

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO

ENGENHARIA DE PROCESSOS

**ESTUDO EXPERIMENTAL
DA DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO ESTÁTICA
NO ESCOAMENTO GÁS-SÓLIDO EM UM LEITO
RECIRCULANTE**

Autor: Mário Luís Penteado Betioli

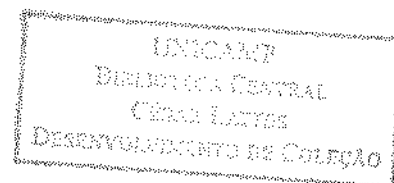
Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio Cremasco

Co-Orientador: Prof. Dr. Alexandre de Paula Peres

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Campinas – São Paulo

Junho de 2007



UNIDADE BO
Nº CHAMADA: _____
T/UNICAMP BUGSA
V. _____ EX. _____
TOMBO BCCL 74835
PROC 16/R15-07
C _____ D X
PREÇO 11,07
DATA 31/08/07
BIB-ID 616769

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

B465e Betioli, Mário Luís Penteado
Estudo experimental da distribuição de pressão estática
no escoamento gás-sólido em um leito recirculante / Mário
Luís Penteado Betioli. --Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientadores: Marco Aurélio Cremasco, Alexandre de
Paula Peres

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Pressão. 2. Escoamento bifásico. 3. Reatores
fluidizados. 4. Craqueamento. 5. Partículas. I. Cremasco,
Marco Aurélio. II. Peres, Alexandre de Paula. III.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Química. IV. Título.

Título em Inglês: Experimental study of the static pressure distribution in the gas-solid
flow in a recirculating bed

Palavras-chave em Inglês: Pressure difference, Gas-solid flow, Recirculating bed,
Cracking, Particles

Área de concentração: Engenharia de Processos

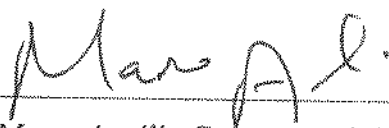
Titulação: Mestre em Engenharia Química

Banca examinadora: Sandra Cristina dos Santos Rocha e Maria do Carmo Ferreira

Data da defesa: 13/06/2007

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química

Dissertação de Mestrado defendida por Mário Luís Penteado Betioli e aprovada
em 13 de junho de 2007 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



Prof. Dr. Marco Aurélio Cremasco - Orientador



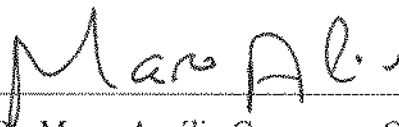
Profª. Drª. Maria do Carmo Ferreira



Profª. Drª. Sandra Cristina dos Santos Rocha

200752393

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado em Engenharia Química.

A handwritten signature in black ink, reading "Marco Aurélio", written over a horizontal line.

Prof. Dr. Marco Aurélio Cremasco - Orientador

Este trabalho de dissertação é dedicado à Eliana, minha mãe, que sofreu e comemorou comigo todas as etapas convergidas e apresentadas aqui.

"Coração de mãe tem dois quartos. Um é a alegria, e o outro, a dor. A mãe vive num Paraíso de dor e amor por todos."

Santo Reis da Luz Divina

(Marco Aurélio Cremasco)

AGRADECIMENTOS

A Marco Aurélio Cremasco, pela orientação segura e honesta neste trabalho e pela amizade adquirida em sete anos de convivência.

A Alexandre de Paula Peres, pela contribuição no desenvolvimento deste trabalho.

A Danilo de Aguiar e Cunha, pelo auxílio na operação da Unidade Multipropósito e colaboração em algumas corridas experimentais.

Aos companheiros de laboratório: Guilherme, Kiki, Nazareno e Vanessa, por fazerem do ambiente de pesquisa um lugar de harmonia.

Aos colegas de trabalho na REPLAN: Admir, Aristides, Edmilson, Gleriston, Hedewandro, Jean, João Alfredo, Lúcio e Valmir.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar a distribuição axial de pressão estática ao longo de um leito fluidizado circulante (CFB) para diversos valores de velocidade de gás e fluxo mássico de sólidos; para tanto, avaliou-se a influência da concentração de sólidos presente em um escoamento gás-sólido ao longo de todo o CFB, o que possibilitou estudar, em um mesmo sistema, a fluidodinâmica dos reatores *downer* e *riser*, de uma seção que os une – uma curva em “U” – assim como de um sistema de recirculação de sólidos.

Os CFBs são utilizados em diversas indústrias, particularmente naquelas que envolvem processos de craqueamento catalítico em leito fluidizado (FCC). O FCC é um processo de refino de petróleo utilizado para aumentar a produção de gasolina e GLP (gás liquefeito de petróleo) de uma refinaria, por meio da conversão de frações pesadas, provenientes da destilação do petróleo (gasóleo e resíduos), em frações mais leves.

Os experimentos foram conduzidos em uma planta piloto instalada no Laboratório de Processos em Meios Porosos (LPMP) da DTF/FEQ/UNICAMP, denominada Unidade Multipropósito de Craqueamento Catalítico. Realizaram-se ensaios utilizando vazões de ar iguais a 7,5m³/h, 10m³/h, 15 m³/h, 20 m³/h, 25 m³/h, 30 m³/h alimentadas: i) na entrada do *downer*; ii) na entrada da curva em “U”; iii) numa combinação da entrada do *downer* e da entrada da curva em “U”. Os fluxos mássicos de sólidos utilizados para cada vazão de ar foram iguais a 0,000kg/m²s, 0,032kg/m²s, 0,076kg/m²s, 0,120kg/m²s, 0,164kg/m²s e 0,208kg/m²s alimentados na entrada do *downer*. Decorrente deste estudo experimental, além do perfil axial de pressão, foi avaliado um modelo simplificado para a descrição da fluidodinâmica em questão, cujos resultados obtidos para diferença de pressão foram comparados com aqueles obtidos de forma experimental, estes por meio de deflexão manométrica.

ABSTRACT

The aim of this work is to present the axial distribution of static pressure throughout a circulating fluidized bed (CFB) for diverse values of gas velocity and solids circulation rate; for this, it was evaluated the influence of the present solids concentration in a gas-solid flow throughout the entirety CFB, which made it possible to study, in the same system, the fluid-dynamics of the downer and riser reactors, of a section joining them – a “U” bend – as well as of a solid recirculation system.

The CFBs have been used in several industries, particularly in those involving processes of fluid catalytic cracking (FCC). The FCC is a refining process of petroleum used to increase the gasoline production and LPG (liquefied petroleum gas) of a refinery, by the conversion of weighed fractions, proceeding from petroleum distillation (gasoil and residues), in lighter fractions.

The experiments have been led in a pilot plant installed in the Laboratory of Processes in Porous Media (LPMP) of the DTF/FEQ/UNICAMP, called Multipurpose Unit of Catalytic Cracking. Assays have been performed using air flow rates equal to 7,5m³/h, 10m³/h, 15 m³/h, 20 m³/h, 25 m³/h, 30 m³/h fed: i) in the entrance of the downer; ii) in the entrance of the “U” bend; iii) in a combination of the entrance of the downer and the entrance of the “U” bend. The solids circulation rates used for each air flow rate were equal to 0,000kg/m²s, 0,032kg/m²s, 0,076kg/m²s, 0,120kg/m²s, 0,164kg/m²s and 0,208kg/m²s fed in the entrance of the downer. Due to this experimental study, besides the pressure axial profile, a simplified pattern for the fluid-dynamics description in question was evaluated, whose results obtained for pressure difference were compared with those obtained through experiments, the latter being by the means of pressure gauge deflection.

SUMÁRIO

Resumo	xiii
Abstract	xv
Sumário	xvii
Lista de Figuras	xx
Lista de Tabelas	xxv
Nomenclatura	xxxi
 Capítulo 1. Introdução	 1
 Capítulo 2. Revisão Bibliográfica	 3
2.1. A tecnologia de craqueamento catalítico em leito fluidizado (FCC)	3
2.1.1. Histórico	3
2.1.2. Craqueamento térmico	4
2.1.3. Craqueamento catalítico	5
2.1.3.1. Craqueamento catalítico em leito fixo e leito móvel	6
2.1.3.2. Craqueamento catalítico em leito fluidizado (FCC)	7
2.2. Escoamento gás-sólido em leitos fluidizados circulantes (CFB)	9
2.3. Reatores de craqueamento catalítico em leito fluidizado (FCC): <i>riser</i> e <i>downer</i>	17
2.3.1. Queda de pressão no <i>downer</i>	21
2.3.2. Queda de pressão no <i>riser</i>	31
2.4. Transições entre os tipos de escoamento em sistemas de transporte vertical	38
2.5. Velocidade de <i>choking</i>	40
2.6. Representação do atrito na presença de sólidos	42

2.7. Tubulação curvada em leitos fluidizados circulantes (CFB)	43
2.8. Escoamento gás-sólido em uma seção de transporte pneumático horizontal	47
2.9. Escoamento gás-sólido em ciclones	49
Capítulo 3. Materiais e Métodos	53
3.1. Materiais	53
3.2. Unidade multipropósito de craqueamento catalítico	54
3.3. Instrumentação da unidade multipropósito	65
3.4. Procedimento operacional da unidade multipropósito	66
3.4.1. Partida da unidade	67
3.4.2. Operação da unidade	68
3.4.3. Parada da unidade	68
3.5. Procedimento para aquisição de dados de pressão	68
3.6. Modelo simplificado para a descrição da fluidodinâmica do escoamento gás-sólido da Unidade Multipropósito	69
Capítulo 4. Resultados e Discussões	74
4.1. Avaliação do regime de escoamento gás-sólido da Unidade Multipropósito	74
4.2. Avaliação da velocidade de choking do escoamento gás-sólido da Unidade Multipropósito	75
4.3. Avaliação dos resultados de distribuição axial de pressão estática obtidos no escoamento gás-sólido da Unidade Multipropósito	76
4.4. Avaliação dos resultados de diferença de pressão obtidos no escoamento gás-sólido da Unidade Multipropósito	92
4.5. Avaliação da região de aceleração no escoamento gás-sólido da Unidade Multipropósito	100

4.6. Avaliação da região de tubulação curvada no escoamento gás-sólido da Unidade Multipropósito	107
Capítulo 5. Conclusões e Sugestões para próximos trabalhos	109
Capítulo 6. Referências Bibliográficas	114
Apêndice A: Valores Calculados – velocidade de <i>choking</i>	120
Apêndice B: Valores Experimentais e Calculados – diferença de pressão	126
Apêndice C: Valores Calculados – comprimento da região de aceleração	187
Apêndice D: Valores Experimentais e Calculados – diferença de pressão	190
Apêndice E: Valores Experimentais e Calculados – diferença de pressão	193
Anexo A: Dados da Caracterização Física do Catalisador de FCC	205

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama esquemático da planta piloto (Lehner e Wirth, 1999)	10
Figura 2.2: Diagrama esquemático da configuração (Chen e Li, 2004)	12
Figura 2.3: Diagrama esquemático de um novo par de leitos fluidizados circulantes (Li <i>et al.</i> , 2004)	13
Figura 2.4: Localização das tomadas de pressão (Li <i>et al.</i> , 2004)	15
Figura 2.5: Diagrama esquemático do equipamento experimental (Wang <i>et al.</i> , 2005)	16
Figura 2.6: Relação entre as taxas de circulação de sólidos (Wang <i>et al.</i> , 2005)	17
Figura 2.7: Representação esquemática de uma unidade de FCC (Cremasco, 2002)	18
Figura 2.8: Representação do escoamento da fase particulada no <i>riser</i> e <i>downer</i> (Cremasco, 2002)	19
Figura 2.9: Perfil axial de pressão ($u_L = 5$ m/s, $G_s \approx 55$ kg/m ² s, $d_p = 60$ μ m) (Lehner e Wirth, 1999)	24
Figura 2.10: Perfil axial de pressão ($0 < u_L < 2,5$ m/s, $G_s \approx 70$ kg/m ² s, $v_g/v_p = 1$, $d_p = 60$ μ m) (Lehner e Wirth, 1999)	24
Figura 2.11: Perfil axial de pressão ($3,8 < u_L < 6,2$ m/s, $G_s \approx 65$ kg/m ² s, $v_g/v_p = 1$, $d_p = 60$ μ m) (Lehner e Wirth, 1999)	25
Figura 2.12: Perfil axial de pressão ($0 < u_L < 6,5$ m/s, $G_s \approx 70$ kg/m ² s, $v_g/v_p = 1$, $d_p = 130$ μ m) (Lehner e Wirth, 1999)	26
Figura 2.13: Gradiente de pressão axial para a sílica gel B (Chen e Li, 2004)	28
Figura 2.14: Gradiente de pressão axial para as partículas de vidro (Chen e Li, 2004)	28
Figura 2.15: Perfil do gradiente de pressão ao longo da coluna do downer para diferentes fluxos de circulação de sólidos (Li, Wu, Wei e Jin, 2004)	30
Figura 2.16: Perfil do gradiente de pressão ao longo da coluna do downer para	

diferentes velocidades superficiais de gás (Li, Wu, Wei e Jin, 2004)	31
Figura 2.17: Variação de G_{sl} e G_{sl} com G_{sa} . ($U_{gl} = 10$ m/s, $U_{gII} = 0,25U_{gl}$) (Wang <i>et al.</i> , 2005)	35
Figura 2.18: Variação da taxa de circulação de sólidos com a velocidade do gás ($U_{gII} = 0,25U_{gl}$) (Wang <i>et al.</i> , 2005)	36
Figura 2.19: Influência da G_{sa} na queda de pressão das duas seções ($U_{gl} = 10$ m/s, $U_{gII} = 0,25U_{gl}$) (Wang <i>et al.</i> , 2005)	37
Figura 2.20: Variação das quedas de pressão das duas seções com a velocidade do gás ($U_{gII} = 0,25U_{gl}$) (Wang <i>et al.</i> , 2005)	37
Figura 2.21: Gradiente de pressão em função da velocidade do gás (Freire <i>et al.</i> 1993)	40
Figura 3.1: Diagrama esquemático da Unidade Multipropósito, todas as unidades em mm	55
Figura 3.2: Concepção final da Unidade Multipropósito; T: termopares; P1 a P15: posição das tomadas de pressão	57
Figura 3.3: Unidade Multipropósito LPMP/DTF/FEQ/UNICAMP	59
Figura 3.4: Soprador de 10 HP (1 – amortizador de ruído; 2 – silenciador: isopor e esponja)	60
Figura 3.5: Sistema de válvulas (1 – ar principal; 2 – ar de escape, 3 – ar secundários alimentações no downer; curva, entrada e saída do riser; 4 – rotâmetros)	60
Figura 3.6: Alimentações de sólidos e de ar no downer (1 – reservatório de sólidos; 2 – alimentador de sólidos; 3 – motor do alimentador de sólidos; alimentação do downer; 4 – alimentador do ar ao downer)	61
Figura 3.7: Detalhe do alimentador de ar (dispositivo de 4 bicos)	61
Figura 3.8: Downer (1 – downer; 2 – alimentação do ar)	62
Figura 3.9: Curva em U (1 – saída do downer; 2 – válvulas de alimentação do ar aos	

bicos de alimentação de ar; 3 – entrada ao riser)	62
Figura 3.10: Riser (1 – riser; 2 – saída do riser para o ciclone; 3 – tubos de acesso aos manômetros em U)	63
Figura 3.11: Manômetros em U (existem 4 alimentações, totalizando 16 bicos de entrada de ar)	63
Figura 3.12: Topo de recirculação: (1 – saída do riser; 2 – entrada em venturi na entrada do ciclone primário; 3 – silo de carregamento; 4 – saída do ciclone primário; 5 – alimentador de sólidos; 6 – alimentação do ar na entrada do downer)	64
Figura 3.13: Ciclone secundário (1 – detalhe da tomada de pressão)	64
Figura 3.14: Curva de calibração da vazão de sólidos	66
Figura 4.1: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito. Ensaio A. Vazão de ar de $7,5\text{m}^3/\text{h}$ ($0,394\text{ m/s}$).	77
Figura 4.2: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito. Ensaio A. Vazão de ar de $10\text{m}^3/\text{h}$ ($0,526\text{ m/s}$).	77
Figura 4.3: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito. Ensaio A. Vazão de ar de $15\text{m}^3/\text{h}$ ($0,789\text{ m/s}$).	78
Figura 4.4: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito. Ensaio A. Vazão de ar de $20\text{m}^3/\text{h}$ ($1,052\text{ m/s}$).	78
Figura 4.5: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito. Ensaio A. Vazão de ar de $25\text{m}^3/\text{h}$ ($1,315\text{ m/s}$).	79
Figura 4.6: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito. Ensaio A. Vazão de ar de $30\text{m}^3/\text{h}$ ($1,578\text{ m/s}$).	79
Figura 4.7: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito. Ensaio A. Vazão de ar de $7,5\text{m}^3/\text{h}$ ($0,394\text{ m/s}$).	81
Figura 4.8: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.	

Ensaio A. Vazão de ar de $10\text{m}^3/\text{h}$ ($0,526\text{ m/s}$).	81
Figura 4.9: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.	
Ensaio A. Vazão de ar de $15\text{m}^3/\text{h}$ ($0,789\text{ m/s}$).	82
Figura 4.10: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.	
Ensaio A. Vazão de ar de $20\text{m}^3/\text{h}$ ($1,052\text{ m/s}$).	82
Figura 4.11: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.	
Ensaio A. Vazão de ar de $25\text{m}^3/\text{h}$ ($1,315\text{ m/s}$).	83
Figura 4.12: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.	
Ensaio A. Vazão de ar de $30\text{m}^3/\text{h}$ ($1,578\text{ m/s}$).	83
Figura 4.13: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.	
Ensaio B. Vazão de ar de $7,5\text{m}^3/\text{h}$ ($0,394\text{ m/s}$).	85
Figura 4.14: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.	
Ensaio B. Vazão de ar de $10\text{m}^3/\text{h}$ ($0,526\text{ m/s}$).	85
Figura 4.15: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.	
Ensaio B. Vazão de ar de $15\text{m}^3/\text{h}$ ($0,789\text{ m/s}$).	86
Figura 4.16: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.	
Ensaio B. Vazão de ar de $20\text{m}^3/\text{h}$ ($1,052\text{ m/s}$).	86
Figura 4.17: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.	
Ensaio B. Vazão de ar de $25\text{m}^3/\text{h}$ ($1,315\text{ m/s}$).	87
Figura 4.18: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.	
Ensaio B. Vazão de ar de $30\text{m}^3/\text{h}$ ($1,578\text{ m/s}$).	87
Figura 4.19: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.	
Ensaio C. Vazão de ar de $15\text{m}^3/\text{h}$ ($0,789\text{ m/s}$).	90
Figura 4.20: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.	
Ensaio C. Vazão de ar de $20\text{m}^3/\text{h}$ ($1,052\text{ m/s}$).	90

Figura 4.21: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.

Ensaio C. Vazão de ar de $25\text{m}^3/\text{h}$ ($1,315\text{ m/s}$).

91

Figura 4.22: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.

Ensaio C. Vazão de ar de $30\text{m}^3/\text{h}$ ($1,578\text{ m/s}$).

91

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Valores considerados para o fator k	34
Tabela 2.2: Principais correlações para a estimativa da velocidade de <i>chocking</i>	41
Tabela 2.3: Correlações para o fator de atrito sólido-parede (a partir de Klinzing, 1981; exceto a correlação de da Silva (1984))	42
Tabela 2.4: Influência de particulados na queda de pressão	51
Tabela 3.1: Resultados de análises de propriedades físicas do catalisador de FCC	54
Tabela 3.2: Características geométricas do sistema	56
Tabela 3.3: Posições das tomadas de pressão	65
Tabela 4.1: Definição dos ΔP s entre as tomadas de pressão.	93
Tabela 4.2: Desvios relativos médios em % dos ΔP s para a seção do <i>downer</i> .	98
Tabela 4.3: Desvios relativos médios em % dos ΔP s para a seção da curva em “U”.	98
Tabela 4.4: Desvios relativos médios em % dos ΔP s para a seção do <i>riser</i> .	98
Tabela 4.5: Desvios relativos médios em % dos ΔP s para a seção da curva em “U”.	99
Tabela 4.6: Desvios relativos médios em % dos ΔP s para o ciclone.	100
Tabela 4.7: Valores calculados da velocidade das partículas para a seção do <i>downer</i> . (Equação 4.4). Ensaio B.	103
Tabela 4.8: Valores calculados da velocidade terminal da partícula para a seção do <i>downer</i> . (Equação 4.13). Ensaio B.	104
Tabela 4.9: Desvios relativos médios em % para a seção do <i>downer</i> na região de aceleração ΔP_1 .	106
Tabela 4.10: Desvios relativos médios em % para a seção do <i>riser</i> na região de aceleração ΔP_6 .	106
Tabela 4.11: Desvios relativos médios em % dos ΔP s para a seção da curva em “U”.	108

Tabela A.1-4: Valores calculados da velocidade de <i>choking</i> para a seção do <i>riser</i> (Equação 2.11a-d). Ensaio A.	120
Tabela A.5-8: Valores calculados da velocidade de <i>choking</i> para a seção do <i>riser</i> (Equação 2.11a-d). Ensaio B.	122
Tabela A.9-12: Valores calculados da velocidade de <i>choking</i> para a seção do <i>riser</i> (Equação 2.11a-d). Ensaio C.	124
Tabela B.1-7: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do <i>downer</i> (Equação 2.12a-g para f_p). Ensaio A.	126
Tabela B.8-14: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em "U" (Equação 2.12a-g para f_p). Ensaio A.	133
Tabela B.15: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em "U" (Equação 2.16 para f_p). Ensaio A.	136
Tabela B.16-22: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do <i>riser</i> (Equação 2.12a-g para f_p). Ensaio A.	137
Tabela B.23: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do ciclone (Equação 2.27 com constantes de Briggs (1946)). Ensaio A.	144
Tabela B.24: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do ciclone (Equação 2.27 com constantes de Casal (1988)). Ensaio A.	144
Tabela B.25: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do ciclone (Equação 2.27 com constantes de Comas (1991)). Ensaio A.	145
Tabela B.26: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do ciclone (Equação 2.27 com constantes de Sheid e Massarani (1992)). Ensaio A.	145

Tabela B.27-33: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do <i>downer</i> (Equação 2.12a-g para f_p). Ensaio B.	146
Tabela B.34-40: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12a-g para f_p). Ensaio B.	153
Tabela B.41: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.16 para f_p). Ensaio B.	156
Tabela B.42-48: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do <i>riser</i> (Equação 2.12a-g para f_p). Ensaio B.	157
Tabela B.49: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do ciclone (Equação 2.27 com constantes de Briggs (1946)). Ensaio B.	164
Tabela B.50: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do ciclone (Equação 2.27 com constantes de Casal (1988)). Ensaio B.	164
Tabela B.51: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do ciclone (Equação 2.27 com constantes de Comas (1991)). Ensaio B.	165
Tabela B.52: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do ciclone (Equação 2.27 com constantes de Sheid e Massarani (1992)). Ensaio B.	165
Tabela B.53-59: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do <i>downer</i> (Equação 2.12a-g para f_p). Ensaio C.	166
Tabela B.60-66: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12a-g para f_p). Ensaio C.	173
Tabela B.67: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença	

de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.16 para f_p). Ensaio C.	176
Tabela B.68-74: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do <i>riser</i> (Equação 2.12a-g para f_p). Ensaio C.	177
Tabela B.75: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do ciclone (Equação 2.27 com constantes de Briggs (1946)). Ensaio C.	184
Tabela B.76: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do ciclone (Equação 2.27 com constantes de Casal (1988)). Ensaio C.	184
Tabela B.77: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do ciclone (Equação 2.27 com constantes de Comas (1991)). Ensaio C.	185
Tabela B.78: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do ciclone (Equação 2.27 com constantes de Sheid e Massarani (1992)). Ensaio C.	185
Tabela B.79: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 4.15 para f_p). Ensaio A.	186
Tabela B.80: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 4.15 para f_p). Ensaio B.	186
Tabela B.81: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 4.15 para f_p). Ensaio C.	186
Tabela C.1: Resultados calculados do comprimento da região de aceleração para a seção do <i>downer</i> . Ensaio A.	187
Tabela C.2: Resultados calculados do comprimento da região de aceleração para a seção do <i>riser</i> . Ensaio A.	187

