulados, procuramos minimizar os desvios na direção  $y$ , entre os pontos experimentais e simulados. Uma vez que os desvios (residuais), serão positivos e outros negativos, é provável minimizar a soma dos quadrados dos desvios residuais. Isto explica o uso do termo: método dos mínimos quadrados para este procedimento. A reta requerida é calculada para passar através do centróide dos pontos  $(\bar{x}, \bar{y})$ , por meio das seguintes equações:

$$b = \frac{\sum_i \{(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})\}}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (8 D)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (9 D)$$

A reta calculada representa a dependência entre as variáveis, conhecida como regressão linear de  $y$  para  $x$ , isto é, a reta indica como  $y$  varia em função de  $x$ . Nota-se que a regressão linear de  $x$  para  $y$  não é a mesma reta, excetuando o caso em que todos os pontos estão perfeitamente em linha reta, com  $R=1$  exato.

No caso específico dessa correlação onde quer que os dados simulados sejam o mais próximo possível dos dados experimentais o coeficiente de correlação é importante.

### Erros na inclinação e na interseção

Os erros aleatórios nos valores da inclinação e da interseção são importantes. Vamos considerar as equações para estes cálculos. Antes, precisamos do valor do desvio padrão da estimativa (**erro padrão**), ou seja, uma medida de dispersão em relação à reta de regressão de y para x será dada por:

$$s_{y/x} = \left\{ \frac{\sum_i (y_i - \hat{y})^2}{n - 2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (10 D)$$

Esta equação utiliza os residuais de y,  $y_i - \hat{y}$ , onde os valores de  $\hat{y}$  são pontos calculados da regressão linear correspondentes aos valores de x, isto é, os valores ajustados de y. O valor de  $\hat{y}$  para um dado valor de x, é calculado pela equação de regressão. A Equação 10 D é semelhante à Equação 2 D que calcula o desvio padrão para uma série de medidas repetidas. No entanto, vale ressaltar as diferenças na Eq. 10 D, onde  $(y_i - \bar{y})$  é substituído pelos residuais  $(y_i - \hat{y})$  e o denominador contém o termo (n-2), ao invés de (n-1). Numa regressão linear, o número de graus de liberdade é (n-2), que reflete a consideração óbvia de que uma reta pode ser traçada entre dois pontos.

Dispondo do valor de  $s_{y/x}$  pode se calcular  $s_b$  e  $s_a$ , o desvio padrão da inclinação (b) e da interseção (a), dados por:

$$s_b = \frac{s_{y/x}}{\left\{ \sum_i (x_i - \bar{x})^2 \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (11 D)$$

$$s_a = s_{y/x} \left\{ \frac{\sum_i x_i^2}{n \sum_i (x_i - \bar{x})^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (12 D)$$

Os valores de  $S_b$  e  $S_a$  podem ser usados para estimar os limites de confiança da inclinação e da interseção. Assim, os limites de confiança da inclinação são dados por  $b \pm tS_b$ , onde o valor-t é tomado ao nível de confiança desejado e com  $(n-2)$  graus de liberdade. Similarmente o limite de confiança para a interseção é dado por  $a \pm tS_a$ .

Verificação se o coeficiente angular ou inclinação e o coeficiente linear ou interseção são significativos:

$$t_{ca} = \frac{a}{S_a} \quad \text{e} \quad t_{cb} = \frac{b}{S_b} \quad (13 D)$$

Se  $t_{ca} > t_{\text{tabelado}}$  o coeficiente linear é significativo

Se  $t_{cb} > t_{\text{tabelado}}$  o coeficiente angular é significativo

#### Cálculo de um valor experimental

Com a equação da regressão, é bem simples calcular um valor de x que corresponde a um valor de y simulado. O problema complexo é estimar o erro numa medida experimental calculada pela regressão linear. O cálculo do valor de x, a partir de um dado valor de y, envolve a inclinação ou coeficiente angular (b) e a interseção ou coeficiente linear (a), que como vimos ambas contêm erros. A determinação do erro no valor de x é complexa, uma aproximação é obtida com as seguintes equações:

$$S_{x_0} = \frac{S_{y/x}}{b} \left[ 1 + \frac{1}{n} + \frac{(y_0 - \bar{y})^2}{b^2 \sum_i (x_i - \bar{x})^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14 D)$$

Nesta equação  $y_0$  é o valor simulado de y pelo qual o valor experimental de  $X_0$  é determinado,  $S_{x_0}$  é a estimativa do desvio padrão de  $X_0$ .