Tabela C.3: Resultados calculados do comprimento da região de aceleração para a seção do <i>downer</i> . Ensaio B.	188
Tabela C.4: Resultados calculados do comprimento da região de aceleração para a seção do <i>riser</i> . Ensaio B.	188
Tabela C.5: Resultados calculados do comprimento da região de aceleração para a seção do <i>downer</i> . Ensaio C.	189
Tabela C.6: Resultados calculados do comprimento da região de aceleração para a seção do <i>riser</i> . Ensaio C.	189
Tabela D.1: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do <i>downer</i> na região de aceleração $\Delta P1$ (Equação 2.12c para f_p). Ensaio A.	190
Tabela D.2: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do <i>riser</i> na região de aceleração $\Delta P6$ (Equação 2.12g para f_p). Ensaio A.	190
Tabela D.3: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do <i>downer</i> na região de aceleração $\Delta P1$ (Equação 2.12c para f_p). Ensaio B.	191
Tabela D.4: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do <i>riser</i> na região de aceleração $\Delta P6$ (Equação 2.12g para f_p). Ensaio B.	191
Tabela D.5: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do <i>downer</i> na região de aceleração $\Delta P1$ (Equação 2.12c para f_p). Ensaio C.	192
Tabela D.6: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do <i>riser</i> na região de aceleração $\Delta P6$ (Equação 2.12g para	

f_p). Ensaio C.	192
Tabela E.1-7: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12a-g para f_p). Ensaio A.	193
Tabela E.8: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 4.15 para f_p). Ensaio A.	196
Tabela E.9-15: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12a-g para f_p). Ensaio B.	197
Tabela E.16: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 4.15 para f_p). Ensaio B.	200
Tabela E.17-23: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12a-g para f_p). Ensaio C.	201
Tabela E.24: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 4.15 para f_p). Ensaio C.	204

NOMENCLATURA

Letras latinas

A – área da seção transversal da tubulação, (L^2);

B_C – largura do duto de entrada do ciclone, (L);

C_D – coeficiente de arraste, adimensional;

C_{Ds} – coeficiente de arraste do sólido, adimensional;

C_M – concentração mássica de sólidos, (M de sólidos/ M do fluido);

C_V – concentração volumétrica de sólidos, (L^3 de sólidos/ L^3 do fluido);

D – diâmetro interno da tubulação, (L);

D_C – diâmetro do corpo cilíndrico do ciclone, (L);

D_T – diâmetro interno do *riser*, (L);

dh – gradiente de altura da seção medida, (L);

d_p – diâmetro das partículas, (L);

dP – gradiente de pressão, ($M.L^{-1}.T^{-2}$);

dP_f – gradiente de pressão devido ao atrito da parede da tubulação, ($M.L^{-1}.T^{-2}$);

dU_p – gradiente de velocidade das partículas, ($L.T^{-1}$);

f – fator de atrito de Fanning, adimensional;

f_f – fator de atrito do fluido, adimensional;

$f_{f,w}$ – fator de atrito devido ao atrito do fluido com a parede, adimensional;

f_p – fator de atrito das partículas, adimensional;

$f_{p,w}$ – fator de atrito devido ao atrito das partículas com a parede, adimensional;

g – aceleração da gravidade, ($L.T^{-2}$);

G_s – fluxo mássico de sólidos, ($M.L^{-2}.T^{-1}$);

G_{sa} – fluxo mássico de sólidos, ($M.L^{-2}.T^{-1}$);

- h – comprimento da seção horizontal, (L);
 h – comprimento da seção vertical, (L);
 H – distância axial a partir da entrada do *downer*, (L);
 H – altura vertical do *riser*, (L);
 H_C – altura do duto de entrada do ciclone, (L);
 k – curvatura de entrada da mistura gás-sólido no *riser*, (graus);
 K – rugosidade equivalente da parede da tubulação, (L);
 L – comprimento da tubulação, (L);
 L_{ac} – comprimento da região de aceleração, (L);
 L_{eq} – comprimento equivalente, (L);
 P – pressão, (M.L⁻¹.T⁻²);
 Q – vazão volumétrica do fluido, (L³.T⁻¹);
 Q_p – vazão volumétrica das partículas, (L³.T⁻¹);
 R_c – raio de curvatura da tubulação (L);
 $\bar{r}$ – raio de curvatura médio da tubulação, (L);
 T – temperatura, (°);
 $\bar{u}$ – velocidade média do fluido na seção de entrada do ciclone, (L.T⁻¹);
 u – velocidade superficial do gás, (L.T⁻¹);
 U – velocidade relativa partículas-fluido, (L.T⁻¹);
 u_g – velocidade superficial do gás, (L.T⁻¹);
 u_L – velocidade superficial do gás, (L.T⁻¹);
 u_p – velocidade das partículas, (L.T⁻¹);
 u_s – velocidade dos sólidos, (L.T⁻¹);
 u_t – velocidade terminal, (L.T⁻¹);
 U_T – velocidade terminal, (L.T⁻¹);

U_1 – velocidade superficial do gás no *riser* A e no *downer*, ($L.T^{-1}$);

U_2 – velocidade superficial do gás no *riser* B, ($L.T^{-1}$);

V_c – velocidade crítica de transporte vertical, ($L.T^{-1}$);

V_{ch} – velocidade de *choking*, ($L.T^{-1}$);

V_f – velocidade do fluido, ($L.T^{-1}$);

v_g – velocidade da mistura gás-sólido na região anular do tubo secundário, ($L.T^{-1}$);

V_g – velocidade do gás, ($L.T^{-1}$);

v_p – velocidade do gás na região central do tubo primário, ($L.T^{-1}$);

V_p – velocidade das partículas, ($L.T^{-1}$);

V_{salt} – velocidade de *saltation*, ($L.T^{-1}$);

V_t – velocidade terminal de uma única partícula no gás, ($L.T^{-1}$);

W – fluxo mássico de sólidos, ($M.L^{-2}.T^{-1}$);

z – comprimento linear da tubulação (L);

Letras gregas

α – termo de contribuição da força de arraste no escoamento, ($M.L^{-3}.T^{-1}$);

β – constante para classificação de ciclones, adimensional;

ΔP – variação de pressão do sistema, ($M.L^{-1}.T^{-2}$);

ΔP – variação de pressão do fluido, Eq. 2.20 e 2.21, ($M.L^{-1}.T^{-2}$);

ΔP_{ac} – variação de pressão devido à aceleração das partículas, ($M.L^{-1}.T^{-2}$);

ΔP_{curva} – variação de pressão da tubulação curvada, ($M.L^{-1}.T^{-2}$);

ΔP_D – variação de pressão devido à presença das partículas, ($M.L^{-1}.T^{-2}$);

ΔP_{fr} – variação de pressão devido ao atrito da parede da tubulação, ($M.L^{-1}.T^{-2}$);

$\Delta P_{fr,f}$ – variação de pressão causada pelo atrito na fase fluida, ($M.L^{-1}.T^{-2}$);

$\Delta P_{fr,p}$ – variação de pressão causada pelo atrito na fase sólida, ($M.L^{-1}.T^{-2}$);

- $\Delta P_{gr,f}$ – variação de pressão causada pela ação da gravidade na fase fluida, $(M.L^{-1}.T^{-2})$;
- $\Delta P_{gr,p}$ – variação de pressão causada pela ação da gravidade na fase sólida, $(M.L^{-1}.T^{-2})$;
- ΔP_{reta} – variação de pressão do comprimento equivalente de tubulação reta, $(M.L^{-1}.T^{-2})$;
- ε – porosidade do leito, adimensional;
- ε_{ch} – porosidade do leito à velocidade de *choking*, adimensional;
- ε_s – média local do *holdup* dos sólidos, adimensional;
- θ – deslocamento angular, (graus);
- μ – viscosidade dinâmica do fluido, $(M.L^{-1}.T^{-1})$;
- ν – viscosidade cinemática do fluido, $(L^2.T^{-1})$;
- ρ – massa específica, $(M.L^{-3})$;
- ρ_f – massa específica do fluido, $(M.L^{-3})$;
- ρ_p – massa específica da partícula, $(M.L^{-3})$;
- σ – desvio padrão, adimensional;

Subscritos

- a – partículas adicionais;
- ac – aceleração;
- c – tubulação curvada;
- C – ciclone;
- calc – valor calculado por correlação;
- ch – *choking*;
- D – valor devido à presença de partículas;
- exp – valor experimental;
- f – fluido (ar);
- fr – atrito;

g – gás;

gr – gravidade;

M – valor mássico;

p – partícula;

s – sólido;

salt – *saltation*;

t – terminal;

T – tubulação;

V – valor volumétrico;

w – parede;

I – seção I do *riser*;

II – seção II do *riser*;

ΔP – variação de pressão do sistema;

Números Adimensionais

Dean – número de Dean;

Re – número de Reynolds;

Re_p – número de Reynolds da partícula;

Abreviações

BPDO – barris por dia de operação;

CENPES – Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello;

CFB – leitos fluidizados circulantes;

CFD – “Computational Fluid Dynamics” ou fluidodinâmica computacional;

CTE – Chumbo Tetra-Etila;

DETF – Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos;
DTF – Departamento de Termofluidodinâmica;
DO – dia de operação;
EUA – Estados Unidos da América do Norte;
FCC – craqueamento catalítico em leito fluidizado;
FEM – Faculdade de Engenharia Mecânica;
FEQ – Faculdade de Engenharia Química;
HDCFB – leito fluidizado circulante em sistemas densos;
LCPP – Laboratório de Análise e Caracterização de Produtos e Processos;
LDA – “Laser Doppler Anemometer”;
LDV – “Laser Doppler Velocimetry”;
LPMP – Laboratório de Processos em Meios Porosos;
MIP – Maximização de Iso-Parafinas
PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.;
REPLAN – Refinaria do Planalto Paulista;
RFCC – craqueamento catalítico fluidizado de óleo residual;
SIX – Superintendência de Industrialização do Xisto;
TC – Tomografia Computadorizada de raio-X;
TCC – processo “thermofor” de craqueamento catalítico;
UFCC – unidade de craqueamento catalítico em leito fluidizado;
UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas;
VC – volume de controle;

1. Introdução

Os leitos fluidizados circulantes (CFB) são utilizados em diversas indústrias, particularmente naquelas que envolvem processos de craqueamento catalítico (FCC). O FCC é um processo de refino de petróleo utilizado para aumentar a produção de gasolina e GLP (gás liquefeito de petróleo) de uma refinaria, por meio da conversão de frações pesadas, provenientes da destilação do petróleo (gasóleo e resíduos), em frações mais leves.

Este processo é largamente utilizado em todo o mundo, uma vez que a demanda de gasolina em vários países é superior à dos óleos combustíveis. O craqueamento catalítico corrige a defasagem da produção de gasolina e GLP, reduzindo a diferença entre a quantidade obtida diretamente do petróleo e a requerida pelo mercado mundial crescente. De maneira bastante simplificada, o processo de craqueamento ocorre em um reator, onde há a ação do catalisador; um ciclone, para separar as partículas de catalisador dos produtos; e um regenerador, onde estas partículas são reativadas pela queima do coque depositado sobre sua superfície.

Quanto ao contato gás-sólido na tecnologia FCC, existem dois tipos de reatores utilizados na indústria: o *riser* e o *downer*. O reator *riser* se caracteriza como uma seção de transporte vertical em que há o contato concorrente entre as fases, escoando contra a ação gravitacional. Já o reator *downer* consiste numa tecnologia FCC de reatores tubulares com escoamento descendente e concorrente de catalisadores (fase particulada) e dos reagentes (fase fluida). Tem-se no *downer* uma distribuição mais uniforme da concentração de catalisador, na direção radial em uma dada seção transversal do equipamento. Com isto, há menor segregação radial e axial das fases fluida e particulada com o comportamento do escoamento próximo ao de um fluxo empistonado, ocasionando menor distribuição de tempo de residência dos particulados quando comparado ao do *riser*.

Através de um leito fluidizado circulante é possível estudar em um mesmo sistema, além da fluidodinâmica dos reatores *downer* e *riser*, uma seção que os une assim como um sistema de recirculação de sólidos. Apesar de a técnica FCC utilizando o *riser* apresentar inúmeros estudos, o mesmo não se pode dizer sobre o *downer*, e muito menos sobre a seção de união entre estes reatores. Como decorrência, quase não se encontram na literatura trabalhos que descrevam a fluidodinâmica do escoamento gás-sólido ao longo de

todo o leito fluidizado circulante. Neste sentido abre-se um enorme campo de pesquisa, visando o estudo do CFB como um sistema único.

Desta maneira, a presente dissertação tem por objetivo apresentar resultados relativos à distribuição axial de pressão estática ao longo de um leito fluidizado circulante para diversos valores de velocidade de gás e fluxo mássico de sólidos; para tanto, avalia-se a influência da concentração de sólidos presente em um escoamento gás-sólido na unidade piloto do Laboratório de Processos em Meios Porosos (LPMP) da DTF/FEQ/UNICAMP. Além disso, é avaliado um modelo simplificado para a descrição da fluidodinâmica em questão, cujos resultados obtidos para diferença de pressão são comparados com aqueles obtidos de forma experimental, estes por meio de deflexão manométrica.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura onde é feita uma abordagem dos principais trabalhos relacionados ao desenvolvimento e projeto da tecnologia de craqueamento catalítico.

No capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos empregados durante o trabalho, que culminou na confecção desta dissertação. Neste item é demonstrada a Unidade Multipropósito de Craqueamento Catalítico do LPMP da FEQ/UNICAMP, em relação a cada parte que a compõe, bem como mostra-se também a metodologia empregada para o início das coletas de dados.

No capítulo 4 são apresentados todos os resultados obtidos com a coleta de dados. Ou seja, neste capítulo encontram-se todos os perfis e queda/ganho de pressão em cada seção da unidade. Ainda, neste, pode-se notar ao que se refere à queda/ganho de pressão, as observações feitas pelos principais pesquisadores da área.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões sobre o trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta a Revisão Bibliográfica desenvolvida para esta dissertação. Os trabalhos de maior relevância são apresentados, tais como a descrição do processo de craqueamento catalítico, uma comparação entre alguns equipamentos de leitos circulantes, apresentando as vantagens e desvantagens de cada leito e localizando a importância dos mesmos para o processo de craqueamento catalítico. Tendo em vista que o presente trabalho destina-se principalmente à avaliação da queda de pressão em um leito circulante, um enfoque maior é dado para trabalhos desta natureza em virtude dos objetivos da dissertação.

2.1. A tecnologia de craqueamento catalítico em leito fluidizado (FCC)

2.1.1. Histórico

Em toda a história do refino de petróleo, o craqueamento catalítico (também denominado quebra ou desintegração catalítica) tem tido, sem lugar a dúvidas, o desenvolvimento mais importante. O craqueamento catalítico não foi uma invenção propriamente dita, e sim o resultado de mais de 70 anos de ininterrupto aperfeiçoamento da destilação e do craqueamento térmico de gasóleo cru com o objetivo de obter produtos mais leves e mais valiosos (Blazeck, 1971).

O objetivo do processo de craqueamento catalítico é transformar grandes moléculas de hidrocarbonetos em moléculas pequenas. Em uma refinaria de petróleo, esse processo visa a transformação das moléculas de ponto de ebulição da faixa do gasóleo (210-540°C), em outras de ponto de ebulição da faixa da gasolina e de hidrocarbonetos mais leves (160-220°C). Estas moléculas menores de hidrocarbonetos são mais valiosas do que o gasóleo original do qual derivam (Blazeck, 1971).

O processo anteriormente utilizado era o de craqueamento térmico do gasóleo, no qual se trabalhava em condições de altas temperaturas e pressões, produzindo-se gasolina de baixa qualidade, muito gás e grande quantidade de resíduo somente utilizável como óleo combustível pesado (Blazeck, 1971).

A descoberta de catalisadores tornou possível a redução de pressões e de temperaturas, bem como a melhoria na qualidade dos produtos obtidos no processo. O

catalisador é um material que influencia a velocidade das reações sem se modificar com isto. Os catalisadores usados inicialmente eram constituídos de uma argila de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3). Este catalisador era colocado em um reator de leito fixo por onde passava o gasóleo quente que se pretendia processar. Embora o catalisador não tivesse sua constituição alterada, formava sobre ele, no processo, uma camada de coque que reduzia sua atividade. Periodicamente, o processo tinha de ser interrompido para a regeneração do catalisador pela queima do coque (Grace Co., 1993).

Diversos processos foram desenvolvidos, visando obter-se uma operação contínua, na qual o catalisador pudesse circular da zona de reação para a de regeneração e vice-versa. Tentou-se o transporte por caçambas, por ar usando partículas menores e, finalmente, o fluidizado. Para a fluidização, necessita-se ter o catalisador finamente dividido quase sob a forma de pó. Nestas condições ele é capaz de escoar como um fluido, desde que algum gás o atravesse a uma velocidade de arraste determinada (Grace Co., 1993).

2.1.2. Craqueamento Térmico

A primeira referência escrita do craqueamento térmico remonta aos princípios do século XIX, quando os antigos químicos da época deram conta, como curiosidade, do craqueamento de óleos animais e sua conversão em produtos mais leves. Em torno de 1850, na Grã-Bretanha, se expediram patentes para um processo de destilação a pressões e temperaturas elevadas, que incrementava o rendimento de querosene a partir do petróleo. Meio século depois, a crescente demanda de gasolina estimulou os processos de craqueamento em "bateladas". O primeiro deles, de êxito comercial, foi o do Dr. W.M. Burton da STANDARD OIL COMPANY. Este processo foi o protótipo de muitos outros métodos comerciais de craqueamento térmico que se desenvolveram para satisfazer a demanda mundial de gasolina, de 1915 a 1943. Em 1943, aproximadamente 50% da gasolina produzida nos EUA se obtinha por craqueamento térmico (Blazek, 1971).

Basicamente, o craqueamento térmico requeria a destilação do gasóleo cru, seguida de aquecimento da fração mais pesada e sua remoção em um vaso próprio. Os produtos leves se extraíam no topo e o coque se deixava acumular no vaso. Os produtos

pesados que saíam no fundo podiam ser reciclados, caso se desejasse. As condições operacionais eram de 20 a 40 kgf/cm² de pressão e 500°C de temperatura (Blazeck, 1971).

Alguns dos processos eram de simples coqueificação, especialmente no princípio, e os mesmos deviam parar periodicamente para remoção do coque. Outros, como o mais recente denominado DUBBS, eram mais ou menos contínuos, já que o craqueamento de matérias-primas relativamente limpas se efetuava na fase vapor, nos tubos de um forno, de maneira que o resíduo pesado era retirado continuamente do sistema (Blazeck, 1971).

O craqueamento térmico, em termos gerais, compreende desidrogenação, polimerização, isomerização e muitas outras reações. Sem dúvida, a reação principal é a formação de um radical livre, mediante a união ao acaso de um átomo de hidrogênio com outro radical livre, seguido de ruptura da cadeia no ponto em que se encontra o átomo de carbono deficiente de hidrogênio. Por isto, no produto resultante do craqueamento térmico havia hidrocarbonetos de todos os tamanhos imagináveis de cadeias. Os radicais livres, além do mais, se desidrogenam e formam olefinas e diolefinas. E estas podem se isomerizar ou polimerizar. Os naftênicos não se convertem em aromáticos, mas as cadeias laterais de aromáticos podem sofrer quebras, se estas possuírem mais de um átomo de carbono (Blazeck, 1971).

Conforme as características e o tipo de carga, e de acordo com as condições operacionais que se empregam, o craqueamento térmico pode ser usado para reformar naftas e reduzir o ponto de fluidez de óleos pesados obtidos na destilação atmosférica. É usado também para coqueificar resíduos pesados de destilação atmosférica e a vácuo (Blazeck, 1971).

2.1.3. Craqueamento Catalítico

Antes do craqueamento térmico se tornar comum (por volta de 1913), a gasolina era obtida em quantidade por meio da destilação direta. O rendimento atingia 20% da carga e o número de octanas era de apenas 50-55. Com a introdução do craqueamento térmico e do chumbo tetra-etila (CTE) em 1925, o rendimento e a qualidade da gasolina aumentaram notavelmente. Em 1935, o rendimento potencial era de 60% da carga em volume e o número de octanas máximo chegava a 79. Sem dúvida, a gasolina obtida por craqueamento

térmico trouxe dois problemas: alto teor de olefinas e diolefinas (compostos formadores de goma) e pouca susceptibilidade ao CTE. O momento era propício para um aperfeiçoamento do processo de craqueamento, e o aumento da demanda gerado pela Segunda Guerra Mundial assim o exigia (Abadie, 1997).

2.1.3.1. Craqueamento Catalítico em leito fixo e leito móvel

O uso de catalisadores ácidos para modificar o rendimento e a qualidade dos produtos craqueados havia sido descoberto bem antes (Blazeck, 1971).

A.M. Mc Afee, da GULF OIL, havia tentado desenvolver, no ano de 1915, um processo comercial que empregava catalisador de cloreto de alumínio, pressão atmosférica e temperatura de aproximadamente 260/288°C (Blazeck, 1971).

A reação era boa, mas o processo falhava, pois era muito difícil recuperar do resíduo o catalisador, que era bastante caro (Blazeck, 1971).

O primeiro processo comercial apareceu 20 anos mais tarde, quando Eugene Houdry (da SOCONY VACCUUM e depois da SUN OIL) desenvolveu um processo que usava uma argila ativada (material acidificado de sílica alumina) num leito craqueador fixo. Houdry descobriu também que o depósito de carbono que se formava na argila durante a reação podia queimar-se para regenerar o catalisador, ou seja, restaurar sua atividade (Wilson, 1997).

Em 1943 já existiam 24 Unidades Houdry, em operação ou construção, com uma capacidade total de 300.000 BPDO (47.700 m³/DO). O processo era cíclico e compreendia um ciclo de reação de 10 minutos, outro de 10 minutos para mudança das válvulas e purga e outro de 10 a 20 minutos para queimar o carbono, conforme a composição da carga. Para extrair calor durante a queima e transferi-lo durante o ciclo de reação era usado um sistema de termopermuta de sal derretido (Blazeck, 1971).

A SOCONY VACCUUM, que várias vezes esteve com a SUN HOUDRY no fim da década de 30, desenvolveu seu próprio processo: o TCC (Processo Thermofofor de Craqueamento Catalítico) (Goodall, 1961).

O processo usava um leito móvel de catalisador que descia por gravidade através da zona de reação, subia em um elevador de caçamba, caía por gravidade em um

forno onde se queimava o depósito de carbono, e logo voltava a subir em um elevador de caçambas. No início, utilizava-se um catalisador granular e posteriormente, passaram a ser usadas pequenas esferas de argila. Em 1943, as Unidades de TCC craqueavam 300.000 BPDO ($47.700 \text{ m}^3/\text{DO}$) de gasóleo (Goodall, 1961).

Outro processo de leito fixo digno de nota é o Cycloversion, da PHILIPS PETROLEUM COMPANY, que usava catalisador de bauxita (alumina), mas não chegou a ser tão comercial como os outros já citados (Wilson, 1997).

2.1.3.2. Craqueamento Catalítico em leito fluidizado (FCC)

As unidades de craqueamento catalítico de leito móvel foram de certo modo verdadeiras maravilhas mecânicas, dados os dispositivos e sistemas mecânicos que se inventaram para fazer frente aos problemas de deslocamento de catalisador, de termopermuta e de erosão. Sem dúvida, foram estes problemas que levaram a STANDARD OIL Co., de Nova Jersey, a investigar os sistemas que empregavam óleo misturado com catalisador finamente dividido. O êxito inicial deste método em reatores de serpentina conduziu a maiores estudos de sistemas de fase mista (vapores e sólidos). E estes estudos, por sua vez, levaram ao desenvolvimento de um processo que haveria de se converter no craqueamento catalítico tipo fluido – desenvolvimento mais surpreendente do refino do petróleo. Este invento foi possível quando se determinou que o grau de deslizamento entre os gases e os sólidos era suficiente para estabelecer leitos fluidizados e, mais importante ainda, as leis da dinâmica de fluidos se aplicam perfeitamente aos leitos fluidizados (Blazeck, 1971).

Foi descoberto que se podia estabelecer uma diferença de densidade entre dois trechos de um sistema de sólidos fluidizados, tal como ocorre com fluidos reais, e que o fluxo podia ser controlado mediante queda de pressão através de uma válvula. Descoberto este princípio básico, a comercialização da invenção do FCC não tardou. A repentina necessidade dos EUA de contar com grandes volumes de gasolina de alta octanagem durante a Segunda Guerra Mundial, deu ímpeto adicional ao processo. Em consequência desta necessidade, o governo americano decretou através da famosa "Resolução 41" a fusão geral de todas as patentes de tecnologia de craqueamento catalítico, expedida a diversas

companhias. A fusão permaneceu vigente até o sétimo ano após o término da guerra (Blazeck, 1971).

Ainda que a STANDARD OIL DEVELOPMENT of NEW JERSEY tenha criado o processo conjuntamente com a M.W. KELLOGG e a STANDARD OIL of INDIANA, outras empresas contribuíram notavelmente com a pesquisa e o desenvolvimento deste processo, entre elas: ANGLO-IRANIAN OIL, SHELL, TEXACO e a UNIVERSAL OIL PRODUCTS (Blazeck, 1971).

A primeira unidade tipo fluido entrou em operação em maio de 1942, na refinaria de Baton Rouge, Louisiana, da STANDARD OIL Co. of NEW JERSEY, com catalisador moído de sílica-alumina (13% de sílica) fabricado pela DAVIDSON CHEMICAL Co. em sua planta de Curtiss Bay, Maryland (Blazeck, 1971).

Alguns dos modelos iniciais de FCC tendiam a ser muito complexos, mas os princípios básicos de operação comercial se explicam melhor estudando-se o processo de uma das primeiras unidades da STANDARD OIL Co. of NEW JERSEY (Blazeck, 1971).

Nesta unidade, o catalisador quente que flui para o reator entra em contato com o gasóleo (carga) e o vaporiza. O craqueamento ocorre no reator à temperatura de 840 a 970°F (449 a 521°C) e conduz a um acúmulo de 1 a 2% em peso de coque no catalisador fluidizado. O catalisador gasto passa por um separador anular onde o gasóleo arrastado é removido por injeção de vapor. O catalisador gasto e já retificado flui constantemente através de uma válvula corrediça e cai numa corrente de ar que o leva até o regenerador. A queima do carbono se inicia neste tubo (stand-pipe) e prossegue no regenerador onde o leito fluidizado se mantém a 1.100-1.300°F (593-704°C). O catalisador regenerado, que contém de 0,1 a 0,4% em peso de coque, passa por uma válvula corrediça e se une ao fluxo de carga iniciando um novo ciclo. Tanto os gases da combustão como os produtos craqueados saem de seus respectivos vasos, passando através de ciclones que retêm o catalisador arrastado e o devolvem ao leito fluidizado (Blazeck, 1971).

Nos últimos anos, muitos autores vêm estudando o processo de FCC na UNICAMP. Dentre eles, pode-se citar no DETF/FEM Goldstein Jr. *et al.* (1989) e Pécora e Goldstein Jr. (1996) que atuam em projetos envolvendo plantas piloto de craqueamento catalítico de petróleo, contribuindo para o estudo experimental da fluidodinâmica do sistema e o aprimoramento tecnológico das plantas. Do mesmo modo, no DPQ/FEQ Rosa

et al. (2002) desenvolvem projetos por meio da aplicação de técnicas CFD na simulação de reações de FCC, contribuindo para o aperfeiçoamento destas reações.

2.2. Escoamento gás-sólido em leitos fluidizados circulantes (CFB)

A tecnologia de leitos fluidizados circulantes (CFB) é altamente utilizada em diversos tipos de indústrias, em particular na petroquímica e em processos de craqueamento catalítico (FCC), uma etapa essencial para o refino do petróleo. Normalmente, essas reações são acompanhadas de reações consecutivas e reações laterais, que são bastante indesejadas para o processo. Dessa forma, a otimização do processo e sua eficiência estão intimamente relacionadas ao controle das condições reacionais, dentre elas a temperatura, pressão, tempo de residência e as condições fluidodinâmicas do escoamento (Lehner, 1999).

Como pode-se notar, o craqueamento catalítico visando a produção de gasolina, é acompanhado por reações que diminuem a seletividade, bem como a efetividade de produção. Dessa maneira, a definição de um projeto é fundamental para garantir o aumento da qualidade do produto. Por outro lado, a unidade a ser projetada deve ser flexível o suficiente para que se possa avaliar um amplo estudo de variáveis, particularmente, em se tratando de concentração de sólidos.

Lehner e Wirth (1999) fizeram estudos dos perfis radial e axial de pressão, concentração e velocidade do particulado no *downer*, variando as vazões, velocidades de alimentação e diâmetro das partículas, o que permitiu uma análise qualitativa da influência de cada variável. A planta piloto utilizada para esse estudo é mostrada esquematicamente na Figura 2.1, constituída basicamente de uma alimentação por um distribuidor gás-sólido, um *downer* feito de aço inoxidável de 8,6 m de comprimento e 150 mm de diâmetro interno, um sistema de separação gás-sólido e realimentação de sólidos e sondas para análise dos perfis de concentração, velocidade e pressão. As técnicas de análise foram: tomografia computadorizada de raio-X, para análises de concentração local de sólidos, e técnica de LDV (laser-dopler velocimetry), para medida de velocidade das partículas.

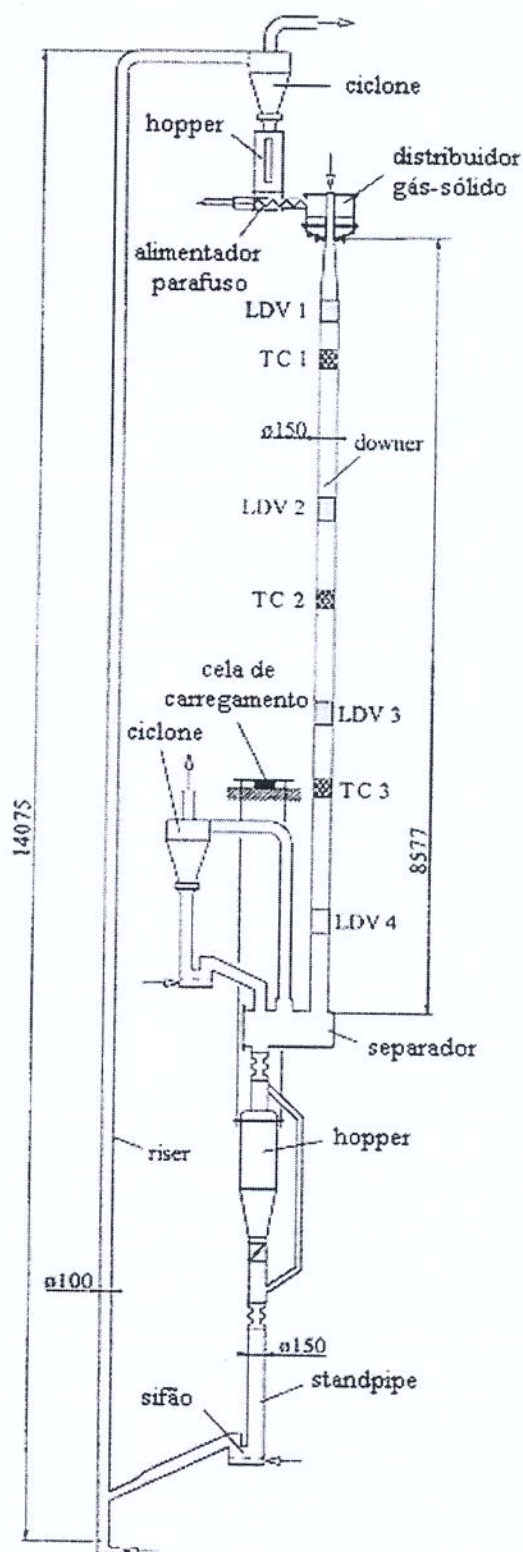


Figura 2.1: Diagrama esquemático da planta piloto (Lehner e Wirth, 1999).

Para as distâncias de 1,3 m (TC elevação 1), 3,9 m (TC elevação 2) e 6,1 m (TC elevação 3) os tubos de aço inoxidável foram substituídos por tubos de acrílico de

comprimento igual a 200 mm. Os tubos de acrílico eram necessários para a operação da tomografia computadorizada de raio-X. Tubos de vidro adicionais de comprimento igual a 250 mm foram instalados para as distâncias de 0,8 m (LDV elevação 1), 3,0 m (LDV elevação 2), 5,3 m (LDV elevação 3) e 7,6 m (LDV elevação 4), respectivamente. Com esses tubos conseguia-se acesso óptico ao escoamento gás-sólido, necessário para as medidas LDV.

Os sólidos são estocados em um *hopper* no topo da planta e transportados para o distribuidor gás-sólido em um alimentador tipo parafuso. Após deixar o distribuidor gás-sólido, gás e sólidos entram no *downer*. No fundo do *downer* gás e sólidos são separados em um separador de 2 estágios. O primeiro estágio consiste em um separador do tipo inércia (Gartside, 1989). No segundo estágio os sólidos remanescentes são separados do gás em um ciclone. A saída desta unidade de separação é conectada a um *hopper* que pode ser fechado por uma válvula de acionamento rápido instalada em seu fundo. O *hopper* é instalado sobre uma cela de carregamento para medir a vazão mássica de sólidos. Fechando-se a válvula por um curto período de tempo os sólidos são armazenados no *hopper* e a massa deste aumenta. Este aumento é registrado na dependência do tempo. Com o aumento da massa no *hopper* e sua respectiva duração, a vazão de sólidos no *downer* pode ser determinada. Esta seção do *downer* é seguida por um *standpipe* e por um sifão agindo como uma trava de pressão entre o *downer* e o *riser*. Do sifão os sólidos são alimentados no *riser* onde eles são transportados verticalmente. No topo do *riser* os sólidos são separados do escoamento de gás em um segundo ciclone e armazenados no *hopper*. Com este arranjo, um “loop” fechado para circulação de sólidos é realizado.

Chen e Li (2004) caracterizaram os perfis do gradiente de pressão axial de um reator tipo *downer* em um leito fluidizado circulante de alta densidade (HDCFB), conforme diagrama esquemático da Figura 2.2. O sistema consiste, no lado esquerdo, de um *downer* (5,6 m de altura por 80 mm de diâmetro interno) seguido por um separador de fundo e por um leito móvel vedado (3 m de altura por 120 mm de diâmetro interno) que alimenta partículas sólidas no *riser* (12 m de altura por 120 mm de diâmetro interno), localizado no lado direito do sistema.

O ar que deixa o topo do *riser* segue primeiro para um separador por inércia para remover a maior parte de partículas e então, para um ciclone, para remover o restante.

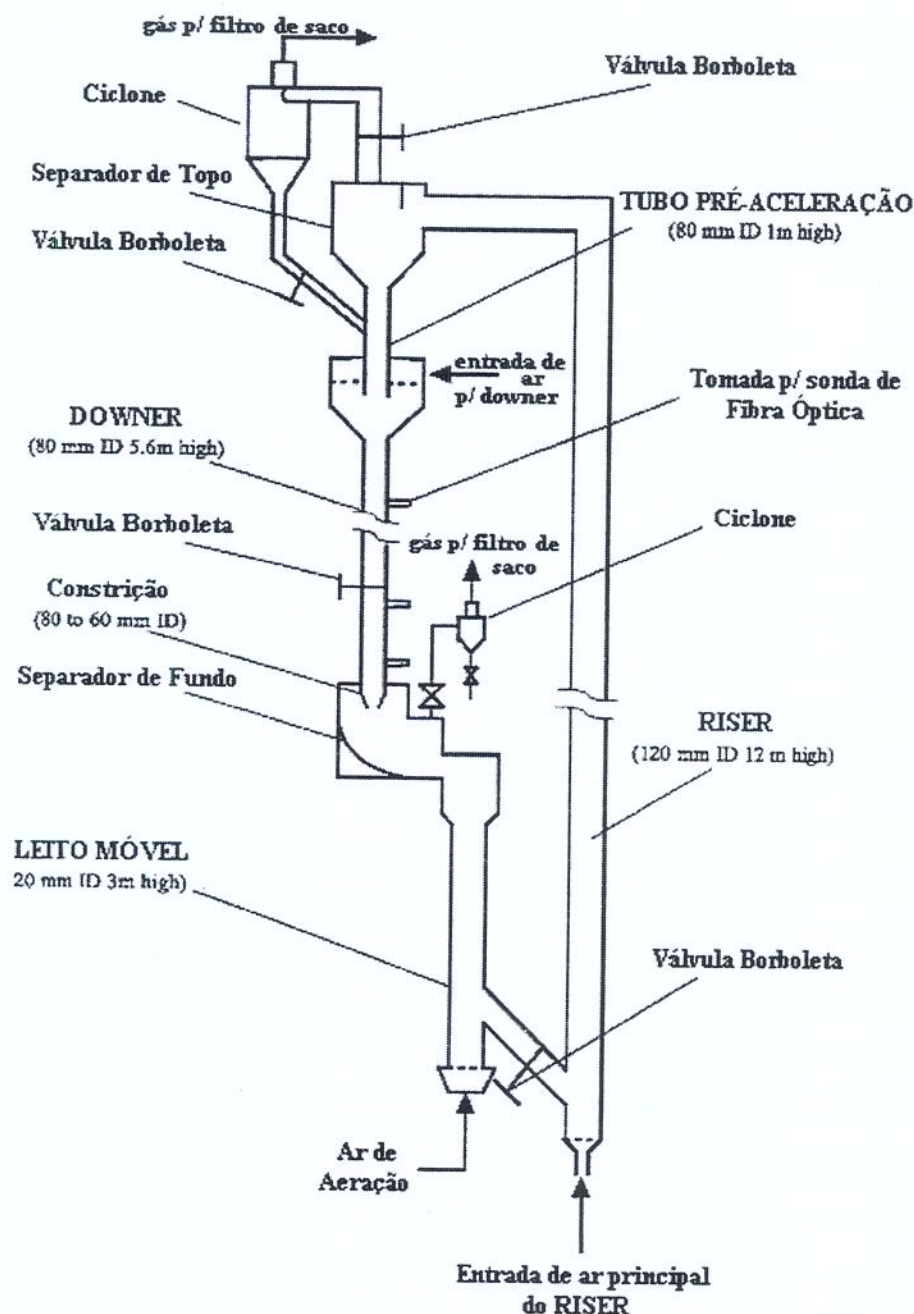


Figura 2.2: Diagrama esquemático da configuração (Chen e Li, 2004).

Li *et al.* (2004) também caracterizaram os perfis do gradiente de pressão axial para gás-sólido de sistemas densos em um novo par de leitos fluidizados circulares, conforme mostra o diagrama esquemático da Figura 2.3. As principais partes deste aparelho são feitas de acrílico. Em um sistema FCC industrial, uma regeneração de dois estágios a diferentes temperaturas é usada para prevenir a hidro-desativação (por exemplo, hidrogênio reage para formar água e acaba danificando o catalisador).

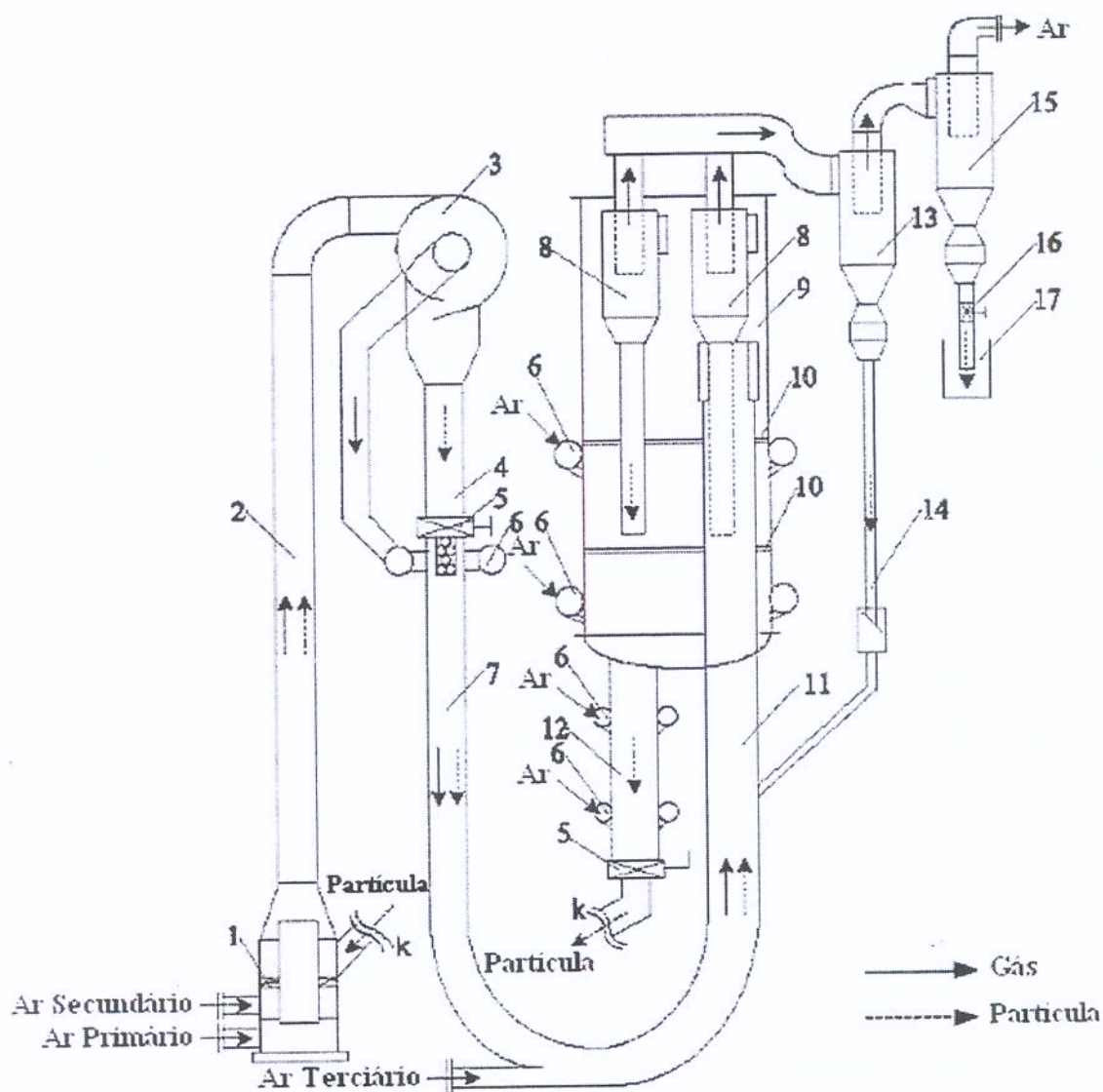


Figura 2.3: (1) Distribuidor de ar (2) Riser A (3) Separador horizontal rápido (4) Tanque de medição (5) Válvula borboleta (6) Distribuidor de ar circular (7) Downer (8) Ciclone primário (9) Tanque de armazenamento (10) Distribuidor de partículas (11) Riser B (12) Tubo de retorno de partículas (13) Ciclone secundário (14) Tubo de imersão (15) Ciclone terciário (16) Válvula gaveta (17) Tanque de coleta de partículas finas.

(Li *et al.*, 2004).

O *riser* A, na saída do distribuidor de ar, é apenas uma conexão do sistema de reação no estudo experimental a frio, embora haja planos para seu uso como regenerador em uma futura aplicação industrial. Partículas no tanque de armazenamento passam através

do tubo de retorno de partículas e entram no fundo do *riser* A, sobem com o escoamento de gás pelo *riser* A (comprimento 8,3 m e diâmetro interno 140 mm) e entram no separador horizontal rápido (comprimento 600 mm e diâmetro interno 300 mm). Após a separação gás-sólido, o fluxo de circulação dos sólidos é obtido no tanque de medição e então as partículas se misturam novamente com o gás separado pelo separador horizontal rápido e entram juntos no *downer*. As partículas e o gás fluem pelo *downer* de comprimento 5,5 m e diâmetro interno 140 mm, entrando pelo *riser* B (comprimento 8,5 m e diâmetro interno 200 mm). Na entrada do *riser* B, um pouco de gás é adicionado aos fluxos gás-sólido (ar terciário). Após passar pelo *riser* B, o escoamento bifásico passa através do ciclone primário no topo do tanque de armazenamento onde os sólidos são coletados e retornam ao tanque de armazenamento. O gás é transportado aos ciclones secundário e terciário, onde as partículas finas são coletadas e retornam ao sistema CFB enquanto que o gás é aliviado para a atmosfera.

Os sólidos podem ser mantidos no *riser* A em condições desejáveis de fluidização pelo controle independente da velocidade do gás (ar primário e ar secundário), pelo fluxo de circulação dos sólidos e pelo inventário dos sólidos no tanque de armazenamento. Um soprador e dois compressores suprem ar ao sistema CFB, permitindo controle independente de seus fluxos. Este arranjo proporciona inventário de sólidos e pressão suficientes para fornecer uma ampla faixa de fluxos de circulação de sólidos com alta densidade de suspensão de partículas.

Para cada experimento, o tanque de armazenamento e o tubo de retorno da partícula foram mantidos numa fluidização mínima por ar fornecido pelos compressores. O estado estacionário foi alcançado através do ajuste das válvulas borboletas até os níveis de sólidos no tanque de armazenamento permanecerem constantes. A taxa de circulação de sólidos foi medida no tanque de medição pelo método do volume, enquanto que o escoamento de gás foi medido por rotâmetros.

Várias tomadas de pressão foram instaladas ao longo do *riser* e do *downer* como especificado na Figura 2.4. A pressão diferencial foi medida através dos medidores de pressão diferencial tipo “U” conectados nas tomadas de pressão.

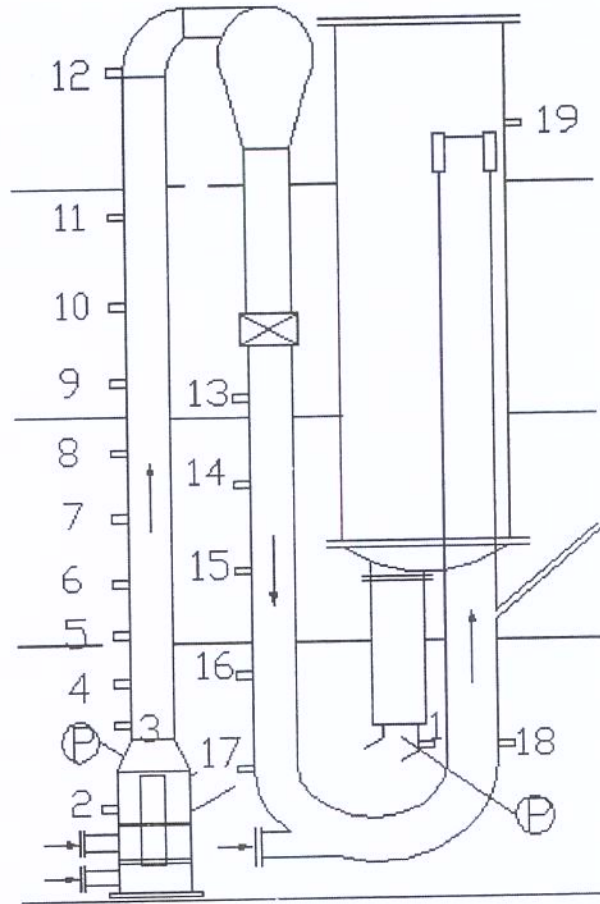


Figura 2.4: Localização das tomadas de pressão (Li *et al.*, 2004).

Wang *et al.* (2005) investigaram o escoamento gás-sólido de um novo processo FCC para maximização de iso-parafinas (MIP) em um leito fluidizado circulante. O equipamento utilizado é apresentado na Figura 2.5. O *riser* (A) tem um comprimento de 10,2 m e consiste de três seções. A seção I, no fundo do *riser*, apresenta um comprimento de 3,94 m e um diâmetro interno de 45 mm; a seção II, na parte superior do *riser*, apresenta um comprimento de 6,20 m e um diâmetro interno de 90 mm; um difusor, cuja área da seção transversal aumenta com a distância a partir de sua base, localizado entre a seção I e a seção II. O difusor de forma cônica é detalhado na Figura 2.6. O *downer* (B) tem um comprimento de 10,5 m com 120 mm de diâmetro interno e a uma altura de 5,25 m existe um tubo excêntrico (C) de 2,0 m de comprimento e 70 mm de diâmetro interno. Válvulas de prato perfurado (D) cobertas por uma rede de arame, respectivamente, a uma elevação de 8,3 m do *downer* e no topo do *standpipe* inclinado para medição da taxa de circulação de sólidos G_{sII} e G_{sa} . Vinte tomadas de pressão estão instaladas ao longo do equipamento para

permitir a determinação da queda de pressão. Quatro furos de medição para a sonda de fibra óptica foram abertos no *riser* nas elevações 2,34 m, 4,30 m, 5,63 m e 7,77 m, respectivamente. A disposição dos pontos de medição em cada elevação é mostrada também na Figura 2.5. Muitos dos pontos de medição são arranjados perto da parede porque o fluxo de sólidos e a velocidade das partículas variam agudamente com a posição perto da parede.