#### Limites de confiança

Os limites de confiança podem ser calculados com  $\bar{x}_0 \pm t_{s_{x_0}}$  (n-2) graus de liberdade.

Para melhorar os limites de confiança, a equação 13 E mostra que existem duas possibilidades. A primeira possibilidade é aumentar n, o número de pontos da calibração, porém a segunda possibilidade de usar a média de várias simulações não é possível, visto que com determinadas condições iniciais o programa simula sempre os mesmos resultados de  $y_0$ .

## APÊNDICE E: ANÁLISE DAS INCERTEZAS

Tabela 1E - Variáveis medidas e suas incertezas

Variáveis	Equipamento	Valor
Vazão volumétrica do ar	Medidor de vazão de condutividade térmica	$(300 \pm 15)$ l/min
Pressão no riser	Transmissor de pressão	$(0,082 \pm 0,008)$ pol H <sub>2</sub> O
Intensidade gama	Multicanal	
Riser vazio I <sub>0</sub>		$(2236900 \pm 1496)$ cps*
Riser com fluxo I		$(222695 \pm 1492)$ cps
Vazão mássica do catalisador	Transportador helicoidal	$(57 \pm 1) \cdot 10^{-4}$ kg/s
Fração volumétrica do catalisador	Multicanal	$(3,000 \pm 0,005) \cdot 10^{-3}$
Valores da literatura		
Coefficiente de atenuação de massa <sup>241</sup> Am (0,060 MeV)		$(0,331 \pm 0,006)$ cm <sup>2</sup> /g**
Densidade do catalisador (CENPES)		$(0,850 \pm 0,005)$ g/cm <sup>3</sup>

\*  $\frac{I_0}{\sqrt{I_0}}$ , \*\* (LOURENÇO, 2003)

## APÊNDICE F – MODELAGEM DA FLUIDODINÂMICA DO RISER

Os nossos modelos matemáticos foram baseados num sistema de coordenadas retangulares pela análise diferencial de um volume de controle de lados  $dx$ ,  $dy$  e  $dz$ , como mostra a Figura 1F através do método Euleriano.

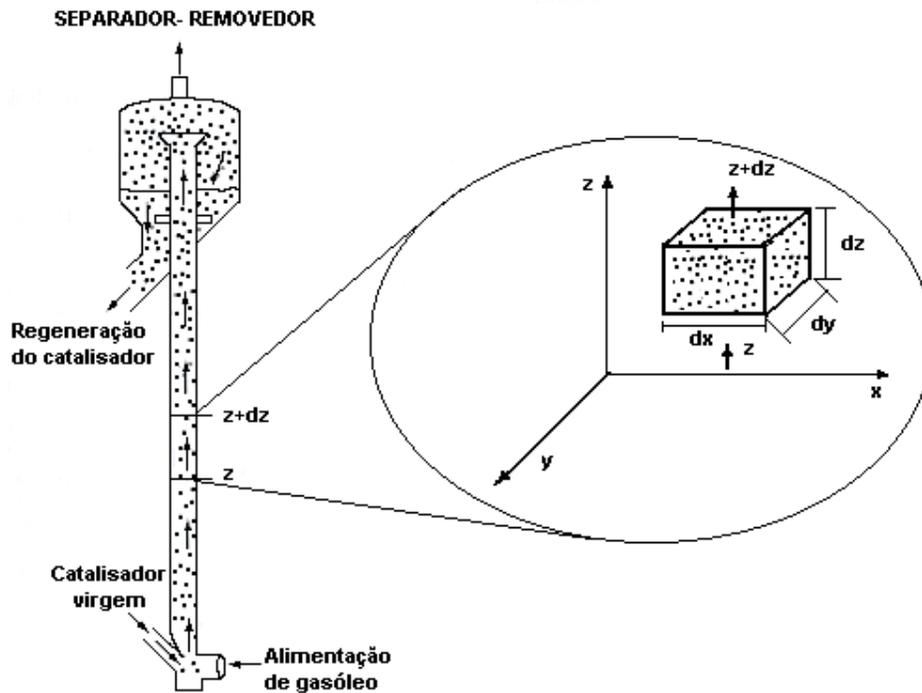


Figura 1 F – Volume de controle diferencial em coordenadas retangulares

As Hipóteses adotadas na elaboração do modelo fluidodinâmico do *riser* foram as seguintes:

- ✓ escoamento em regime permanente;
- ✓ modelo unidimensional (coordenadas Cartesianas) - a distribuição radial de sólido tem variação desprezível;
- ✓ escoamento incompressível; sem reação química; o catalisador (fase sólida) é descrito como meio contínuo - o sólido entra no *riser* já totalmente fluidizado; o atrito do sólido com as paredes do *riser* é desprezado;

✓ que as partículas sólidas assumem ter formato esférico.

### Conservação da massa do gás

A conservação da massa declara que a massa,  $M$ , no sistema ou volume de controle é constante. É intuitivo que a massa nem pode ser criada nem destruída; se a vazão em massa para dentro de um volume de controle exceder aquela que sai, a massa acumular-se-á dentro do volume de controle.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{velocidade de acumulação} \\ \text{de massa de gás} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{velocidade de entrada} \\ \text{de massa de gás} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{velocidade de saída} \\ \text{de massa de gás} \end{array} \right\} \quad (1 F)$$

$$\begin{aligned} \Delta x \Delta y \Delta z \frac{\partial \rho}{\partial t} &= \Delta y \Delta z \left[ (\rho_g \epsilon_g U_{gx})|_x - (\rho_g \epsilon_g U_{gx})|_{x+\Delta x} \right] \\ &+ \Delta x \Delta y \left[ (\rho_g \epsilon_g U_{gy})|_y - (\rho_g \epsilon_g U_{gy})|_{y+\Delta y} \right] + \Delta x \Delta y \left[ (\rho_g \epsilon_g U_{gz})|_z - (\rho_g \epsilon_g U_{gz})|_{z+\Delta z} \right] \end{aligned} \quad (2 F)$$

Dividindo a Equação (1 F) por  $\Delta x \Delta y \Delta z$  e tomando os limites quando estas dimensões tendem a zero:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} (\rho_g \epsilon_g U_{gx}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho_g \epsilon_g U_{gy}) - \frac{\partial}{\partial z} (\rho_g \epsilon_g U_{gz}) \quad (3 F)$$

As propriedades do fluido não variam com o tempo logo temos:  $\frac{\partial \rho_g}{\partial t} = 0$ ; (4 F)

O escoamento é unidimensional na direção  $z$ , logo temos:

$$-\frac{\partial}{\partial x} (\rho_g \epsilon_g U_{gx}) = 0 \quad \text{e} \quad -\frac{\partial}{\partial y} (\rho_g \epsilon_g U_{gy}) = 0 \quad (5 F)$$

Assim a Equação (3 F) fica:

$$\frac{\partial}{\partial z} (\rho_g \epsilon_g U_{gz}) = 0 \quad (6 F)$$

Expandindo a Equação (6 F) temos:

$$\rho_g \epsilon_g \frac{dU_{gz}}{dz} + \epsilon_g U_{gz} \frac{d\rho_g}{dz} + \rho_g U_{gz} \frac{d\epsilon_g}{dz} = 0 \quad (7 F)$$

Como o escoamento é incompressível  $\epsilon_g U_{gz} \frac{d\rho_g}{dz} = 0$  (8 F)

A Equação (7 F) fica:

$$\frac{dU_{gz}}{dz} = -\frac{U_{gz}}{\epsilon_g} \left( \frac{d\epsilon_g}{dz} \right) \quad \text{ou} \quad \frac{dU_g}{dz} = -\frac{U_g}{\epsilon_g} \left( \frac{d\epsilon_g}{dz} \right) \quad (9 F)$$

Fazendo o mesmo raciocínio para a conservação da massa do sólido nós encontramos a seguinte equação:

Conservação da massa do sólido:

$$\frac{dU_{sz}}{dz} = \frac{U_{sz}}{\epsilon_s} \left( \frac{d\epsilon_g}{dz} \right) \quad \text{ou} \quad \frac{dU_s}{dz} = \frac{U_s}{\epsilon_s} \left( \frac{d\epsilon_g}{dz} \right) \quad (10 F)$$

Conservação da quantidade de movimento da mistura

A soma de todas as forças (de superfície e de massa), atuando sobre o um volume de controle não submetidos à aceleração, é igual à soma da taxa de variação da quantidade de movimento no interior do volume de controle com a taxa líquida do fluxo de quantidade de movimento saindo da superfície de controle.

$$\left. \begin{array}{l} \text{velocidade de acumulação} \\ \text{da quantidade} \\ \text{de movimento da mistura} \end{array} \right\} = \left. \begin{array}{l} \text{velocidade de entrada} \\ \text{da quantidade} \\ \text{de movimento da mistura} \end{array} \right\} - \left. \begin{array}{l} \text{velocidade de saída} \\ \text{da quantidade} \\ \text{de movimento da mistura} \end{array} \right\} - \left. \begin{array}{l} \text{soma das forças} \\ \text{que atuam sobre} \\ \text{o sistema} \end{array} \right\}$$

(11 F)

Considerando a quantidade de movimento z através das seis faces temos:

Os fluxos de entrada e saída são dados por:

$$\begin{aligned}
 & \Delta x \Delta y \left[ (\rho \epsilon U_z U_z)_{|z} - (\rho \epsilon U_z U_z)_{|z+\Delta z} \right] + \Delta z \Delta y \left[ (\rho \epsilon U_x U_z)_{|x} - (\rho \epsilon U_x U_z)_{|x+\Delta x} \right] + \\
 & \Delta z \Delta x \left[ (\rho \epsilon U_y U_z)_{|y} - (\rho \epsilon U_y U_z)_{|y+\Delta y} \right]
 \end{aligned}$$

(12 F)

Como o escoamento é unidimensional a Equação (12 F) é reescrita da forma:

$$\Delta x \Delta y \left[ (\rho \epsilon U_z U_z)_{|z} - (\rho \epsilon U_z U_z)_{|z+\Delta z} \right]$$

(13 F)

As forças que atuam no sistema:

$$\text{pressão} = \Delta x \Delta y (P_{|z} - P_{|z+\Delta z})$$

(14 F)

$$\text{força gravitacional} = \rho \epsilon g \Delta x \Delta y \Delta z$$

(15 F)

força de atrito do gás com as paredes *do riser*

$$fw = \frac{0,316 \rho_g U_g^2}{Re_g^{\frac{1}{4}} 2D} \Delta x \Delta y \Delta z$$

(16 F)

Sabendo que o escoamento é permanente temos que a velocidade de acumulação é:

$$\Delta x \Delta y \Delta z \left( \frac{\partial \rho \epsilon U_z}{\partial t} \right) = 0$$

(17 F)

E dividindo as Equações 13 F, 14 F e 15 F por  $\Delta x \Delta y \Delta z$  e tomando o limite quando  $\Delta x \Delta y \Delta z$  tende a zero. Obtém-se o componente z da equação do movimento:

$$- \frac{d}{dz} (\rho \epsilon U_z U_z) - \frac{dP}{dz} - fw + \rho \epsilon g_z = 0$$

(18 F)

Expandido a Equação (18 F) temos:

$$-\rho \varepsilon U_z \frac{dU_z}{dz} - \rho U_z U_z \frac{d\varepsilon}{dz} - \varepsilon U_z U_z \frac{d\rho}{dz} - \frac{dP}{dz} - f_w + \rho \varepsilon g_z = 0 \quad (19 F)$$

$$\text{Fluido incompressível } \varepsilon U_z U_z \frac{d\rho}{dz} = 0 \quad (20 F)$$

$$-\rho \varepsilon U_z \frac{dU_z}{dz} - \rho U_z U_z \frac{d\varepsilon}{dz} - \frac{dP}{dz} - f_w + \rho \varepsilon g_z = 0 \quad (21 F)$$