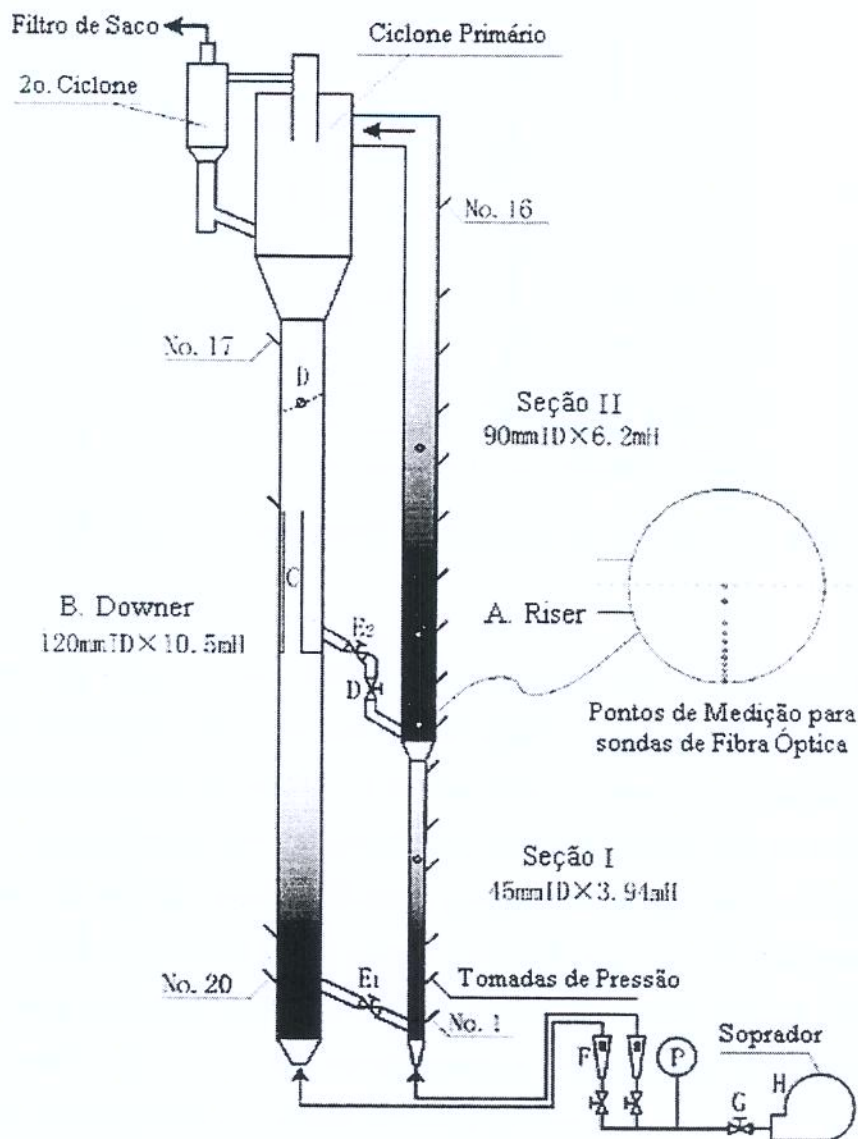


Figura 2.5: Diagrama esquemático do equipamento experimental (Wang *et al.*, 2005).

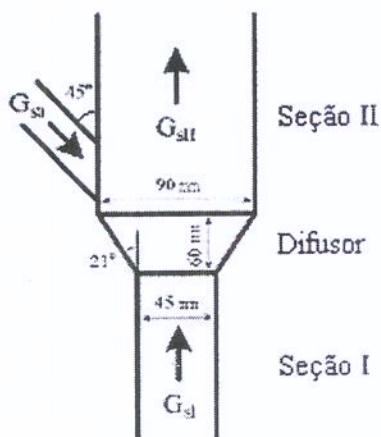


Figura 2.6: Relação entre as taxas de circulação de sólidos (Wang *et al.*, 2005).

O ar, fornecido por um soprador (H), tem a vazão regulada por uma válvula de controle (G) e medida com um rotâmetro (F), entra no *riser* através de um distribuidor perfurado. As partículas são transferidas do *downer* ao *riser* através de dois *standpipes* inclinados de 45°, respectivamente, nas elevações de 0,5 e 4,25 m do *riser*, em que duas válvulas de controle (E_1 e E_2) foram equipadas para regular a taxa de circulação de sólidos (G_{sl} and G_{sa}). Após deixarem o *downer*, as partículas são transportadas para o *riser* através dos *standpipes* inclinados e então ascendem o *riser* pelo escoamento de ar. As partículas arrastadas do topo do *riser* são alimentadas nos ciclones primário e secundário onde a maioria das partículas são removidas da corrente de ar e retornam ao *downer*. O ar esgotado deixa o equipamento através de um filtro de saco.

Manômetros, conectados às tomadas de pressão por tubos plásticos, foram utilizados para medir as perdas de pressão do sistema.

2.3. Reatores de craqueamento catalítico em leito fluidizado (FCC): *riser* e *downer*

Industrialmente, os reatores de leito fluidizado têm sido a base para as reações gás-sólido, conhecidas como reações de catálise heterogênea, nos quais ocorre o contato entre as fases (gás-sólido) através de um escoamento concorrente. Os leitos fluidizados circulantes (CFB) de escoamento concorrente vertical são classificados, basicamente, de duas formas: o *riser*, com escoamento ascendente das fases, amplamente usado no craqueamento catalítico fluido (FCC) e combustão de carvão; e o *downer*, com escoamento

descendente das fases, desenvolvido recentemente para satisfazer a necessidade do contato rápido entre as fases. Vários estudos têm sido desenvolvidos para aprimoramento da tecnologia de ambos os reatores, mostrando significativas vantagens em relação a outros tipos de reatores de leito fluidizado convencionais (Wei, 1996).

Os leitos fluidizados circulantes (CFB) nos quais as fases gasosa e particulada têm escoamentos ascendentes (*riser*), Figura 2.7, são largamente utilizados nas indústrias química, metalúrgica e petroquímica, como nos processos de craqueamento catalítico (FCC) (Wang *et al.*, 1998; Cheng *et al.*, 1998; 1999).

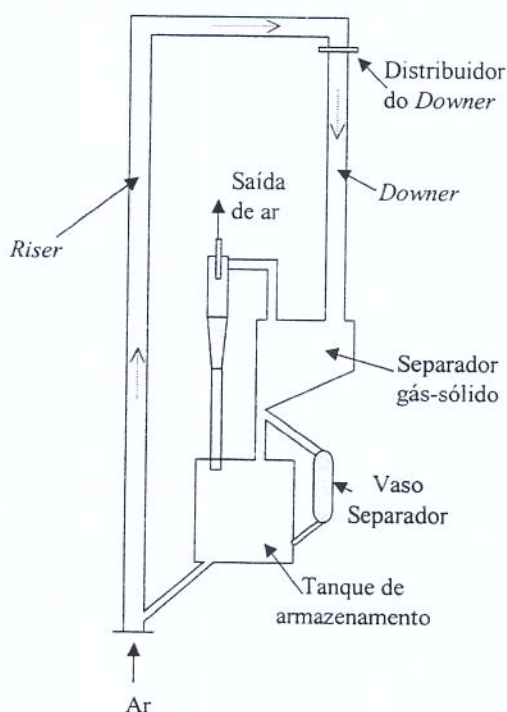


Figura 2.7: Representação esquemática de uma unidade de FCC (Cremasco, 2002).

No que se refere ao escoamento multifásico no *riser*, observam-se comportamentos distintos nas direções axial e radial. A distribuição axial dos sólidos pode ser, geralmente, descrita como havendo uma região densa na base do equipamento e uma diluída no seu topo. Em alguns casos, o topo pode conter concentrações densas de particulados, dependendo da sua configuração geométrica. Já o escoamento radial é típico centro-anular, ou seja há uma região central diluída de sólidos, em que as partículas existem de forma dispersa, com altas velocidades tanto do fluido quanto do sólido. A região central, por sua vez, é envolta por outra mais densa, sendo que junto à parede do equipamento há

escoamento lento de sólidos em escoamento descendente (Wei *et al.*, 1995, 1997; Cheng *et al.*, 1998), notadamente para concentrações mais elevadas $\epsilon_s > 6\%$ (Wang *et al.*, 1998). Na região anular do escoamento, o mecanismo de mistura entre as fases é dominado pelas dispersões axial e radial, que ocorrem, basicamente, devido à agregação de particulados (Wei *et al.*, 1995). Esse fenômeno de agregação e conseqüente retromistura acaba comprometendo o desempenho do *riser*, oferecendo uma distribuição não-uniforme de concentração de sólidos, aumentando a distribuição do tempo de residência de particulados (Wei *et al.*, 1995) e, conseqüentemente, elevando o seu tempo de residência médio no equipamento. Tal comportamento não é interessante quando se intentam reações rápidas, evitando reações secundárias, características típicas de processos de craqueamento catalítico.

Pode-se concluir da leitura do parágrafo anterior que se torna interessante reavaliar a tecnologia FCC quando se utiliza o *riser*, mesmo porque é importante processar altas cargas de catalisador com consideráveis efetividade e seletividade da reação, que acabam sendo comprometidos pela configuração *riser*, o qual é adequado, basicamente para baixas concentrações volumétricas de sólidos. Por outro lado, esses problemas podem ser amenizados pelo uso do sistema em que há o escoamento descendente tanto da fase fluida quanto da particulada (*downer*), Figura 2.7, no qual ambas as fases escoam na mesma direção da ação gravitacional. Ou seja, o *downer* é uma tecnologia FCC de reatores tubulares com escoamento descendente dos catalisadores (fase particulada) e dos reagentes (fase fluida).

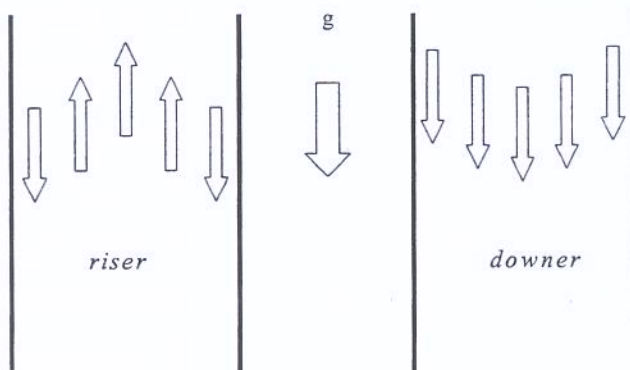


Figura 2.8: Representação do escoamento da fase particulada no *riser* e *downer* (Cremasco, 2002).

Tendo em vista que, no *downer*, a ação da força gravitacional é favorável à direção do escoamento das fases envolvidas no processo (Figura 2.8), tem-se uma distribuição mais uniforme da concentração de catalisador, na direção radial em uma dada seção transversal do equipamento levando, com isso, a menor segregação radial e axial das fases fluida e particulada com a característica de escoamento próxima a de um fluxo empistonado (Cheng *et al.*, 1997), ocasionando menor distribuição de tempo de residência dos particulados (Wei *et al.*, 1995; Cheng *et al.*, 1999; 2001) quando comparado ao do *riser*. Com essas propriedades o *downer* é um sério candidato para: (1) reações muito rápidas em que os intermediários são os produtos desejados, nas quais o contato rápido entre as fases é essencial para prevenir reações secundárias assegurando, com isto, uma boa seletividade; (2) reações em que se espera alta taxa de alimentação sólido-gás, e (3) reações catalisadas em que há rápida perda de ação do catalisador (Cheng *et al.*, 1999). Essas características são particularmente interessantes para os processos que necessitam de breve e uniforme tempo de contato, isto é, craqueamento catalítico em relação ao térmico, craqueamento do óleo residual e pirólise da biomassa (Cheng *et al.*, 2001), como é o caso do processamento de hidrocarbonetos. Este aspecto é de suma importância, pois a tecnologia FCC é a maior e a mais econômica dentro os processos catalíticos no mundo. Dessa maneira, um pequeno aumento na seletividade ou recuperação da gasolina é fundamental para o processo. Nesse aspecto, o *downer* mostra um grande potencial de aplicabilidade industrial em FCC (Wei, 1997).

Como pode ser observado, o craqueamento catalítico visando à produção de gasolina, é acompanhado por reações que diminuem a seletividade, bem como a efetividade de produção. O entendimento da fluidodinâmica é importantíssimo para dominar o processo e assim garantir o aumento da qualidade do produto e, neste caso, o pleno conhecimento do campo de velocidades e a distribuição do tempo de residência das fases envolvidas, bem como o conhecimento da distribuição radial e axial da concentração da fase particulada é primordial para a otimização do reator. Apesar de o *downer*, apresentar melhor desempenho quando comparado ao do *riser* (Wei *et al.*, 1995; 1997) ainda apresenta altas concentrações junto à região da parede do equipamento se comparada à da zona central (Cheng *et al.*, 1999), podendo influenciar as reações desejadas no craqueamento catalítico. Desse modo, é fundamental o conhecimento da fluidodinâmica tanto em um *downer* quanto em um *riser*

quando se opera com altas cargas de catalisador, visando, principalmente, o controle de variáveis operacionais para evitar futuras reações indesejáveis durante o processo de craqueamento catalítico.

O primeiro passo na busca da compreensão dos parâmetros que governam o desempenho do *downer* e do *riser*, portanto, passa pelo domínio da sua fluidodinâmica o qual advém de medidas adequadas de grandezas fundamentais, tais como: a queda de pressão devido à presença de sólidos presentes na corrente gasosa.

2.3.1. Queda de Pressão no *Downer*

Reatores gás-sólido com escoamento descendente no sentido da gravidade (*downer*), em leitos circulantes fluidizados, têm sido propostos na literatura para superar algumas desvantagens dos reatores com escoamento ascendente (*riser*). No processo de craqueamento catalítico (FCC) ocorrem regiões de recirculação de sólidos (*backmixing*) em reatores com escoamento contracorrente à gravidade, observando-se a formação de aglomerados de partículas, além da segregação de sólidos na seção radial originando um aumento no tempo de residência, diminuindo o rendimento na produção de gasolina. Devido à grande tendência de formação de coque, o processo de FCC necessita de um pequeno, mas uniforme, tempo de contato entre as fases gasosa e sólida.

Comparando com reatores convencionais de escoamento contracorrente à gravidade, *riser*, reatores *downer* podem oferecer vantagens significativas, como escoamento gás-sólido mais uniforme, menor aglomeração de sólidos, menor dispersão axial de gás e de sólidos e menor tempo de residência (Bai *et al.* 1991, Wang *et al.* 1992, Zhu e Wei, 1996). Essas propriedades são particularmente benéficas em processos de FCC e craqueamento catalítico fluidizado de óleo residual (RFCC) onde é necessário um tempo de contato pequeno mas uniforme entre o gás e o sólido (Zhu *et al.*, 1995). Para uma boa representação da fluidodinâmica, um modelo tem que ser representativo, ou seja, reproduzir da melhor forma possível as condições reais, segundo Bolkan - Kenny *et al.* 1991, é preciso ter cuidado no modelo fluidodinâmico.

Como a fase gasosa e a sólida escoam na direção da gravidade, o escoamento é mais rápido no *downer*, pois os sólidos são acelerados tanto pela fase gasosa quanto pela gravidade, enquanto no *riser* os sólidos são acelerados somente pelo escoamento de gás,

mas sofre a resistência da gravidade. Conseqüentemente, o comprimento da região de aceleração no *downer* é menor (Wang *et al.* 1992, Johnston *et al.* 1999). A fração volumétrica de sólidos na parede do *downer* é menor, quando comparado a um *riser* típico (1 - 5%), em um típico *downer* a fração volumétrica fica abaixo de 1% (Wang *et al.* 1992, Johnston *et al.* 1999, Zhang *et al.* 1999), representando um problema para reações onde, altas concentrações de sólidos por taxa de gás são requeridas.

Lehner e Wirth (1999) fizeram estudos dos perfis radial e axial de pressão, no *downer*, variando as vazões, velocidades de alimentação e diâmetro das partículas, o que permitiu uma análise qualitativa da influência de cada variável. A planta piloto utilizada para esse estudo é mostrada esquematicamente na Figura 2.1, constituída basicamente de uma alimentação por um distribuidor gás-sólido, um *downer* de 8,6 m, um sistema de separação gás-sólido e realimentação de sólido e 21 transdutores de pressão para análise dos perfis axiais de pressão.

Lehner e Wirth (1999) determinaram algumas variáveis para análise do perfil de pressão na direção axial do *downer*, sendo elas, a condição de alimentação de gás-sólido (v_g/v_p), a distância axial em relação ao topo do reator, a vazão mássica de sólido (G_s), a velocidade superficial do gás (u_L) e o diâmetro das partículas (d_p). A alimentação de gás e sólido através do distribuidor foi feita de duas formas: alimentação de gás na região central (tubo primário), com velocidade v_p ; e alimentação de gás e sólido na região anular (tubo secundário), com velocidade v_g . A condição de alimentação foi determinada pela razão v_g/v_p . Desprezando efeitos de atrito e aceleração, pode-se estabelecer uma relação entre a concentração de sólidos na seção transversal e o ganho de pressão no regime estabelecido (Lehner e Wirth, 1999);

$$(1 - \varepsilon) = \frac{\Delta P}{\Delta h (\rho_p - \rho_f) g} \quad (2.1)$$

em que:

ΔP = ganho de pressão

ε = porosidade

Δh = comprimento da seção vertical

ρ_p = massa específica da partícula

ρ_f = massa específica do fluido

g = aceleração da gravidade

Para análise da relação entre a distribuição radial de sólidos e a pressão medidos, Lehner e Wirth (1999) coletaram dados de pressão para variações de v_g/v_p , u_L e d_p , assim como em ensaios para análise do perfil de concentração. De uma maneira geral, pelos resultados, a pressão na direção axial do *downer* aumentou à medida que se afastou da alimentação. Esse comportamento foi observado em todos os ensaios apresentados por Lehner e Wirth, sendo, portanto independente da condição de operação do sistema. O aumento da pressão pode estar relacionado ao aumento da contribuição do *holdup* dos sólidos, cuja contribuição na pressão total supera a do atrito gás-parede e partícula-parede. Conforme Brodkey (1995) o gradiente de pressão em um escoamento multifásico em um tubo pode ser definida como a soma de termos relacionados ao atrito, energia cinética e energia térmica. Considerando que o gás e o sólido foram alimentados a uma mesma temperatura ambiente, a variação de temperatura pode ser considerada desprezível para o sistema, bem como o termo da pressão relacionado à energia térmica. De acordo com Lehner e Wirth (1999), os termos relacionados ao atrito e energia cinética variam com a concentração de sólidos e a velocidade superficial das fases, de forma que quanto menor a porosidade e maior a velocidade das fases, maior é a queda de pressão, justificando então o aumento da pressão ao longo do *downer*.

A condição de alimentação (v_g/v_p) influenciou bastante o perfil de pressão ao longo de todo o *downer*. Até aproximadamente 4 m, o perfil foi compatível com o perfil de concentração radial de sólidos. Para distâncias axiais maiores, os perfis apresentaram pequenos desvios em relação às retas que caracterizam as condições de operação do escoamento gás-sólido (que especifica o maior limite de queda de pressão num estado estacionário) determinados a partir de G_s , u_s ($= u_L + u_t$) e com ajuda da equação da concentração de sólidos em função da pressão.

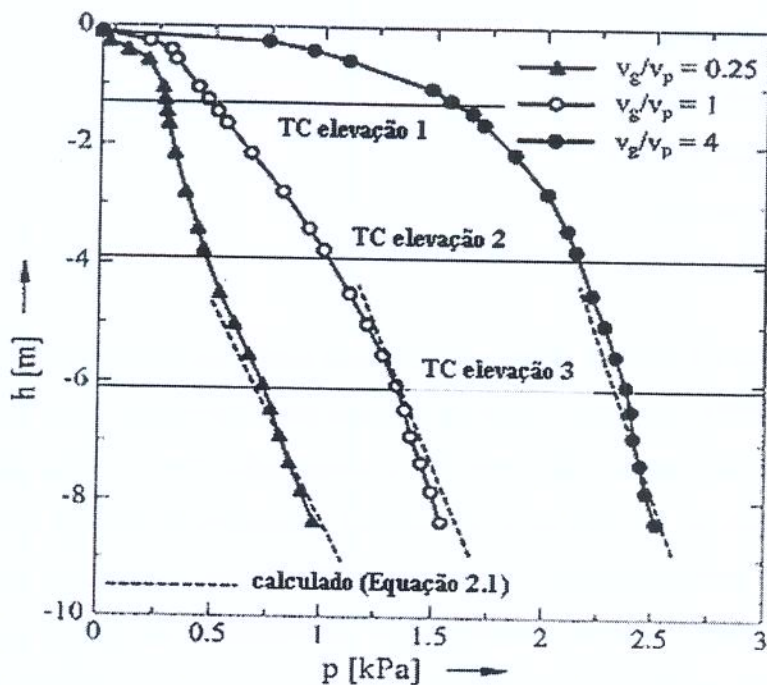


Figura 2.9: Perfil axial de pressão ($u_L = 5$ m/s, $G_s \approx 55$ kg/m²s, $d_p = 60$ μ m).

(Lehner e Wirth, 1999)

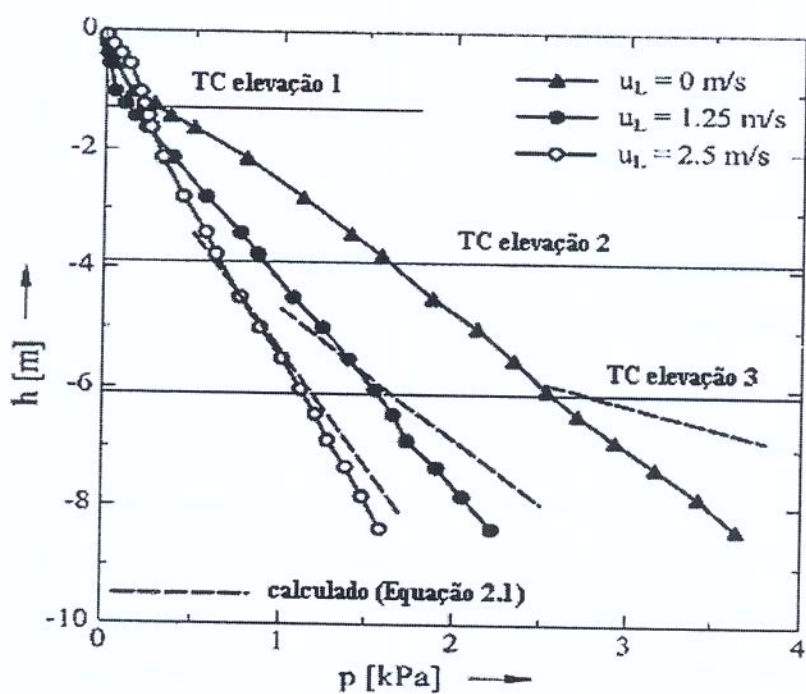


Figura 2.10: Perfil axial de pressão ($0 < u_L < 2,5$ m/s, $G_s \approx 70$ kg/m²s, $v_g/v_p = 1$,

$d_p = 60$ μ m). (Lehner e Wirth, 1999)

Para velocidades de gás (u_L) menores que 2,5 m/s, a concentração de sólidos na seção transversal aumentou, formando aglomerados nas proximidades da parede; devido a isso, o perfil de pressão apresentou desvios significativos em relação aos gradientes do escoamento gás-sólido calculado. Para velocidades maiores, o perfil de concentração foi mais disperso radialmente e, portanto, o perfil de pressão apresentou um comportamento mais próximo ao calculado.

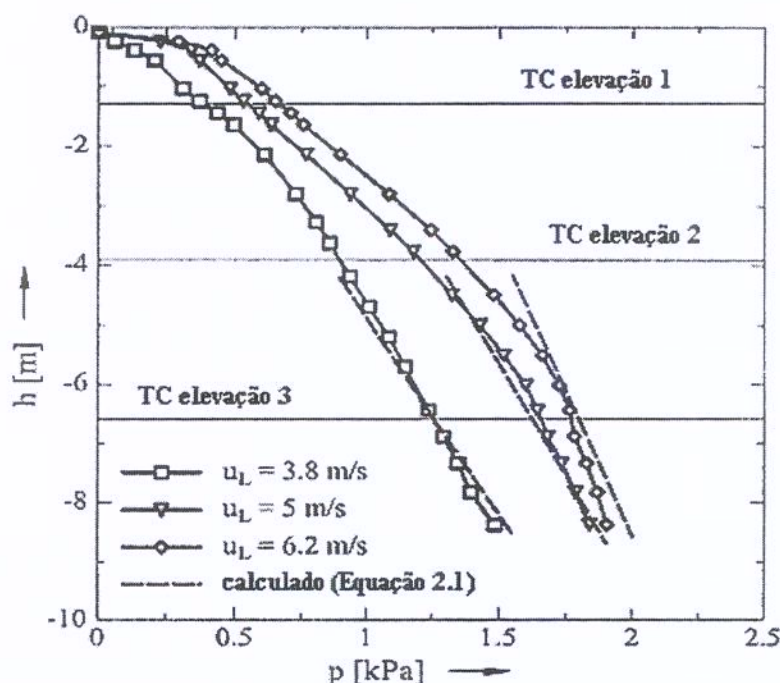


Figura 2.11: Perfil axial de pressão ($3,8 < u_L < 6,2$ m/s, $G_s \approx 65$ kg/m²s, $v_g/v_p = 1$, $d_p = 60$ μ m). (Lehner e Wirth, 1999)

Em relação ao diâmetro do particulado, não foi encontrada relação entre o comportamento do perfil medido e calculado quando se variou o diâmetro da partícula. Entretanto, os desvios são menores aumentando-se u_L , podendo ser explicado pela distribuição de sólidos na seção transversal: de acordo com Lehner e Wirth (1999), a baixas velocidades, o sólido se acumula nas paredes, formando aglomerados. O arraste desses aglomerados na parede é menor que o arraste do particulado livre, portanto, o gradiente de pressão calculado é menor que o medido.

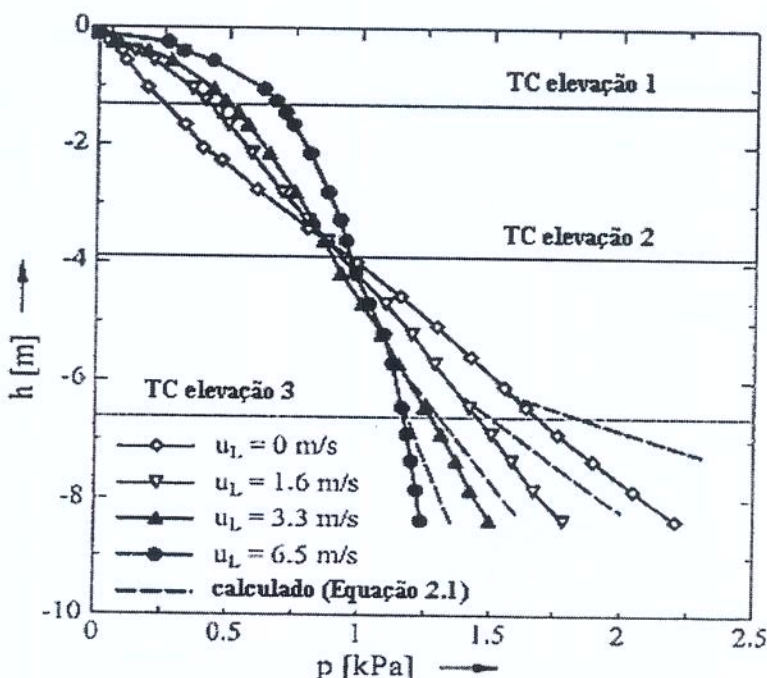


Figura 2.12: Perfil axial de pressão ($0 < u_L < 6,5$ m/s, $G_s \approx 70$ kg/m²s, $v_g/v_p = 1$, $d_p = 130$ μ m). (Lehner e Wirth, 1999)

Chen e Li (2004) caracterizaram os perfis do gradiente de pressão axial de um reator tipo *downer* em um leito fluidizado circulante em sistemas densos (HDCFB), conforme diagrama esquemático da Figura 2.2. O sistema consiste, no lado esquerdo, de um *downer* (5,6 m de altura por 80 mm de diâmetro interno) seguido por um separador de fundo e por um leito móvel vedado (3 m de altura por 120 mm de diâmetro interno) que alimenta partículas sólidas no *riser* (12 m de altura por 120 mm de diâmetro interno), localizado no lado direito do sistema.

Geralmente, o gradiente de pressão de um reator tipo *downer* pode ser expresso pela seguinte equação:

$$\frac{dp}{dh} = \rho_p g \varepsilon_s - G_s \frac{dU_p}{dh} - \frac{dP_f}{dh} \quad (2.2)$$

em que:

dp = ganho de pressão

dh = altura da seção medida

ε_s = média local do *holdup* dos sólidos

G_s = fluxo de sólidos

dU_p = diferencial da velocidade da partícula

dP_f = ganho de pressão para o atrito da parede

ρ_p = massa específica da partícula

g = aceleração da gravidade

As Figuras 2.13 e 2.14 mostram os perfis axiais do gradiente de pressão para a sílica gel B e para as partículas de vidro em diferentes fluxos de sólidos. Das duas figuras, pode-se ver que o gradiente de pressão aumenta com o aumento do fluxo de sólidos porque o maior fluxo de sólidos leva ao maior *holdup* de sólidos, o qual necessita de um maior gradiente de pressão para arrastar a partícula. O comprimento da seção de aceleração da partícula é de aproximadamente 1,5 m para a sílica gel B e de aproximadamente 2 m para as partículas de vidro, e não varia muito com o aumento do fluxo de sólidos.

Muitos pesquisadores estudaram a variação axial de pressão em operações em sistemas diluídos (Zhang *et al.*, 1999; Herbert *et al.*, 1998; Cao e Weinstein, 2000), e seus resultados mostraram que o gradiente de pressão era negativo na região inicial do *downer* devido à aceleração das partículas, que conduz a uma grande perda de pressão. De acordo com os perfis de gradiente de pressão na direção axial, o *downer* pode ser dividido em três regiões: a primeira região de aceleração da partícula, a segunda região de aceleração da partícula e a região completamente desenvolvida. Entretanto, o gradiente de pressão é positivo em todo o *downer* neste trabalho, isto porque um tubo pré-acelerador é empregado neste sistema CFB, no qual as partículas foram aceleradas antes da alimentação no *downer*, e a velocidade das partículas na entrada do *downer* é frequentemente igual, ou até mesmo maior que a velocidade superficial do gás, que resulta num gradiente de pressão positivo em todo o *downer* e no desaparecimento da primeira região de aceleração.

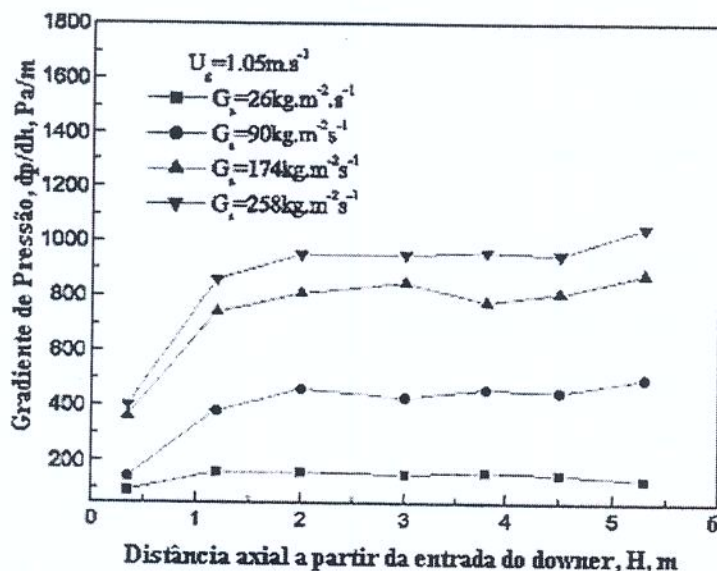


Figura 2.13: Gradiente de pressão axial para a sílica gel B (Chen e Li, 2004).

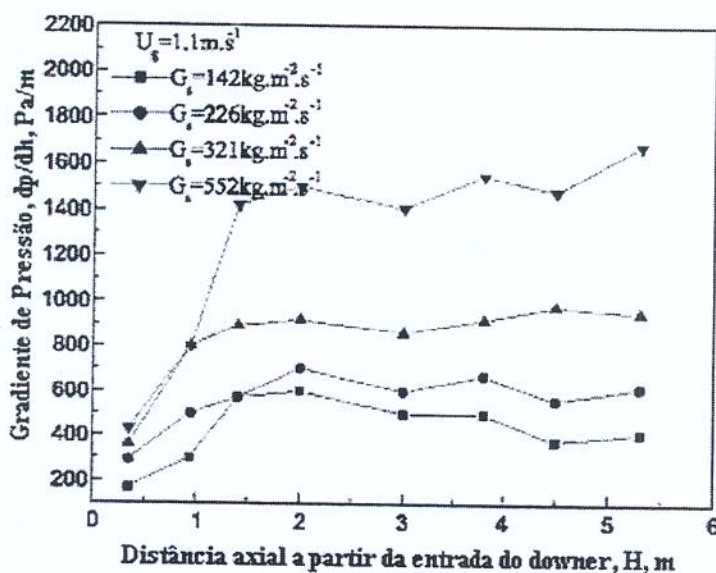


Figura 2.14: Gradiente de pressão axial para as partículas de vidro (Chen e Li, 2004).

Li *et al.* (2004) também caracterizaram os perfis do gradiente de pressão axial para sistemas gás-sólido densos em um novo par de leitos fluidizados circulantes, conforme mostra o diagrama esquemático da Figura 2.3. As principais partes deste aparelho são feitas de acrílico.

O ganho de pressão na direção descendente para o escoamento gás-sólido no *downer* pode ser estimado usando-se a seguinte relação:

$$\Delta P = g\rho_p \varepsilon_s \Delta H - \Delta P_{ac} - \Delta P_{fr} \quad (2.3)$$

em que:

ΔP = ganho de pressão

ΔH = altura da seção medida

ε_s = média local do *holdup* dos sólidos

ρ_p = massa específica da partícula

ΔP_{ac} = queda de pressão devido à aceleração dos sólidos

ΔP_{fr} = queda de pressão devido ao atrito da parede

g = aceleração da gravidade

Perfis típicos do gradiente de pressão na direção axial são mostrados nas Figuras 2.15 e 2.16 sob diferentes condições de operação. O gradiente de pressão é inicialmente baixo, positivo ou negativo no topo da coluna, mas rapidamente aumenta dentro de uma distância de 1,0 a 2,4 m; em seguida aproxima-se gradualmente de um estado estacionário ao longo da extensão da coluna. Esta situação é diferente dos resultados para um único reator *downer* (Johnston *et al.*, 1999; Zhang *et al.*, 1999; Herbert *et al.*, 1998). Segundo Li *et al.* (2004), isto se deve, provavelmente, à presença do *riser* B.

No *riser* B, as partículas ainda precisam ser arrastadas pelo ar. Utilizando-se a Equação 2.3 para analisar esta situação, as variações do gradiente de pressão perto da seção inicial do *downer* são devido à rápida aceleração das partículas que conduz a uma grande perda de pressão. Quando o escoamento de gás e sólidos é completamente desenvolvido e alcançou o estado estacionário, não há aceleração das partículas, quase nenhuma alteração no *holdup* dos sólidos e, quase nenhuma alteração no atrito da parede do *downer*, então o gradiente de pressão na região é quase constante, e o *holdup* dos sólidos pode também ser calculado. Um aumento no fluxo de circulação dos sólidos aumenta o valor do gradiente de pressão a uma dada velocidade superficial do gás U_1 (Figura 2.15), enquanto que aumentando-se a velocidade superficial do gás U_1 diminui-se o gradiente de pressão a um dado fluxo de circulação dos sólidos (Figura 2.16). Estas tendências são geralmente

consistentes com o que havia sido observado em estudos anteriores em escoamentos descendentes diluídos em leito fluidizado. Na Figura 2.15, um gradiente de pressão positivo no topo da coluna é medido na maior parte do tempo a uma baixa velocidade superficial do gás. Isto sugere que o ganho de pressão devido ao *holdup* dos sólidos a baixas velocidades superficiais do gás é maior que a perda de pressão causada pela aceleração das partículas e pelo atrito entre a parede e a mistura gás-sólido. Quando o fluxo de circulação de sólidos é maior, o ganho de pressão devido ao *holdup* de sólidos é maior para que o valor absoluto do gradiente de pressão seja também maior. A elevadas velocidades superficiais do gás, o gradiente de pressão é às vezes negativo na região de aceleração dos sólidos (Figura 2.16) porque a perda de pressão ao longo da coluna devido à aceleração das partículas e ao atrito entre a parede e a mistura gás-sólido, termos ΔP_{ac} e ΔP_f na Equação 2.3, excede o ganho de pressão devido ao peso da mistura gás-sólido na respectiva seção.

Conforme discutido anteriormente, a alteração no gradiente de pressão é muito pequena na região completamente desenvolvida do *downer*, então Li *et al.* (2004) simplificaram a Equação 2.3 por:

$$\Delta P = g \rho_p \varepsilon_s \Delta H \quad (2.4)$$

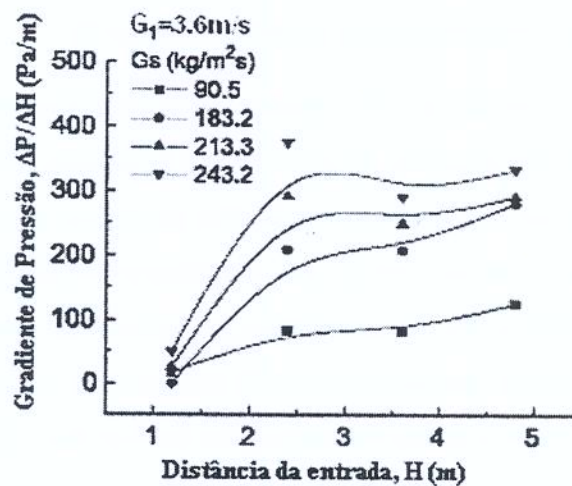


Figura 2.15: Perfil do gradiente de pressão ao longo da coluna do downer para diferentes fluxos de circulação de sólidos (Li *et al.*, 2004).

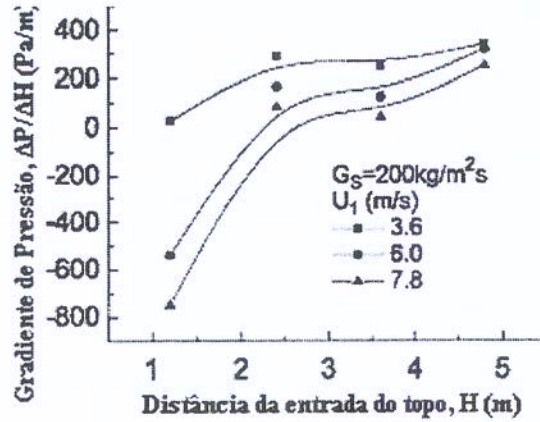


Figura 2.16: Perfil do gradiente de pressão ao longo da coluna do downer para diferentes velocidades superficiais de gás (Li *et al.*, 2004).

2.3.2. Queda de Pressão no Riser

Reatores gás-sólido com escoamento ascendente contra o sentido da gravidade (*riser*), em leitos circulantes fluidizados, na antiga concepção de projeto serviam apenas como um meio através do qual o catalisador e a carga eram transportados para serem introduzidos no leito de catalisador. Como havia muito pouca conversão no *riser* (no máximo cerca de 15 a 20 %), não havia preocupação com os sistemas de injeção de carga.

À medida que a tecnologia de catalisadores foi evoluindo, aumentando-se progressivamente sua estabilidade e atividade, os projetistas foram abandonando a concepção de craqueamento em leito e passaram a dirigir especial atenção ao craqueamento em *riser*. Em meados da década de 1960 do século passado, os catalisadores zeolíticos foram finalmente introduzidos no mercado.

O sistema reacional hoje em dia empregado nos diferentes modelos de Unidades de Craqueamento Catalítico é bastante simples, consistindo, na maior parte das vezes, de um tubo vertical de diâmetro elevado. Apesar disso, os fenômenos fluidodinâmicos e físico-químicos que ocorrem em seu interior são bastante complexos e ainda não inteiramente compreendidos para serem perfeitamente descritos.

O *riser* tem sido objeto de estudo de diversas companhias, e isto se torna cada vez mais importante, principalmente quando são contemplados os inúmeros desafios que se

apresentam para médio e longo prazos, abrangendo a seletividade e a qualidade dos produtos obtidos no processo, a qualidade das cargas processadas e as questões ambientais.

A queda de pressão em um reator tipo *riser* consiste principalmente em três componentes (Wilson, 1997). Estes componentes são: a pressão perdida acelerando a alimentação e a velocidade de catalisador no *riser*, perda friccional no *riser* e perda estática devido à densidade no *riser*. Em adicional, se o *riser* inclui vários turnos, ocorre queda de pressão associada a estas variações na direção do escoamento.

A queda de pressão global no *riser* excluindo-se os efeitos de entradas ou saídas é dada pela seguinte equação (Wilson, 1997):

$$\Delta P = \frac{\Delta V_f^2 \rho_f}{2} + W \Delta V_p + \frac{2 f \rho_f V_f^2 L}{D_T} \left[1 + \left(\frac{f_p V_p}{f V_f} \right) \left(\frac{W}{V_f \rho_f} \right) \right] + \frac{W H g}{V_p} + \rho_f H g \quad (2.5)$$

em que:

ΔP = perda de pressão

D_T = diâmetro interno do *riser*

L = comprimento do *riser*

H = altura vertical do *riser*

W = fluxo mássico de sólidos

ρ_f = massa específica do fluido

V_p = velocidade da partícula

V_f = velocidade do fluido

f – fator de atrito de Fanning

f_p – fator de atrito das partículas

g – aceleração da gravidade

Os dois primeiros termos da Equação 2.5 refletem na perda de aceleração do gás e do sólido, respectivamente. O terceiro termo é a perda friccional no *riser* e os últimos dois termos são a carga estática do sólido e do gás no *riser*.

Para o cálculo da queda de pressão, dois outros termos devem ser estimados. Estes são: a velocidade da partícula (V_p) e o fator de atrito da partícula (f_p). Baseados em dados experimentais em transporte sob várias condições de operação, Knowlton e Wilson (1997) desenvolveram as seguintes correlações:

$$V_p = \sqrt[3]{(V_f - V_{ch}) \times V_f^2} \quad (2.6)$$

$$f_p = \left[0,02515 \left(\frac{W}{\rho_f V_f} \right)^{0,0415} \left(\frac{V_p}{V_f} \right)^{-0,859} \right] - 0,03 \quad (2.7)$$

Usando estas correlações, Knowlton e Wilson (1997) foram capazes de adaptar a equação de queda de pressão para condições de operação com as seguintes variações de variáveis:

- Velocidade de gás = 1,5 ~ 24,4 m/s;
- Velocidade mássica = 0 ~ 732,4 kg/m²s;
- Massa específica de gás = 2,24 ~ 54,46 kg/m³;
- Massa específica de partícula = 1259,05 ~ 3908,05 kg/m³;
- Diâmetro de partícula = 0,00016 ~ 0,00036 m.

Aplicando estas correlações em *risers* comerciais, deve-se atentar para o fato de a vazão volumétrica da fase vapor e, conseqüentemente, a velocidade, aumentar ao longo do comprimento do *riser*. Quedas de pressão adicionais ocorrem nos turnos do *riser* e na saída do *riser*. Cada uma destas podem ser estimadas pela seguinte expressão (Wilson, 1997):

$$\Delta P = k \left(\frac{V_f^2 \rho_f}{2} + W V_p \right) \quad (2.8)$$

onde o fator k encontra-se na Tabela 2.1 a seguir:

Tabela 2.1: Valores considerados para o fator k .

	k
Turno de 45°	0,2
Turno de 90° (Te)	1,3
Saída	1,0

Fonte: Wilson, 1997.

Turno significa a curvatura de entrada da mistura gás-sólido no *riser*.

Wang *et al.* (2005) mediram a queda de pressão de um novo processo FCC para maximização de iso-parafinas (MIP) em um leito fluidizado circulante, conforme apresentado na Figura 2.5. Quedas de pressão para a seção I e para a seção II são apresentadas, respectivamente, nas Figuras 2.19 e 2.20 sob as mesmas condições operacionais das Figuras 2.17 e 2.18.

Na Figura 2.19, a queda de pressão na seção I (ΔP_I) diminuiu enquanto que na seção II (ΔP_{II}) aumentou com o aumento da taxa adicional de circulação de sólidos (G_{sa}). A queda de pressão total no *riser*, resultante de um balanço de forças em regime permanente desconsiderando-se o termo de aceleração, pode ser dividida em quatro componentes: as quedas de pressão causadas pela ação da gravidade do gás e da fase sólida, e as quedas de pressão causadas pelo atrito do gás e da fase sólida, isto é:

$$\Delta P = \Delta P_{gr,f} + \Delta P_{gr,p} + \Delta P_{fr,f} + \Delta P_{fr,p} \quad (2.9)$$

$$\Delta P = \varepsilon \rho_f g \Delta L + (1 - \varepsilon) \rho_p g \Delta L + \frac{2}{D} f_{f,w} \varepsilon \rho_f v_f^2 + \frac{2}{D} f_{p,w} (1 - \varepsilon) \rho_p v_p^2 \quad (2.10)$$

em que:

ΔP = perda de pressão

ε = porosidade

ΔL = comprimento do *riser*

D = diâmetro interno do *riser*

ρ_p = massa específica da partícula

ρ_f = massa específica do fluido

v_p = velocidade da partícula

v_f = velocidade do fluido

$f_{f,w}$ = fator de atrito devido ao atrito do fluido com a parede

$f_{p,w}$ = fator de atrito devido ao atrito das partículas com a parede

g = aceleração da gravidade

A fração média de vazios (ε) na seção transversal do *riser* aumenta com a diminuição da taxa de circulação de sólidos a uma velocidade de gás constante. G_{sII} aumentou enquanto que G_{sI} diminuiu com o aumento de G_{sa} (Figura 2.17). Da Equação 2.10, esperava-se que a queda de pressão na seção I diminuísse enquanto que aquela na seção II aumentasse.

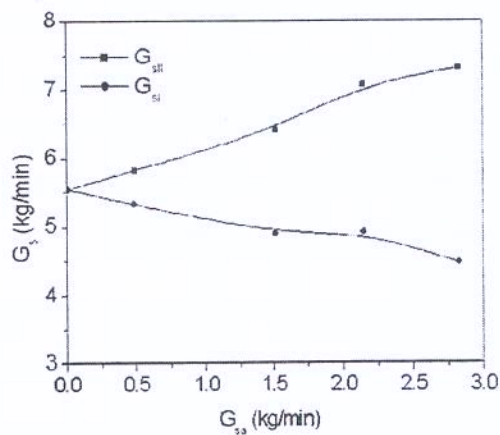


Figura 2.17: Variação de G_{sII} e G_{sI} com G_{sa} . ($U_{gI} = 10$ m/s, $U_{gII} = 0,25U_{gI}$)

(Wang *et al.*, 2005).

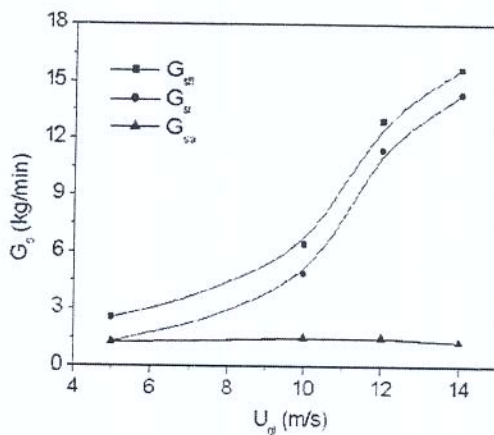


Figura 2.18: Variação da taxa de circulação de sólidos com a velocidade do gás

$$(U_{gII} = 0,25U_{gI}) \text{ (Wang et al., 2005).}$$

Na Figura 2.20, a queda de pressão na seção I aumentou enquanto que aquela na seção II mostrou uma tendência complexa com o aumento da velocidade do gás. Os espaços vazios médios da seção transversal do *riser* aumentaram com o aumento da velocidade do gás e a diminuição da taxa de circulação de sólidos. Quanto mais alta a velocidade do gás, maior a taxa de aumento da fração de vazios (Bai e Kato, 1999). A queda de pressão causada pela ação da gravidade na fase sólida variou consideravelmente com os espaços vazios médios da seção transversal, e as quedas de pressão causadas pelo gás e o atrito na fase sólida ($\Delta P_{fr,f}$, $\Delta P_{fr,p}$) aumentaram com o aumento da velocidade do gás. Aimo *et al.* (1999) indicaram que a queda de pressão diminuiu com a velocidade do gás abaixo de 10 m/s enquanto que aumentou, além de 10 m/s, com o aumento da velocidade do gás numa taxa específica de circulação de sólidos. Também a queda de pressão aumentou com o aumento da taxa de circulação de sólidos.

Na seção I, a taxa de circulação de sólidos G_{sl} aumentou com o aumento da velocidade do gás, que levou ao aumento da queda de pressão. Além disso, as quedas de pressão causadas pelo gás e pelo atrito na fase sólida aumentaram quando a velocidade do gás aumentou. O aumento das quedas de pressão causadas pela G_{sl} , pelo gás e pelo atrito da fase sólida superou a diminuição da queda de pressão causada pelo *holdup* dos sólidos. Como resultado, a queda de pressão na seção I aumentou com o aumento da velocidade do gás.

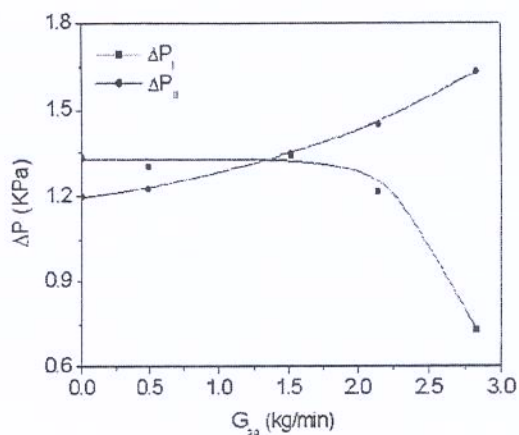


Figura 2.19: Influência da G_{sa} na queda de pressão das duas seções ($U_{gl} = 10$ m/s, $U_{gII} = 0,25U_{gl}$) (Wang *et al.*, 2005).