Tem-se uma mistura gás-sólido, Então substitui a conservação da massa da fase gasosa Equação (9 F) no primeiro termo da Equação (21 F) , então o primeiro termo passa a ser da fase gasosa e o segundo da fase sólida, logo chega-se a seguinte equação:

$$-\frac{dP}{dz} = -\frac{d\varepsilon}{dz} (\rho_s U_s^2 - \rho_g U_g^2) - f_w - [(\varepsilon_s \cdot \rho_s + \varepsilon_g \cdot \rho_g) \cdot g]$$

ou

$$-\frac{dP}{dz} = -\frac{d\varepsilon_g}{dz} (\rho_s U_s^2 - \rho_g U_g^2) - f_w - [(\varepsilon_s \cdot \rho_s + \varepsilon_g \cdot \rho_g) \cdot g] \quad (22 F)$$

A qual é a conservação da quantidade de movimento de um sistema bicomponente.

O modelo matemático utilizado, para a descrição do comportamento fluidodinâmico no *riser* do MEF, é composto de quatro equações.

- ✓ conservação da massa do gás – Equações (46) ou (9 F);
- ✓ conservação da massa do sólido – Equações (47) ou (10 F);
- ✓ conservação da quantidade de movimento da mistura – Equações (48) ou (22 F).

A quarta equação característica, que descreve a variação da fração volumétrica ao longo do *riser*, foi baseada nos três modelos apresentados na revisão bibliográfica, Equações 50, 51 e 53 dos modelos de Maladi e Otero (1983), Mendes e Santana (1983) e Santana, Rocha e Kachan (1988), respectivamente.

A equação característica do modelo de Santana, Rocha e Kachan (1988), foi baseada no modelo da velocidade relativa de Gisdaspow (1978) e o seu desenvolvimento é mostrado a seguir:

$$-\frac{1}{2} \frac{d}{dz} (U_g - U_s)^2 = \frac{F_s}{\rho_s} - g \quad \text{sen } \theta \quad (23 \text{ F})$$

Para o  $\text{sen } \theta = 1$  temos:

$$\frac{d}{dz} (U_g - U_s)^2 = -2 \left( \frac{F_s}{\rho_s} - g \right) \quad (24 \text{ F})$$

$$2(U_g - U_s) \left[ \frac{dU_g}{dz} - \frac{dU_s}{dz} \right] = 2 \left( g - \frac{F_s}{\rho_s} \right) \quad (25 \text{ F})$$

$$(U_g - U_s) \left[ \frac{dU_g}{dz} - \frac{dU_s}{dz} \right] = \left( g - \frac{F_s}{\rho_s} \right) \quad (26 \text{ F})$$

substituindo as Equações 9F e 10F em 26F temos:

$$(U_g - U_s) \left[ -\frac{U_g}{dz} \frac{d\varepsilon_g}{dz} - \frac{U_s}{dz} \frac{d\varepsilon_g}{dz} \right] = \left( g - \frac{F_s}{\rho_s} \right) \quad (27 \text{ F})$$

rearranjando temos:

$$\frac{d\varepsilon_g}{dz} = \frac{1}{\left[ -\frac{U_g}{dz} - \frac{U_s}{dz} \right] (U_g - U_s)} = \left( g - \frac{F_s}{\rho_s} \right) \quad (28 \text{ F})$$

## APÊNDICE G: ESTATÍSTICA DAS CONTAGENS

Foi realizado um teste qui-quadrado para as medidas da intensidade de radiação ( $x_i$ ) no *riser* vazio.

Hipóteses

H0: o detector funciona adequadamente

H1: o detector não funciona adequadamente

Tabela 1G – Valores calculados

$x_i$	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$
2236427	-453,2	205390,24
2238172	1291,8	1668747,24
2235761	-1119,2	1252608,64
2237976	1095,8	1200777,64
2236065	-815,2	664551,04
$\Sigma$	0	4992074,8

$$\chi^2 = \sum_i^n \left( \frac{x_{\text{obs}} - x_{\text{exp}}}{x_{\text{exp}}} \right) = 2,23$$

Entrando na Figura 2.1 do EVANS pág 777, com  $\chi^2 = 2,23$  e  $gl = 4$  a probabilidade P está na faixa de 70 a 90%. Logo se aceita a hipótese nula, pois se encontra dentro da faixa de 10 a 90%, assim o detector está funcionando adequadamente.