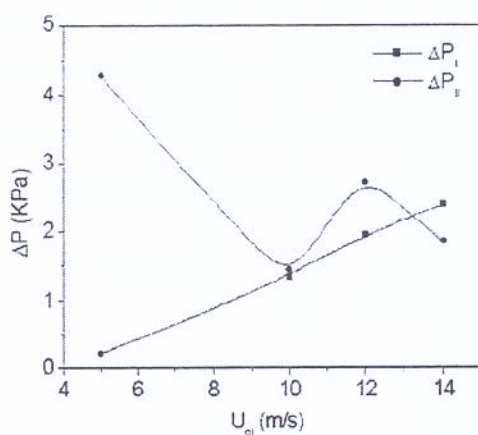


Figura 2.20: Variação das quedas de pressão das duas seções com a velocidade do gás ($U_{gII} = 0,25U_{gl}$) (Wang *et al.*, 2005).

Na seção II, a queda de pressão total primeiramente diminuiu, daí aumentou antes de diminuir novamente. A velocidade do gás nesta seção variou de 1,25 a 3,5 m/s e o aumento das quedas de pressão por atrito foi pequeno. A taxa de circulação de sólidos foi influenciada pela velocidade do gás e pela abertura da válvula E_1 . A taxa de circulação de sólidos aumentou com o aumento da velocidade do gás e a taxa de aumento aumentou quando a velocidade do gás era superior a 10 m/s. O aumento agudo da taxa de circulação de sólidos após a velocidade do gás ser maior que 10 m/s levou ao aumento da queda de pressão. Mas quando a velocidade do gás alcançou 12 m/s, a taxa de aumento diminuiu a

uma certa extensão (ver Figura 2.18), o que pode ter sido causada pela abertura da válvula E_1 , isto é, a velocidade acrescida da taxa de circulação de sólidos não pode aumentar mais com o aumento da velocidade do gás por causa da limitação da válvula E_1 . A queda de pressão diminui novamente porque a diminuição da queda de pressão causada pela velocidade do gás foi maior do que o aumento daquela causada pela taxa de circulação de sólidos. Portanto, a queda de pressão mostrou tendências complexas com a mudança da velocidade do gás.

2.4. Transições entre os tipos de escoamento em sistemas de transporte vertical

As transições entre tipos de escoamento em sistemas de transporte vertical têm grande influência na queda de pressão da Unidade Multipropóstio; isto devido a forte interação interpartículas e o comportamento distinto da mistura gás-sólido neste tipo de equipamento. Como esta dissertação é destinada à observação do comportamento fluidodinâmico da Unidade Multipropóstio, através do estudo da pressão e queda de pressão, os parágrafos a seguir são destinados a tais fenômenos.

Segundo Freire *et al.* (1993), no escoamento gás-sólido em transporte vertical é possível definir três tipos distintos de regime:

- de fase diluída;
- de fase densa;
- de *choking*;

A fase diluída apresenta as seguintes características (Freire *et al.*, 1993):

- suspensão uniforme, com porosidade normalmente maior que 0,97;
- ausência de recirculação de sólidos;
- velocidade de escorregamento gás-partícula próxima a da velocidade terminal de partícula isolada;
- o atrito entre suspensão e parede é o principal fator de queda de pressão.

As principais características da fase densa são (Freire *et al.*, 1993):

- escoamento em condições não-uniformes, caracterizado pela presença de aglomerados de partículas, nos quais a porosidade tem valores próximos de 0,75;
- há recirculação interna de sólidos, com escoamento ascendente na parte central do tubo e descendente próximo a parede do tubo;
- velocidade de escorregamento gás-partícula maior do que a velocidade terminal de partícula isolada;
- a densidade da suspensão é o fator dominante na queda de pressão ao longo do equipamento.

O regime de fluidização rápida é um caso particular do escoamento em fase densa, típico dos leitos fluidizados circulantes, que operam em condições de máxima velocidade relativa gás-sólido (Freire *et al.*, 1993). Alguns autores, baseados em observações experimentais no reator *riser*, afirmam que o escoamento em fase densa no regime de fluidização rápida é caracterizado pela recirculação interna de sólidos, inexistente no escoamento em fase diluída, mas intenso quando a velocidade do gás é menor do que a sua velocidade na condição de colapso. Fenômeno observado por Wei *et al.* (1995; 1997), Cheng *et al.* (1998) e Wang *et al.* (1998), quando estudaram o comportamento fluidodinâmico de um leito fluidizado circulante, no qual as fases gasosa e particulada têm escoamentos ascendentes. Ou seja, estes autores observaram o escoamento lento de sólido em escoamento descendente junto à parede do equipamento.

Segundo Freire *et al.* (1993), quando a velocidade superficial do gás é maior do que a sua velocidade na condição de colapso, a recirculação é menos pronunciada e ocorre principalmente na região anular do escoamento. No centro do escoamento há alta velocidade do gás e baixa concentração de sólidos, no entanto, na região anular existe menor velocidade do gás e maior concentração de sólidos. Nesta região anular do escoamento, o mecanismo de mistura entre as fases é dominado por dispersões axial e radial, que ocorrem, basicamente, devido à agregação das partículas (Wei *et al.*, 1995).

Analisando a Figura 2.21, que apresenta uma curva típica de queda de pressão em função da velocidade do gás, nota-se um limite inferior de velocidade, com elevada queda de pressão, denominada velocidade crítica de transporte vertical, para a qual, a uma concentração fixa de sólidos, cessa o transporte de partículas. Neste ponto, a velocidade do gás é insuficiente para manter as partículas como uma suspensão uniforme (Freire *et al.*, 1993).

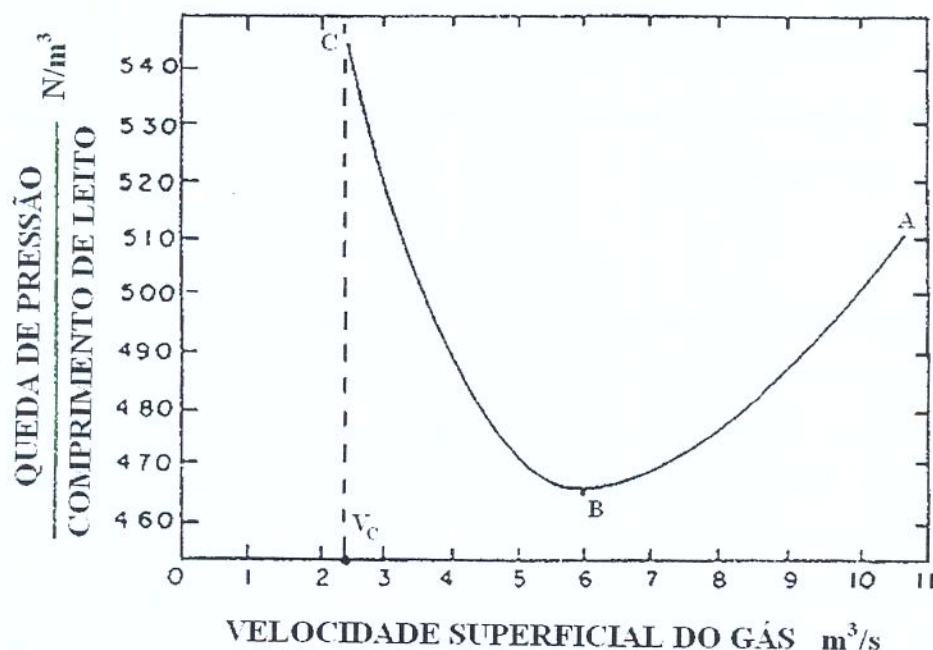


Figura 2.21: Gradiente de pressão em função da velocidade do gás (Freire *et al.*, 1993).

No trecho AB da Figura 2.21, observa-se que quando a velocidade do gás é reduzida, mantendo-se a taxa de alimentação de sólidos constante, a perda de carga também diminui, até que a uma dada velocidade a perda de carga atinja um valor mínimo. O ponto de mínima perda de carga pode ser usado como um divisor entre as fases diluída e densa, que é um estado bem característico conhecido como *choking* (Freire *et al.*, 1993).

2.5. Velocidade de *choking*

O *choking* é um fenômeno passível de ocorrer em tubulações verticais com escoamento bifásico com escoamento ascendente, tal qual o *riser*. Este fenômeno marca a

transição do escoamento em fase diluída para o escoamento em fase densa, na qual a mistura gás-sólido tende a entrar em colapso (*choking*). Capes e Nakamura (1973) em Freire *et al.* (1993), definiram o *choking* como o ponto onde tem início uma circulação interna das partículas, com os sólidos movendo-se para cima na região central e “caindo” nas regiões situadas próximas a parede da tubulação.

Para uma dada velocidade mássica de catalisador no *riser*, existe uma velocidade superficial mínima de vapor, na qual o *riser* não permanece em fase diluída de transporte (Wilson, 1997). Abaixo desta velocidade a mistura gás-sólido cai abruptamente em fase densa. O resultado é um súbito aumento na queda de pressão no *riser*. Quando isto ocorre, o *riser* é levado ao colapso e a velocidade na qual isto ocorre é conhecida como velocidade de *choking*.

A Tabela 2.2 apresenta as principais correlações encontradas na literatura para a estimativa da velocidade de *choking*:

Tabela 2.2: Principais correlações para a estimativa da velocidade de *choking*.

Autores / Referência	Correlação	Equação
Zenz e Othmer (1960); Wen e Galli (1971)	$W = \rho_p (1 - \varepsilon_{ch}) (V_{ch} - V_t); \quad \varepsilon_{ch} = 0,03 \rho_p + 0,91;$ $\rho_p \text{ [g/cm}^3\text{]}; dp > 0,17 \text{ mm}; 0,945 < \varepsilon_{ch} < 0,987$	(2.11a)
Knowlton e Bachovchin (1975); Klinzing (1981)	$V_{ch} = 9,07 (gd_p)^{1/2} \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} \right)^{0,347} \left(\frac{W d_p}{\mu} \right)^{0,214} \left(\frac{d_p}{D_T} \right)^{0,246}$	(2.11b)
Punwani (1976); Knowlton (1986)	$\frac{V_{ch} - V_t}{\varepsilon_{ch}} = \frac{W}{\rho_p (1 - \varepsilon_{ch})}; \quad \rho_f^{0,77} = \frac{2250 D_T (\varepsilon_{ch}^{-4,7} - 1)}{\left[\frac{V_{ch} - V_t}{\varepsilon_{ch}} \right]^2}$	(2.11c)
da Silva e Pécora (1990); Freire <i>et al.</i> (1993)	$W = \rho_p (1 - \varepsilon_{ch}) (V_{ch} - V_t);$ $6,81 \times 10^5 \left(\frac{\rho_f}{\rho_p} \right)^{2,2} = \frac{2gD_T (\varepsilon_{ch}^{-4,7} - 1)}{(V_{ch} - V_t)^2}$	(2.11d)

Para que não exista o fenômeno de *choking*, é necessário que a velocidade superficial do gás seja superior à velocidade de *choking*.

2.6. Representação do atrito na presença de sólidos

As correlações apresentadas para a representação da queda de pressão em tubulações verticais para o escoamento gás-sólido parecem estar bem definidas. O que ainda se precisa definir melhor é o fator de atrito sólido-parede f_p . Muitos pesquisadores tentaram analisar este fator de atrito, e muitos estudos foram conduzidos em regime de fase diluída (Klinzing, 1981). A Tabela 2.3 lista várias correlações para f_p :

Tabela 2.3: Correlações para o fator de atrito sólido-parede (a partir de Klinzing, 1981; exceto a correlação de da Silva (1984)).

Autores	Correlação	Equação
Stemmerding (1962)	0,012	(2.12a)
Reddy e Pei (1969)	$0,184 / u_p \quad (*)$	(2.12b)
Van Swaaij <i>et al.</i> (1970)	$0,32 / u_p \quad (*)$	(2.12c)
Konno e Saito (1969)	$0,114(gD)^{0,5} / u_p$	(2.12d)
Capes e Nakamura (1973)	$0,192 / u_p^{1,22} \quad (*)$	(2.12e)
Yang (1978)	$0,0126 \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \right) \left[\frac{(1-\varepsilon)u_t}{u - u_p} \right]$	(2.12f)
da Silva (1984)	$0,32 \left[\frac{(gD)^{0,5}}{u_p} \right]^{0,47}$	(2.12g)

(*) u_p é dado em m/s.

Segundo Klinzing (1981), para sistemas diluídos distantes do ponto mínimo de queda de pressão pode-se utilizar qualquer uma das expressões da Tabela 2.3 e obter-se uma representação razoavelmente boa das quedas de pressão determinadas experimentalmente.

2.7. Tubulação curvada em leitos fluidizados circulantes (CFB)

Para que se complete o leito fluidizado circulante, seria necessário estabelecer uma conexão entre os reatores *downer* e *riser*. Uma das possíveis conexões é uma tubulação curvada na forma de uma semicircunferência com diâmetro não necessariamente igual à separação entre os reatores.

É necessário se entender as características fluidodinâmicas da região de entrada do *riser*, onde fortes interações de momento existem entre o gás e os sólidos e, a primeira seção de aceleração e os perfis iniciais de velocidade gás-sólido e de concentração de sólidos começam a se formar. A distribuição de sólidos, o comprimento da seção de aceleração e os fenômenos de transporte no *riser* são influenciados fortemente pelo modelo da entrada do *riser* (Cheng *et al.*, 1998).

Segundo Cheng *et al.* (1998), o design de uma tubulação curvada como entrada do *riser* apesar de exercer pouca restrição ao fluxo de circulação de sólidos, comparada a outras formas de entrada, provoca um significativo acúmulo de sólidos na região central de sua semicircunferência.

Ao contrário da extensa literatura sobre a aplicação da conservação de massa e momento a sistemas bifásicos em tubulações retilíneas, a literatura sobre a aplicação dessas conservações para outras geometrias, tal como em tubulações curvadas em relação a um eixo, é escassa.

Uma solução é substituir o sistema de coordenadas cartesiano pelo cilíndrico, conforme proposta de Guiotti (2003). Segundo esse sistema, o eixo de deslocamento z do sistema cartesiano é substituído pelo eixo de deslocamento angular θ . Como se conhecem as equações que modelam o escoamento vertical e o horizontal, pode-se analisar o sistema curvo em termos desses tipos de transporte (Guiotti, 2003).

Em $\theta = 0$, ocorre somente escoamento vertical descendente.

Para $0 < \theta < 90^\circ$, há uma composição de escoamentos vertical descendente e horizontal. A componente vertical se reduz e a horizontal aumenta com o crescimento de θ .

Em $\theta = 90^\circ$, o escoamento é unicamente horizontal.

Para $90^\circ < \theta < 180^\circ$, há uma composição de escoamentos vertical ascendente e horizontal. A componente vertical aumenta e a horizontal se reduz com o crescimento de θ .

Finalmente, em $\theta = 180^\circ$, o escoamento é vertical ascendente.

Uma complicação ao se alterar a configuração do sistema é a avaliação do fator de atrito na nova geometria. Uma vez que fatores de atrito são bem estudados e compreendidos para escoamentos retilíneos, pode-se, em primeira análise, descrever o fator de atrito em uma geometria circular como sendo uma composição vetorial de dois fatores de atrito, uma componente vertical e outra horizontal (Guiotti, 2003). Ali (2001) realizou uma ampla revisão sobre correlações para a estimativa do fator de atrito em tubulações curvas. As correlações relacionadas neste estudo mostram que neste tipo de geometria, um fator importante é a razão entre o raio da tubulação e o raio de curvatura da tubulação. Para baixos valores para esta razão, o atrito em uma tubulação com geometria circular se aproxima do bem conhecido atrito em tubulações retilíneas (Morikawa, Y. *et al.*, 1978). Ito (1959), através de um estudo em que se escoou água em várias tubulações com diferentes razões de raio de curvatura pelo raio da tubulação, determinou uma relação para a estimativa do fator de atrito da fase fluida em uma tubulação curvada (Ito, 1959):

$$f_f \left(\frac{2\bar{r}}{D} \right)^{1/2} = \frac{0,0791}{\left[\text{Re}(2\bar{r}/D)^2 \right]^{1/4}} \quad (2.13)$$

Segundo essa correlação, o fator de atrito para o escoamento de fluidos em tubulações curvas é uma função do grupo adimensional Dean ($= \text{Re}(2\bar{r}/D)^{1/2}$).

O fator de atrito entre a fase particulada e uma tubulação vertical (seções *downer* e *riser*) pode ser mensurado de acordo com a equação (Klinzing, 1981).

$$f_p = \frac{0,192}{v_p^{1,22}} \quad (2.14)$$

Já o fator de atrito entre a fase particulada e uma tubulação horizontal (seções de área variável e horizontal) pode ser avaliado de acordo com a seguinte equação (Klinzing, 1981):

$$f_p = 0,1172 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \left[\frac{(1-\varepsilon)}{(gD)^{1/2}} v_f \right]^{-1,15} \quad (2.15)$$

Para a seção curvada, Guiotti (2003) propõe que seja utilizado um fator de atrito obtido pela combinação das Equações 2.14 e 2.15. Como discutido anteriormente, para uma determinada posição θ na curva, tanto a velocidade da partícula como a velocidade do fluido podem ser decompostas em componentes verticais e horizontais. Realizando-se esta decomposição e buscando a resultante pelo Teorema de Pitágoras, tem-se que para a seção curva, o fator de atrito entre a fase particulada e a tubulação é dado por (Guiotti, 2003):

$$f_p = \left\{ \sin^4(\theta) \left[\frac{0,192}{(v_p \sin \theta)^{1,22}} \right]^2 + \cos^4(\theta) \left[0,1172 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \left[\frac{(1-\varepsilon)}{(gD)^{1/2}} v_f \sin \theta \right]^{-1,15} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.16)$$

Guiotti (2003) através de um balanço de forças, aplicando-se as equações de conservação massa e momento à seção da tubulação curvada, formou um sistema de equações diferenciais composto de quatro equações à quatro variáveis, a saber v_g , v_p , ε e P . Esse sistema pode ser solucionado por um método integrador do tipo Runge-Kutta.

Dessa forma, o modelo proposto para a variação da pressão em relação ao deslocamento angular θ é:

$$\frac{dP}{d\theta} = -r \left[\frac{1}{r} \rho_f \varepsilon v_g c(\theta, \varepsilon, v_g, v_p, P) - \cos \theta \rho_f \varepsilon g + \alpha (v_g - v_p) + \frac{2 \rho_f \varepsilon v_g^2}{D} f_f \right] = d(\theta, \varepsilon, v_g, v_p, P) \quad (2.17)$$

O termo α da força de arraste pode ser determinado por (Gidaspow, 1994; Guiotti, 2003):

$$\alpha = \frac{3}{4} C_D \frac{|v_g - v_p| \rho_f (1 - \varepsilon)}{d_p} \varepsilon^{-2.65} \quad (2.18)$$

Kinzing (1981) analisou alguns modelos de perda de pressão em tubulações curvadas e chegou à conclusão de que o modelo de Schuchart (1968) parece dar a representação mais realista dos dados experimentais analisados e, por isso, recomenda este modelo para os cálculos de projeto. Schuchart (1968) realizou vários experimentos de perda de pressão em curvas e acessórios para escoamento gás-sólido. Em seus experimentos foram utilizadas partículas de vidro e de plástico com diâmetros entre 1 e 2 mm e concentrações volumétricas maiores que 5 %. A correlação proposta por Schuchart (1968) é apresentada a seguir:

$$\frac{\Delta P_{curva}}{\Delta P_{reta}} = 210 \left(\frac{2R_c}{D} \right)^{-1.15} \quad (2.19)$$

em que:

ΔP_{reta} = perda de pressão do comprimento equivalente de uma tubulação reta

R_c = raio de curvatura da tubulação curvada

D = diâmetro interno da tubulação curvada

Para partículas muito pequenas, esta correlação deve ser modificada de acordo com os dados de Mason e Smith (1972). Um formato sugerido para o efeito do tamanho de partícula é (Kinzing, 1981):

$$\frac{\Delta P_{curva}}{\Delta P_{reta}} = a \left(\frac{2R_c}{D} \right)^b \left(\frac{d_p}{D} \right)^c \quad (2.20)$$

No caso de pós finos todos os dados indicam que as perdas de pressão preditas por correlações existentes superestimam as perdas de pressão medidas realmente. Em alguns casos, a redução do arraste real pode estar presente (Kinzing, 1981).

2.8. Escoamento gás-sólido em uma seção de transporte pneumático horizontal

Como geralmente um leito fluidizado circulante é composto por uma seção de transporte horizontal, na saída do *riser* até a entrada do ciclone primário, há necessidade de revisar a literatura sobre este tipo de transporte. Portanto, este item da dissertação é destinado a este propósito.

Segundo Raman (1985), o transporte pneumático horizontal apresenta um diagrama de queda de pressão similar ao do transporte horizontal hidráulico. Ainda, a queda de pressão total nesta seção é a soma de duas parcelas: a queda de pressão devido ao escoamento do fluido e a queda de pressão devido à presença de sólidos. Quando a velocidade do gás é alta o suficiente, as partículas permanecem suspensas no escoamento; porém pode ocorrer deposição de partículas caso a velocidade do gás seja baixa, esta deposição chega a ponto de formar dunas no interior do tubo, dificultando o transporte dos sólidos. Para encontrar o valor dessas velocidades de gás existem correlações que prevêm o colapso da mistura gás-sólido, como a apresentada abaixo:

Velocidade de *saltation* (da Silva e Pécora, 1990):

$$V_{salt} = \left[10^{(1440d_p + 1,96)} (gD)^{(550d_p + 1,25)} \frac{W}{\rho_p} \right]^{\frac{1}{(1100d_p + 3,5)}} \quad (2.21)$$

onde d_p [μm]

O conhecimento destes valores, ou seja, da velocidade de *saltation* tem grande importância neste tipo de transporte, uma vez que elas definem o valor mínimo da velocidade no tubo para que não haja colapso.

Em Raman (1985), encontram-se outras correlações para determinar esta velocidade crítica, bem como um algoritmo que utiliza estas correlações para determinar a queda de pressão no transporte pneumático horizontal.

Segundo Herbreteau e Bouard (2000), o interesse essencial a respeito do projeto de sistemas de transporte pneumático está relacionado com a velocidade mínima de transporte para minimizar o consumo de energia durante o transporte. Em seu trabalho, os autores encontraram os parâmetros que influenciam a otimização do transporte pneumático horizontal; sendo eles: diâmetro, massa específica e forma das partículas, na velocidade de saltação. Trabalho com mesma finalidade foi realizado por Baker e Klizing (1999); porém estes autores apresentaram formas diferentes de otimização no transporte pneumático horizontal, tais como o treinamento de uma rede neural para encontrar o ponto ótimo de operação.

Laouar e Molodtsof (1998) realizaram a caracterização da queda de pressão em transporte pneumático horizontal sob condições de fase densa. Estes autores concluíram que leis gerais de queda de pressão podem ser derivadas através de experimentos, as quais separam efeitos de taxa de fluxo volumétrico de gás e taxa de fluxo de massa de sólidos as quais apresentam-se como sendo somente variáveis governadas do gradiente de pressão local.

Jama *et al.* (2000) investigaram a magnitude e a frequência das flutuações de pressão durante o processo de transporte pneumático horizontal; e dizem que no estado estacionário a variação das flutuações podem ser minimizadas, isto com as velocidades de gás que correspondem à mínima pressão no diagrama típico de estado. A redução da velocidade do gás para o valor de mínima pressão resulta na repetibilidade das flutuações em frequências abaixo de 1 Hz. A análise da pressão mostra que o sistema deve apresentar um pico inicial de pressão antes que o sistema atinja o estado estacionário.

Para avaliar a queda de pressão total devido a mistura gás-sólido num escoamento pneumático horizontal, Hinkle (1953) propôs as seguintes correlações:

$$v_p = v_f \left[1 - 1,41 d_p^{0,3} \left(\frac{\rho_p}{62,3} \right)^{0,5} \right] \quad (2.22)$$

$$\Delta P = \frac{2 f_f \rho_f v_f^2 L}{D} \left(1 + \frac{f_p v_p}{f_f v_f} C_M \right) \quad (2.23)$$

onde f_f é o fator de atrito da fase fluida (fator de atrito de Fanning) e f_p é o fator de atrito entre a fase particulada e a tubulação e pode ser obtido pela seguinte correlação:

$$f_p = \frac{3 \rho_f C_D D}{2 d_p \rho_p} \left(\frac{v_f - v_p}{v_p} \right)^2 \quad (2.24)$$

C_D é o coeficiente de arraste entre a partícula e o gás.

Outros autores realizaram estudos experimentais sobre o transporte pneumático horizontal, utilizando diagramas de fase ou não. Entre eles, Rautiainen *et al.* (1999) e Hong *et al.* (1995). Porém, nesta dissertação não será feito um estudo aprofundado deste tipo de transporte.

2.9. Escoamento gás-sólido em ciclones

Os ciclones são os equipamentos de separação de partículas de uma corrente gasosa mais utilizados na indústria. Dentre os motivos que levam a esta qualidade, pode-se citar (Cremasco, 1994):

- possuem alta eficiência operacional;
- trabalham com grandes cargas de sólidos;
- são de construções simples;

- têm baixo custo de fabricação, operação e manutenção;
- quando bem projetados, separam partículas até 5 micra.

O desempenho do ciclone: eficiência de separação, e perda de carga estão diretamente relacionados a sua forma construtiva. Além da geometria do ciclone, tanto a sua eficiência de coleta quanto a perda de carga são dependentes das características físicas do particulado que se deseja separar, tais como massa específica, diâmetro do sólido e da sua concentração do seio da corrente fluida. É interessante mencionar que as próprias condições de alimentação de fluido, vazão, temperatura e umidade podem influenciar o desempenho desse equipamento.

Massarani (1997) recomenda algumas condições operacionais para melhor desempenho dos ciclones, dentre elas vale citar a velocidade média do fluido na seção de entrada do ciclone, sendo $10 < \bar{u} < 30$ m/s para ciclone Stairmand e $5 < \bar{u} < 20$ m/s para ciclone Lapple.

$$\bar{u} = \frac{Q}{B_c H_c} \quad (2.25)$$

A expressão clássica que relaciona vazão e queda de pressão na Mecânica dos Fluidos, regime turbulento estabelecido, é utilizada também para ciclones,

$$\Delta P = \beta \frac{\rho_f}{2} \left(\frac{4Q}{\pi D_c^2} \right)^2 \quad (2.26)$$

sendo a queda de pressão medida entre o “overflow” e a alimentação. O valor de β depende da configuração do equipamento, considerando-se $\beta = 400$ para ciclone Stairmand e $\beta = 315$ para ciclone Lapple (Massarani, 1998).

A ação que a presença de sólidos exerce na queda de pressão do ciclone se faz notada desde Shepherd e Lapple, em 1939, (Cremasco, 1994). Um dos primeiros

fenômenos a ser observado é a redução na queda de pressão quando se opera o ciclone com uma certa carga de partículas. Esta redução pode ser expressa segundo a correlação proposta por Briggs (1946), na forma:

$$\frac{\Delta P_D}{\Delta P} = \frac{1}{1 + aC_M^b} \quad (2.27)$$

A Tabela 2.4 mostra alguns valores de a e b obtidos por diversos autores.

Tabela 2.4: Influência de particulados na queda de pressão.

Autores	a	b
Briggs (1946)	0,0086	0,50
Casal (1988)	0,675	0,14
Comas (1991)	0,023	0,69
Sheid e Massarani (1992)	$0,0284 \left(\frac{\rho}{\rho_p} \right)^{0,831}$	0,831

Fonte: Cremasco, 1994.

A redução da queda de pressão, segundo Shepherd e Lapple (1939), decorre da inércia das partículas. Elas, durante o seu trajeto no seio da corrente gasosa, têm ação equalizadora do momento de camadas adjacentes de gás, diminuindo assim o valor da componente tangencial de velocidade (Cremasco, 1994).

Ao contrário de Shepherd e Lapple (1939), Yuu *et al.* (1978) sugerem que a redução da queda de pressão resulta do aumento do atrito da corrente junto à parede do ciclone, em virtude de nela depositarem-se os sólidos. Para tanto, esses autores fixaram partículas nas paredes do equipamento de forma a confirmarem sua hipótese. Comas *et al.* (1991) admitem que o efeito da redução da queda de pressão pode ser devido tanto ao mecanismo proposto por Shepherd e Lapple (1939), quanto ao de Yuu *et al.* (1978). Argumentam que as partículas movem-se no seio da corrente gasosa, e já separadas, escorregam pela parede do ciclone (Cremasco, 1994).

Fassani e Goldstein Jr. (2000) realizaram um estudo dos efeitos da alta concentração de entrada de sólidos no ciclone sobre a queda de pressão e a eficiência de coleta. Concordando com Shepherd e Lapple (1939) e Yuu *et al.* (1978), os autores descrevem o decréscimo da queda de pressão com a presença de partículas sólidas no escoamento. Ainda, Fassani e Goldstein Jr. (2000), sobre a eficiência de coleta, dizem que depende da configuração geométrica, das propriedades físicas do gás e das partículas, e das condições de operação. Os autores descrevem o aumento da eficiência de coleta acima de 12 kg de sólidos/kg de gás, e abaixo disto a tendência é de redução.

3. Materiais e Métodos

A Unidade Multipropósito para Craqueamento Catalítico, utilizada neste trabalho, encontra-se no Laboratório de Processos em Meios Porosos (LPMP) do Departamento de Termofluidodinâmica (DTF), da Faculdade de Engenharia Química (FEQ), da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). A presente Dissertação é a primeira que trata os aspectos experimentais de diferença de pressão desta Unidade Multipropósito.

3.1. Materiais

Os experimentos foram realizados utilizando-se uma fase fluida e uma fase sólida. A fase fluida é o ar ambiente e a fase sólida é um catalisador do processo de craqueamento catalítico, pertencente ao Grupo B do diagrama de classificação de Geldart (1973). A caracterização física do catalisador foi realizada no Laboratório de Análise e Caracterização de Produtos e Processos (LCP) do Departamento de Termofluidodinâmica (DTF) da Faculdade de Engenharia Química (FEQ) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Os aparelhos utilizados para este fim foram o picnômetro automático a gás, o porosímetro de mercúrio e o analisador de tamanho de partículas por difração a laser.

O picnômetro a gás utilizado neste trabalho é o *AccuPyc 1330*, fabricado pela Micromeritics Instrument Corporation. Esse picnômetro é automático, sendo utilizado para medir a massa específica de amostras. O porosímetro de mercúrio utilizado neste trabalho é o *AutoPore III 9400*, também fabricado pela Micromeritics Instrument Corporation. Esse equipamento é parcialmente automatizado, sendo utilizado para medir a porosidade e o diâmetro médio de poro do material. Já o analisador de tamanho de partículas por difração a laser utilizado neste trabalho é o *Mastersizer S*, modelo S-MAM 5005 da marca Malvern. Esse analisador é automático, sendo utilizado para medir a distribuição de tamanho de partículas em uma suspensão de amostra.

No Anexo A encontram-se os dados da caracterização física dos sólidos. Os resultados das análises obtidas pelos aparelhos descritos anteriormente são apresentados na Tabela 3.1:

Tabela 3.1: Resultados de análises de propriedades físicas do catalisador de FCC.

Amostra	Massa específica aparente (g/cm ³)	Massa específica absoluta (g/cm ³)	Porosidade (%)	Diâmetro médio de partícula (µm)
Catalisador	0,9017	2,4877	63,75	79,65 ± 1,30

O desvio padrão σ do diâmetro médio de partícula foi obtido segundo a

$$\text{fórmula: } \sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(d_{pi} - \bar{d}_p \right)^2}.$$

3.2. Unidade Multipropósito de Craqueamento Catalítico

O sistema experimental inicialmente concebido por Cremasco (2002) e para o qual a presente dissertação está inserida, está representado esquematicamente na Figura 3.1 e detalhado na Figura 3.2. A escolha desta configuração baseou-se na necessidade de se trabalhar com a alimentação contínua de sólidos sem a interferência humana, a não ser no início do processo por meio do carregamento de particulados.

Cabe ressaltar que as dimensões das seções ilustradas na Figura 3.1 foram definidas por meio da simulação do sistema proposto, cujo modelo encontra-se em Cremasco (2002).

Estabelecida a característica básica da Unidade Multipropósito, Figura 3.1, Cremasco (2002) considerou a estratégia do "multipropósito" para o presente sistema, que consistiu na proposta de um modelo simplificado para descrever a fluidodinâmica do escoamento multifásico em todas as seções da unidade. A partir da solução do modelo, foi possível estabelecer as dimensões que possibilitassem o funcionamento pretendido.

A Unidade Multipropósito divide-se em cinco seções de escoamento: vertical descendente (*downer*, $L = 1,10$ m e $D = 0,082$ m), a seção de união (curva em "U", $L = 1,20$ m e $D = 0,082$ m), vertical ascendente (*riser*, $L = 2,40$ m e $D = 0,082$ m), horizontal (alimentação ao ciclone, $L = 1,20$ m e $D = 0,051$ m) e ciclone 1º estágio (ciclone Stairmand, $L = 0,72$ m e $D = 0,181$ m).

Visando a minimização de emissão de particulados no ambiente, optou-se pela instalação de mais um ciclone. O ciclone 2º estágio, bem como o soprador de ar estariam dispostos fora do laboratório. Além disso, considerou-se que, para a alimentação dos sólidos, o mais indicado seria um alimentador tipo rosca sem fim (alimentador de sólidos, $L = 1,20$ m e $D = 0,082$ m). A Tabela 3.2 apresenta as características geométricas do Projeto Final da Unidade Multipropósito.

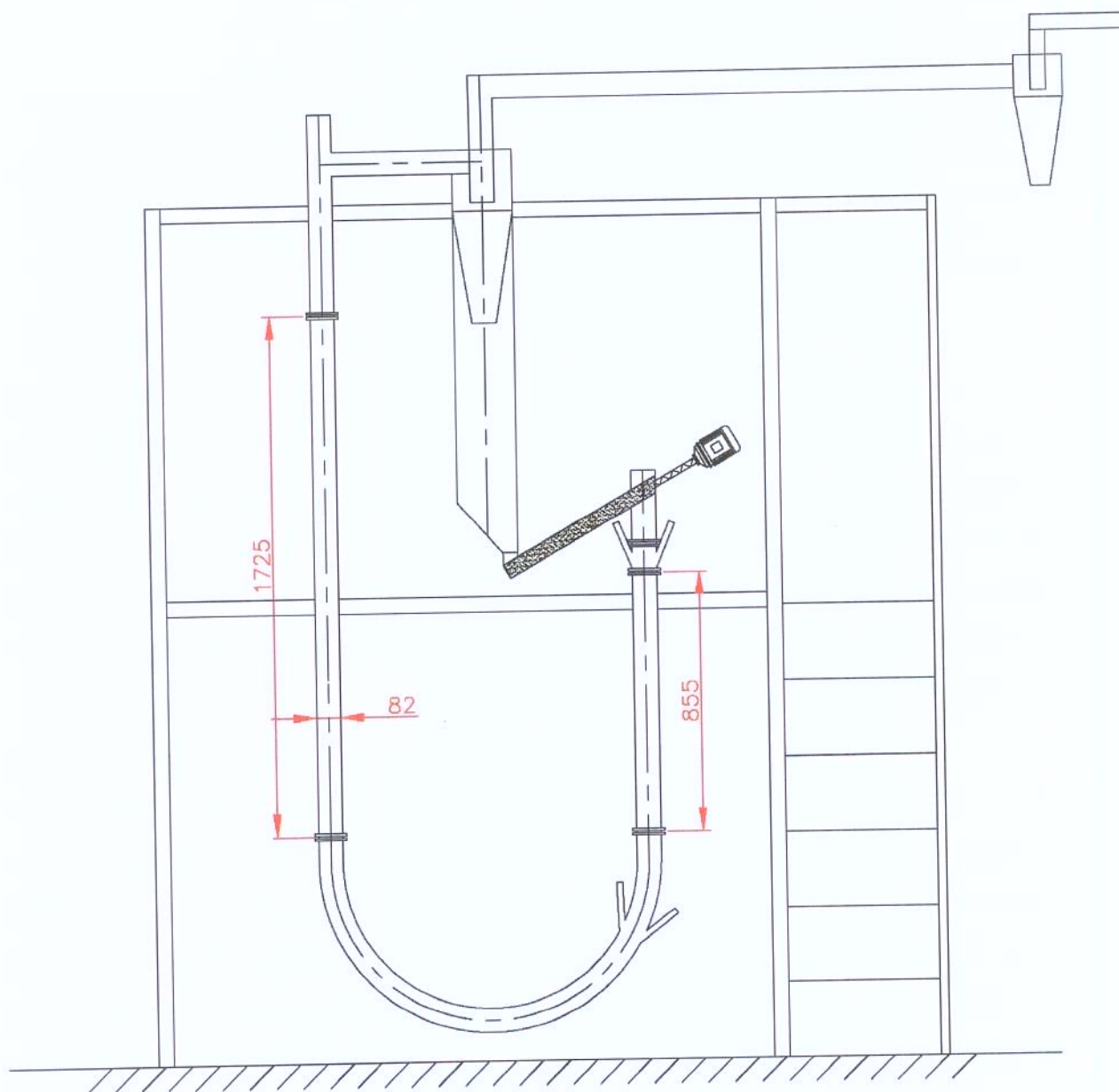


Figura 3.1: Diagrama esquemático da Unidade Multipropósito, todas as unidades em mm.

Tabela 3.2: Características geométricas do sistema.

	Diâmetro, D (m)	Comprimento, L (m)
Alimentador de sólidos	0,082	1,20
<i>Downer</i>	0,082	1,10
Curva em “U”	0,082	1,20
<i>Riser</i>	0,082	2,40
Alimentação ao ciclone	0,051	1,20
Ciclone Stairmand	0,181	0,72

Fonte: Cremasco, 2002.

A Unidade Multipropósito foi construída em aço-carbono, com exceção dos ciclones 1º e 2º estágio, estes construídos em aço-inoxidável. Conforme pode ser observado na Figura 3.2, há duas alimentações de ar: sendo uma em paralelo à alimentação de sólidos, na entrada do *downer* e uma na entrada da curva em “U”. Esta configuração permite trabalhar com um amplo espectro de concentração de sólidos em toda a unidade. Cada alimentador de ar possui quatro bicos. Tais alimentações de ar são conectadas ao soprador por tubos flexíveis.

Ar proveniente do soprador é alimentado na unidade através do(s) alimentador(es) de ar. Os sólidos, inicialmente armazenados no silo de carregamento (*hopper*), são carregados no alimentador de sólidos e alimentados na entrada do *downer* através de um transportador tipo rosca sem fim. Após escoarem ao longo do *downer*, da curva em “U”, do *riser* e da alimentação ao ciclone (entrada em venturi), ar e sólidos são separados no ciclone 1º estágio. Os sólidos separados voltam para o silo de carregamento para retornarem ao processo enquanto que os sólidos remanescentes são separados do ar no ciclone 2º estágio e descartados. O ar, na saída de topo do ciclone 2º estágio, retorna à atmosfera.

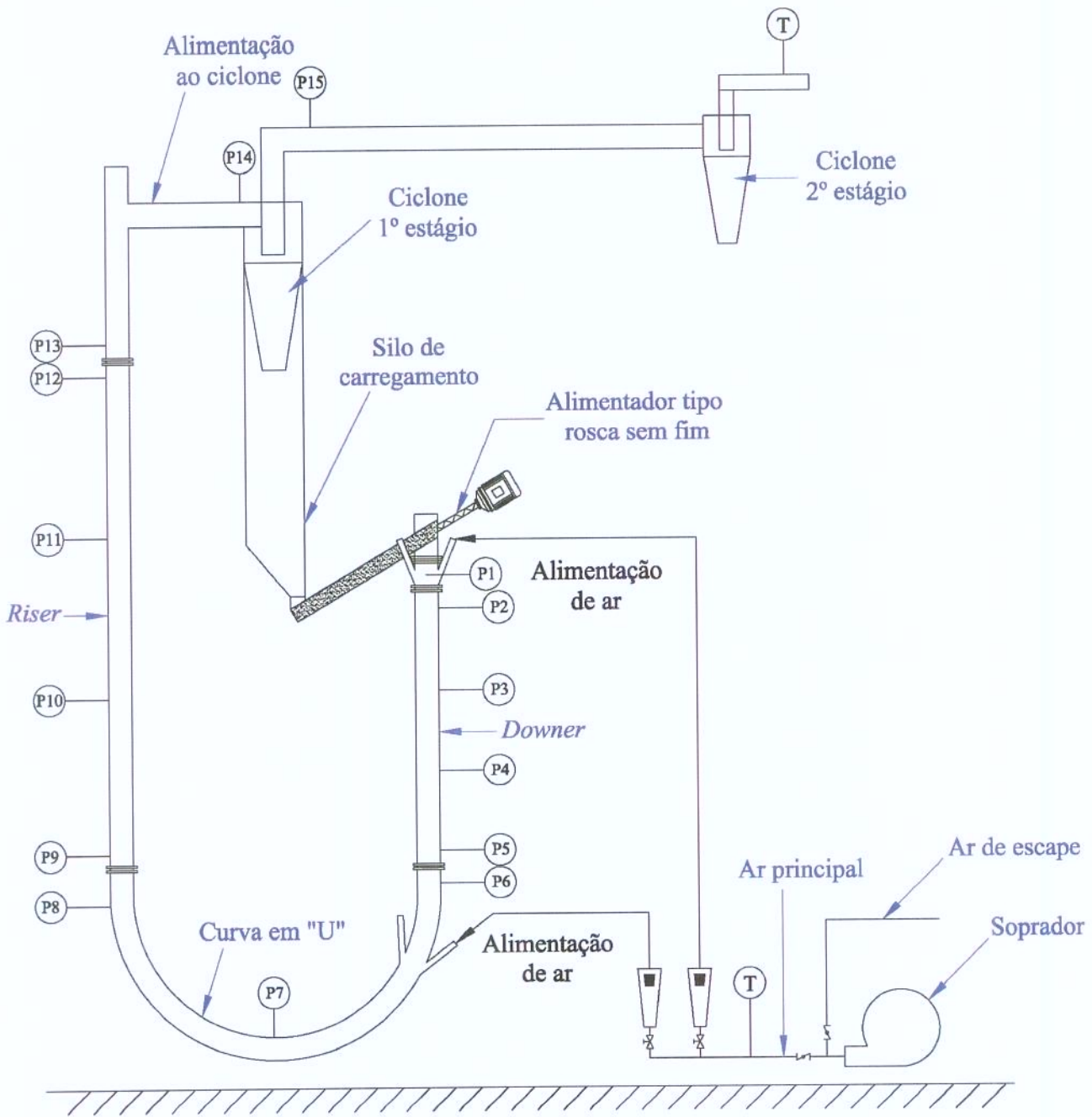


Figura 3.2: Concepção final da Unidade Multipropósito; T: termopares; P1 a P15: posição das tomadas de pressão.

A Unidade Multipropósito, detalhada na Figura 3.2, é composta de:

- 01 soprador de 10 HP;
- 02 rotâmetros para vazões de ar de 11,7 a 117 m³/h;
- 08 placas de orifício para medição de vazões em cada um dos quatro bicos da alimentação de ar no *downer*, na curva em “U” e no *riser*;
- 08 manômetros em U, utilizando água como fluido manométrico, para medição de queda de pressão nas placas de orifício de cada um dos quatro bicos da alimentação de ar no *downer*, na curva em “U” e no *riser*;
- 01 válvula borboleta de dreno;
- 01 válvula borboleta de regulação de vazão para a unidade;
- 02 válvulas de regulação de vazão para os rotâmetros;
- 08 válvulas de regulação de vazão para as placas de orifício do *riser* e do *downer*;
- 01 silo de carregamento;
- 01 transportador tipo rosca sem fim;
- 01 inversor de frequência;
- 01 *downer*;
- 01 curva em “U”;
- 01 *riser*;
- 01 ciclone 1º estágio;
- 01 ciclone 2º estágio;
- 15 manômetros em U, utilizando água como fluido manométrico, para medição da pressão estática ao longo da unidade.



Figura 3.3: Unidade Multipropósito LPMP/DTF/FEQ/UNICAMP.

As Figuras 3.4 a 3.11 ilustram detalhes da Unidade Multipropósito de Craqueamento Catalítico.

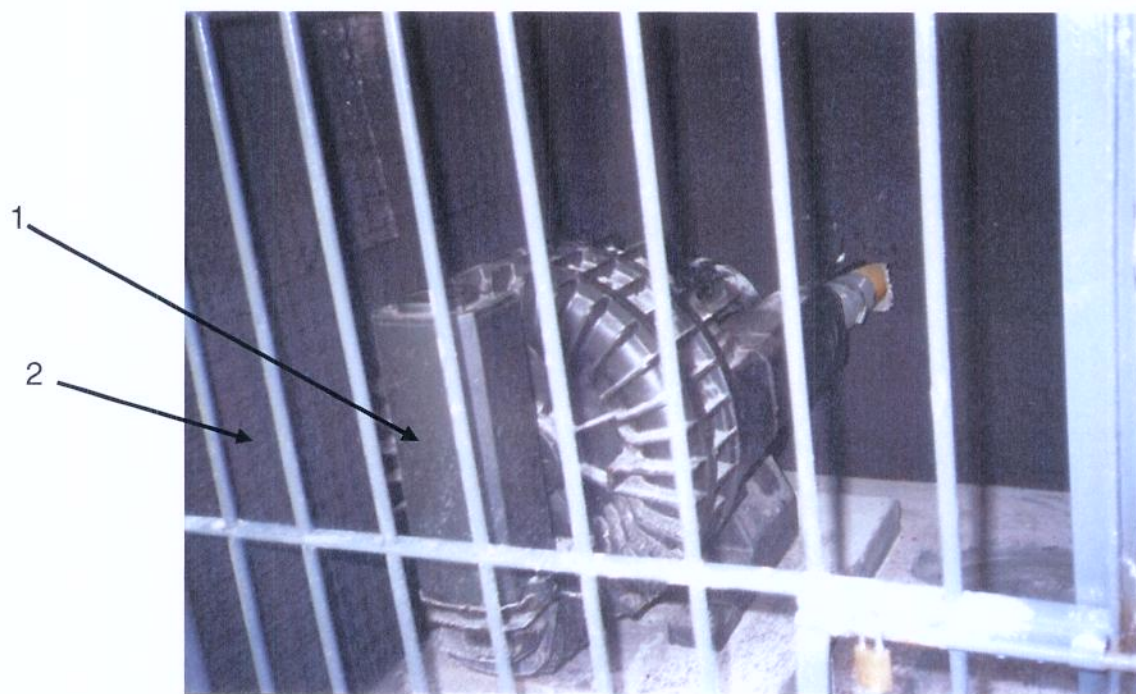


Figura 3.4: Soprador de 10 HP (1 – amortizador de ruído; 2 – silenciador: isopor e esponja).



Figura 3.5: Sistema de válvulas (1 – ar principal; 2 – ar de escape, 3 – ar secundários alimentações no downer; curva, entrada e saída do riser; 4 – rotômetros).



Figura 3.6: Alimentações de sólidos e de ar no downer (1 – reservatório de sólidos; 2 – alimentador de sólidos; 3 – motor do alimentador de sólidos; 4 – alimentador do ar ao downer).

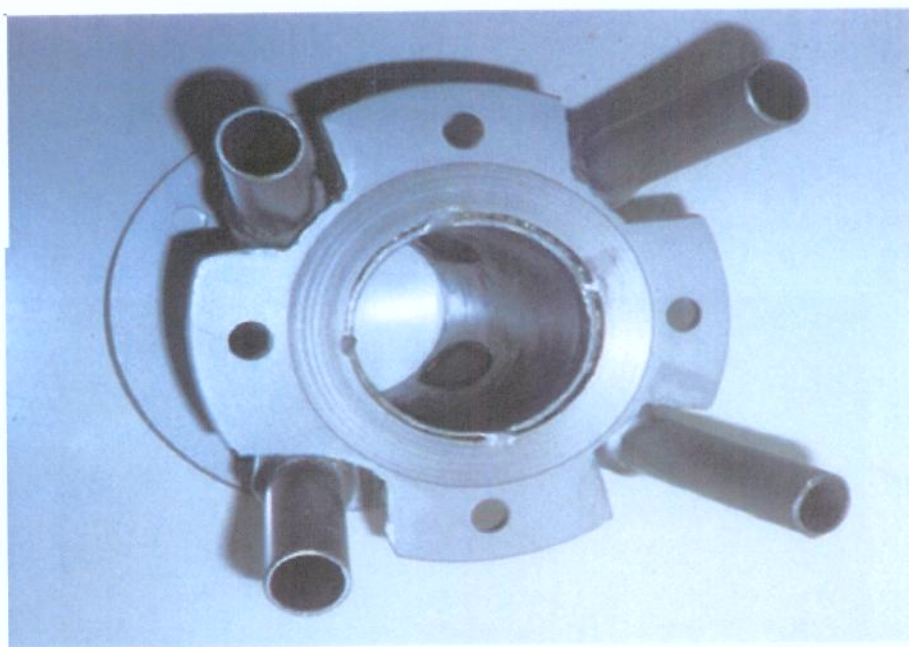


Figura 3.7: Detalhe do alimentador de ar (dispositivo de 4 bicos).

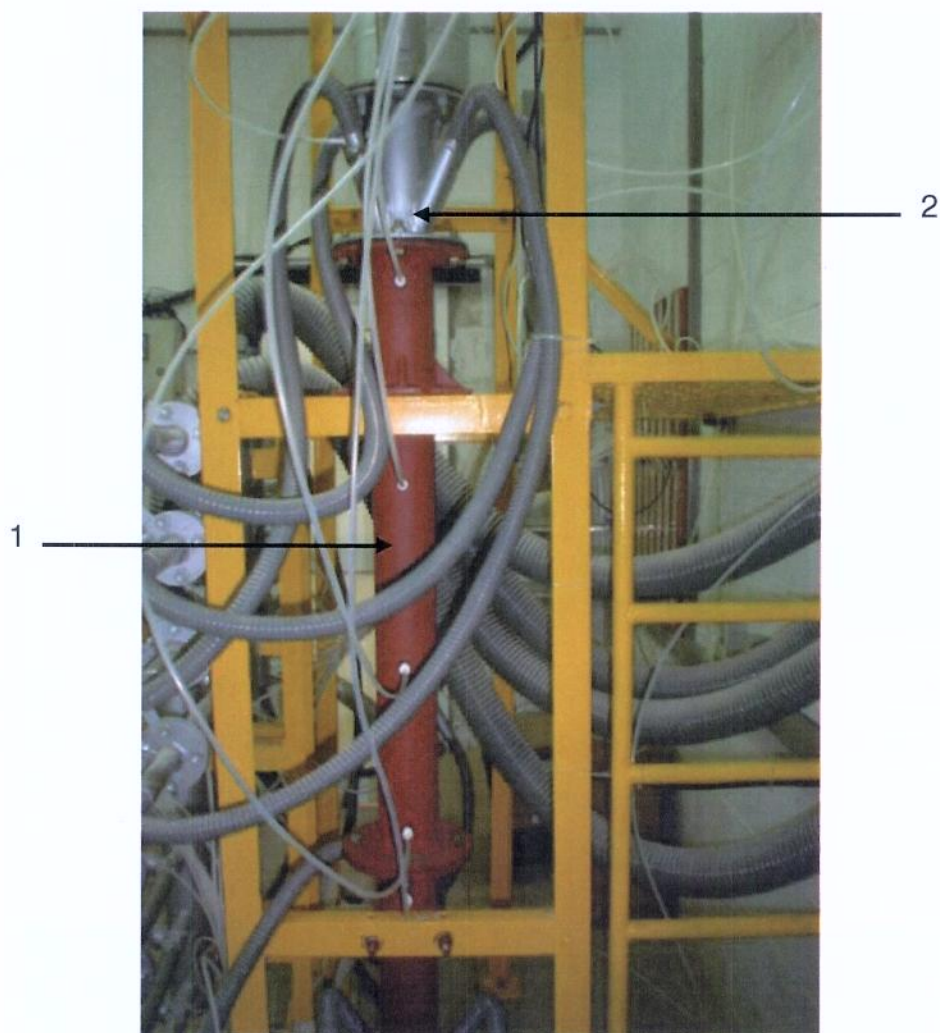


Figura 3.8: Downer (1 – downer; 2 – alimentação do ar).



Figura 3.9: Curva em U (1 – saída do downer; 2 – válvulas de alimentação do ar aos bicos de alimentação de ar; 3 – entrada ao riser).

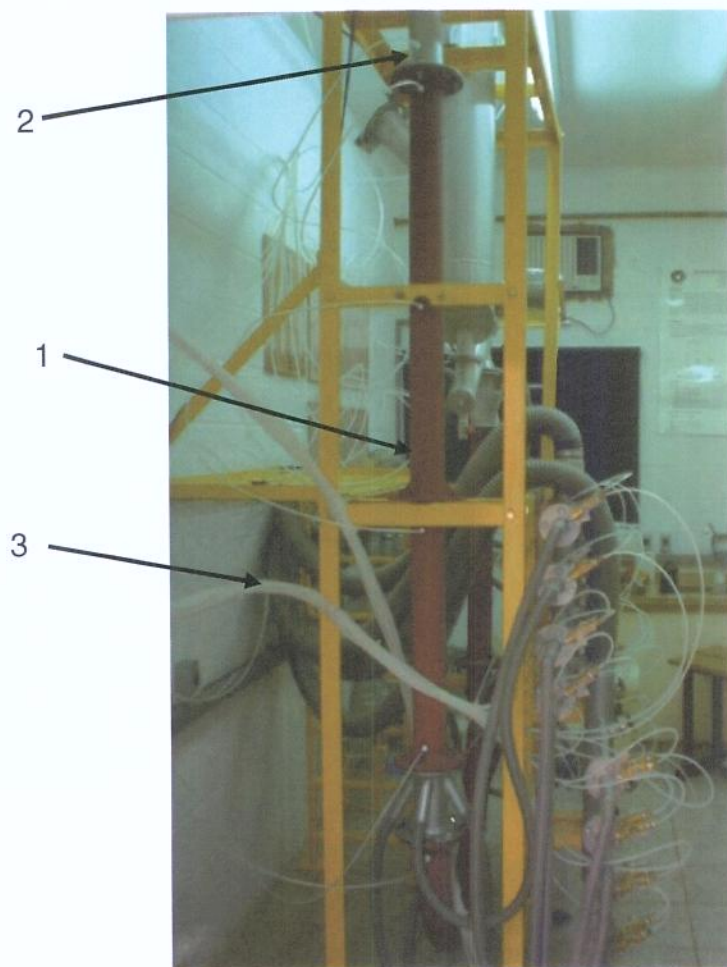


Figura 3.10: Riser (1 – riser; 2 – saída do riser para o ciclone; 3 – tubos de acesso aos manômetros em U).

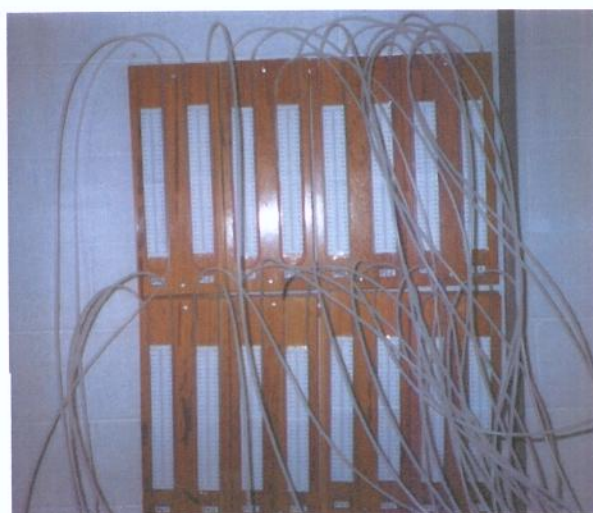


Figura 3.11: Manômetros em U (existem 4 alimentações, totalizando 16 bicos de entrada de ar).



Figura 3.12: Topo de recirculação: (1 – saída do riser; 2 – entrada em venturi na entrada do ciclone primário; 3 – silo de carregamento; 4 – saída do ciclone primário; 5 – alimentador de sólidos; 6 – alimentação do ar na entrada do downer).



Figura 3.13: Ciclone secundário (1 – detalhe da tomada de pressão).

3.3. Instrumentação da Unidade Multipropósito

Para a obtenção das medidas de pressão estática ao longo da unidade, foram instaladas na parede da tubulação 15 tomadas de pressão. Para indicação das posições das tomadas, definiu-se uma variável z que corresponde ao comprimento linear da tubulação, variando de 0 (no ponto de alimentação de sólidos), até $z = 6,62$ m, que corresponde à saída de topo do ciclone 1º estágio. Com o objetivo de localizar as posições das tomadas de pressão em relação às “singularidades” ou acessórios presentes na tubulação (que são a própria alimentação de sólidos e as alimentações de ar, depois a curva em “U”, o ciclone 1º estágio e as conexões flangeadas entre as seções), na Tabela 3.3 são mostradas as posições das tomadas na tubulação.

Tabela 3.3: Posições das tomadas de pressão.

Tomada nº	z (m)	Altura (m)	Seção
P1	0,06	1,83	Entrada do <i>downer</i>
P2	0,18	1,71	<i>Downer</i>
P3	0,44	1,45	<i>Downer</i>
P4	0,70	1,19	<i>Downer</i>
P5	0,94	0,95	Saída do <i>downer</i>
P6	1,04	0,85	Entrada da curva em “U”
P7	1,73	0,25	Centro da curva em “U”
P8	2,31	0,66	Saída da curva em “U”
P9	2,60	0,95	Entrada do <i>riser</i>
P10	3,17	1,52	<i>Riser</i>
P11	3,74	2,09	<i>Riser</i>
P12	4,31	2,66	<i>Riser</i>
P13	4,43	2,78	Saída do <i>riser</i>

Tomada nº	z (m)	Altura (m)	Seção
P14	5,90	3,06	Entrada do ciclone 1º estágio
P15	6,62	3,13	Saída do ciclone 1º estágio

No trabalho de Cremasco (2002) encontra-se a calibração do alimentador de sólidos, cuja curva está apresentada na Figura 3.14. Além da curva de calibração, foram adquiridos termopares que serão instalados na entrada e na saída do ar.

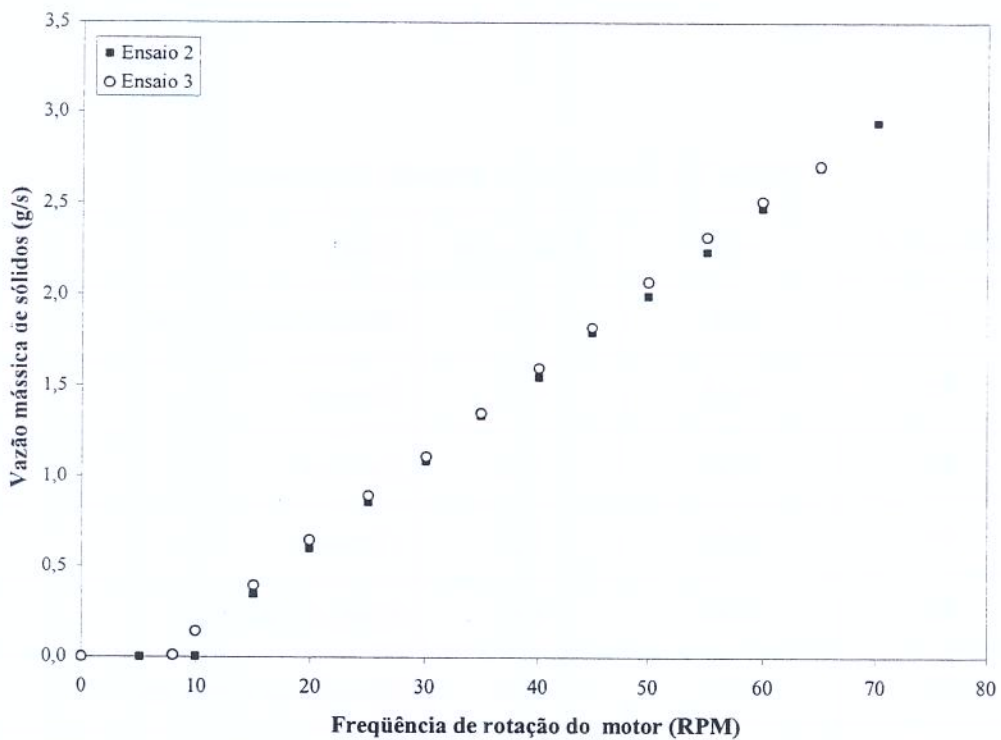


Figura 3.14: Curva de calibração da vazão de sólidos.

3.4. Procedimento Operacional da Unidade Multipropósito

A seguir é apresentado o procedimento experimental da Unidade Multipropósito para Craqueamento Catalítico, instalada no âmbito da FEQ/UNICAMP.

3.4.1. Partida da Unidade

- Preencher silo de carregamento, abaixo do ciclone de 1º estágio, com aproximadamente 30 kg de catalisador. Este silo tem por finalidade alimentar a rosca sem fim que dará início à circulação de sólidos;
- Verificar as válvulas borboletas de dreno e de regulação de vazão para a unidade. Fechar totalmente a válvula que regula a vazão de ar para a unidade e abrir totalmente a válvula de dreno. Fechar também as válvulas que regulam a vazão dos rotâmetros;
- Ligar o soprador;
- Abrir lentamente a válvula que regula vazão de ar para a unidade;
- Abrir lentamente a válvula do rotâmetro que regula vazão para a alimentação de ar até que o rotâmetro atinja um valor pré-determinado;
- Ajustar a vazão de modo que seja igual para cada ramal. Isto será feito com a ajuda de coluna d'água, que ficará interligada nas tomadas de pressão, antes e depois da placa de orifício, e ajustando-se as 04 (quatro) válvulas de regulação de vazão para a alimentação de ar;
- Repetir o mesmo procedimento para o rotâmetro que fornece ar para a outra alimentação de ar, caso necessário. Sempre realizar este procedimento apenas com o rotâmetro que se estiver ajustando alinhado e o outro fechado;
- Após a calibração de todos os ramais, abrir as válvulas dos dois rotâmetros;
- Fechar, parcial ou total (função da vazão e pressão desejada), a válvula de dreno de ar;
- Iniciar a alimentação de catalisador pela rosca sem fim, variando a rotação através do inversor de frequência até que se atinja a vazão requerida, de acordo com a necessidade do teste.

3.4.2. Operação da Unidade

- Fixar a alimentação de catalisador pela rotação da rosca sem fim, determinando a rotação através do inversor de frequência para a vazão requerida;
- Ligar o ar condicionado do laboratório e aguardar estabilização da temperatura do ambiente;
- Aguardar a estabilização do sistema, como: vazão de ar, vazão de sólidos e altura das colunas dos manômetros distribuídos na unidade;
- Após a estabilização do sistema inicia-se a aquisição dos dados de pressão estática.

3.4.3. Parada da Unidade

- Encerrar a alimentação de catalisador, parando a rosca sem fim, aguardar que toda carga retorne para o silo;
- Abrir a válvula de dreno de ar;
- Fechar a válvula que alimenta ar para a unidade;
- Encerrar a alimentação de ar, desligando o soprador.

3.5. Procedimento para aquisição de dados de pressão

Para a aquisição de dados de pressão na Unidade Multipropósito de Craqueamento Catalítico foram construídos 15 (quinze) manômetros em U, utilizando-se água como fluido manométrico. Através da leitura das deflexões manométricas, tem-se a distribuição axial de pressão estática ao longo da unidade.

3.6. Modelo simplificado para a descrição da fluidodinâmica do escoamento gás-sólido da Unidade Multipropósito

A descrição da fluidodinâmica em sistemas particulados expandidos, como ocorre na fluidização, pode ser feita por intermédio das equações da continuidade e do movimento para cada fase, em conjunto com as equações constitutivas.

Cremasco (2006), a partir do trabalho de Massarani (1997), obteve os seguintes equacionamentos, respectivamente, para o *downer* e para o *riser*, para a estimativa do valor da diferença de pressão considerando a influência do atrito gás-parede e do atrito partículas-parede, bem como sem os efeitos de aceleração:

$$\frac{\Delta P}{L} = (1 - \varepsilon)(\rho_p - \rho_f)g - \frac{1}{2D} [f_f \varepsilon \rho_f u^2 + f_p (1 - \varepsilon) \rho_p u_p^2] \quad (3.1)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = -(1 - \varepsilon)(\rho_p - \rho_f)g - \frac{1}{2D} [f_f \varepsilon \rho_f u^2 + f_p (1 - \varepsilon) \rho_p u_p^2] \quad (3.2)$$

As Equações 3.1 e 3.2 se diferem quanto ao sinal do termo $(1 - \varepsilon)(\rho_p - \rho_f)g$. Este termo representa o ganho ou a perda de pressão devido ao *holdup* de sólidos. No caso de escoamento unidimensional em que o sentido da força gravitacional é o mesmo do escoamento, caso do *downer*, este termo assume sinal positivo. No caso de sentidos opostos, caso do *riser*, este termo assume sinal negativo.

Há diversas correlações para estimar os valores tanto de f_f quanto de f_p . No caso do f_p encontram-se correlações como aquelas apresentadas na Tabela 2.3.

Para o fator de atrito gás-parede, tendo em vista que as seções estudadas foram construídas em aço-carbono, utilizou-se a correlação de Colebrook-White para tubos rugosos (Gomide, 1993):

$$\frac{1}{\sqrt{f_f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{K}{3,7D} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{f_f}} \right) \quad (3.3)$$

onde K é a rugosidade equivalente da parede do tubo. Para o aço-carbono utilizou-se $K = 0,0452$ m.

Tabela 2.3: Correlações para o fator de atrito sólido-parede (a partir de Klinzing, 1981; exceto a correlação de da Silva (1984)).

Autores	Correlação	Equação
Stemerding (1962)	0,012	(2.12a)
Reddy e Pei (1969)	$0,184 / u_p$ (*)	(2.12b)
Van Swaaij <i>et al.</i> (1970)	$0,32 / u_p$ (*)	(2.12c)
Kono e Saito (1969)	$0,114(gD)^{0,5} / u_p$	(2.12d)
Capes e Nakamura (1979)	$0,192 / u_p^{1,22}$ (*)	(2.12e)
Yang (1978)	$0,0126 \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \right) \left[\frac{(1-\varepsilon)u_t}{u - u_p} \right]$	(2.12f)
da Silva (1984)	$0,32 \left[\frac{(gD)^{0,5}}{u_p} \right]^{0,47}$	(2.12g)

(*) u_p é dado em m/s.

Nota-se nas Equações 3.1 e 3.2 que, para estimar o valor da diferença de pressão, há a necessidade de conhecer os valores das velocidades intersticiais das fases envolvidas, assim como da fração de vazios no leito. Todavia, tais velocidades para as fases fluida e particulada, em regime estabelecido, permanente e sistema diluído, são iguais a (Massarani, 1997):

$$u_p = \frac{Q_p}{(1-\varepsilon)A} \quad (3.4)$$

$$u = \frac{Q}{\varepsilon A} \quad (3.5)$$

Na situação de regime estabelecido, a velocidade relativa partícula-fluido para sistemas diluído é posta, respectivamente, para o *downer* e para o *riser*, como:

$$U = \frac{Q_p}{(1-\varepsilon)A} - \frac{Q}{\varepsilon A} \quad (3.6)$$

$$U = \frac{Q}{\varepsilon A} - \frac{Q_p}{(1-\varepsilon)A} \quad (3.7)$$

em que Q e Q_p , são as vazões volumétricas de fluido e de sólido; A é a área da seção transversal do escoamento. Por inspeção das Equações 3.4 e 3.5 verifica-se que a incógnita do modelo é a fração de vazios. Todavia, como mostrado por Massarani (1997), o efeito da presença da fase particulada na fluidodinâmica de suspensões é comumente expresso por meio de correlações na forma:

$$\frac{U}{U_T} = f(\text{Re}_\infty, \varepsilon) \quad (3.8)$$

sendo que U_T é a velocidade terminal e pode advir do número de Reynolds segundo:

$$\text{Re}_\infty = \frac{\rho d_p U_T}{\mu} \quad (3.9)$$

em que (Massarani, 1997):

$$\text{Re}_\infty = \left[\left(\frac{C_D \text{Re}^2}{24} \right)^{-0,95} + \left(\frac{C_D \text{Re}^2}{0,43} \right)^{-0,95/2} \right]^{-1/0,95} \quad (3.10)$$

e

$$C_D \text{Re}^2 = \frac{4}{3} \frac{\rho_f (\rho_p - \rho_f) g d_p^3}{\mu^2} \quad (3.11)$$

A Equação 3.8 foi estudada por diversos autores, cabendo ressaltar a proposta de Richardson e Zaki (1954) para partículas arredondadas (Massarani, 1997):

$$\frac{U}{U_T} = \varepsilon^n \quad (3.12)$$

sendo:	$n = 3,65$	$p/ \text{Re}_\infty < 0,2;$
	$n = 4,35 \text{Re}_\infty^{-0,03} - 1$	$p/ 0,2 < \text{Re}_\infty \leq 1,0;$
	$n = 4,45 \text{Re}_\infty^{-0,1} - 1$	$p/ 1 < \text{Re}_\infty \leq 500;$
	$n = 1,39$	$p/ \text{Re}_\infty > 500.$

Desta maneira, as Equações 3.6 e 3.7 podem ser retomadas do modo que se segue:

$$\varepsilon^n U_T = \frac{Q_p}{(1 - \varepsilon)A} - \frac{Q}{\varepsilon A} \quad (3.13)$$

$$\varepsilon^n U_T = \frac{Q}{\varepsilon A} - \frac{Q_p}{(1 - \varepsilon)A} \quad (3.14)$$

Conhecendo-se as características da fase particulada (diâmetro de partícula e massa específica), da fase fluida (temperatura, viscosidade dinâmica e massa específica), assim como as vazões volumétricas de fluido e de sólido, e os diâmetros do *downer* e do *riser*, dos quais pode-se calcular o valor da área da seção transversal do escoamento, é possível calcular a fração de vazios, as componentes de velocidade do fluido e das partículas. Conhecendo-se, por outro lado, a distância entre as tomadas de pressão, estima-se o valor da diferença de pressão, conforme as Equações 3.1 e 3.2.

Para a estimativa do valor da diferença de pressão da curva em “U”, utilizou-se a Equação 2.19, considerando-se o ΔP_{reta} como sendo a soma das Equações 3.1 e 3.2 para o comprimento equivalente correspondente a uma curva de 90° raio longo. O comprimento equivalente L_{eq} é definido como sendo o trecho de tubulação reta que causa perda de carga igual à do acessório considerado, para o mesmo regime de escoamento. Muitas vezes este comprimento é dado em múltiplos do diâmetro, ou seja, através da relação adimensional L_{eq}/D . Para fins de cálculo a tubulação real de comprimento L é substituída por outra de comprimento fictício $L + L_{\text{eq}}$, normalmente denominado comprimento total, e que se utiliza diretamente na equação do fator de atrito.

Crane Co. (1986) tabelou o comprimento equivalente L_{eq}/D de acessórios em função da relação R_c/D . Para a Unidade Multipropósito, tem-se $R_c/D = 526/82 = 6,41$. Assim, após uma interpolação de dados, chega-se ao valor de $L_{\text{eq}}/D = 18,45$ para uma curva de 90° raio longo, ou seja, metade da curva em “U” da Unidade Multipropósito. Conforme dito anteriormente, tratar-se-á a curva em “U” como a soma de dois acessórios tipo curva de 90° raio longo, um para o escoamento vertical descendente e outro para o escoamento vertical ascendente.

Já para a estimativa do valor da diferença de pressão do ciclone 1° estágio, utilizaram-se as Equações 2.26 e 2.27, testando-se para esta última todas as constantes apresentadas na Tabela 2.4.

A diferença de pressão no transporte pneumático horizontal não foi avaliada nesta dissertação devido ao motivo de a unidade estudada apresentar esta seção com comprimento muito pequeno e área variável, sendo que sua função é apenas de alimentar a mistura, proveniente do *riser*, na entrada do ciclone 1° estágio.

4. Resultados e Discussões

Este capítulo apresenta todos os resultados obtidos experimentalmente na Unidade Multipropósito de Craqueamento Catalítico, assim como as análises e discussões dos mesmos. Estes resultados são demonstrados na forma de gráficos, para melhor visualização e interpretação de seus significados. Para se fazer uma comparação entre o valor da diferença de pressão obtida experimentalmente e o calculado a partir do modelo simplificado proposto no item 3.6, utilizou-se a forma de tabelas.

Os ensaios experimentais foram realizados operando a unidade inicialmente somente com gás e, na sequência, com fluxos mássicos de sólidos iguais a $0,032\text{kg/m}^2\text{s}$, $0,076\text{kg/m}^2\text{s}$, $0,120\text{kg/m}^2\text{s}$, $0,164\text{kg/m}^2\text{s}$ e $0,208\text{kg/m}^2\text{s}$ alimentados na entrada do *downer*. Realizaram-se ao todo três tipos de ensaios utilizando vazões de ar iguais a $7,5\text{m}^3/\text{h}$, $10\text{m}^3/\text{h}$, $15\text{m}^3/\text{h}$, $20\text{m}^3/\text{h}$, $25\text{m}^3/\text{h}$ e $30\text{m}^3/\text{h}$. A alimentação de ar ocorreu da seguinte forma:

- i) Ensaios A: alimentação de ar apenas na entrada do *downer*;
- ii) Ensaios B: alimentação de ar apenas na entrada da curva em “U”;
- iii) Ensaios C: alimentação de ar 50% na entrada do *downer* e 50% na entrada da curva em “U”.

4.1. Avaliação do regime de escoamento gás-sólido da Unidade Multipropósito

O regime de escoamento no qual ocorre o transporte de partículas determina as características fluidodinâmicas do sistema. Konrad (1986) lista quatro meios alternativos de distinguir os escoamentos de fase densa e de fase diluída:

- com base nas taxas de fluxo mássico de sólidos/ar;
- com base na concentração de sólidos;
- o escoamento da fase densa existe onde os sólidos preenchem completamente a seção transversal do tubo em algum ponto;
- o escoamento de fase densa existe quando, para escoamento horizontal, a velocidade do gás é insuficiente para suportar todas as partículas em suspensão, e, para escoamento vertical onde ocorre o fluxo inverso de sólidos.

Segundo Grace *et al* (1999) em Chen e Li (2004), para sistemas densos deve-se operar a um fluxo mássico de sólidos maior que $200\text{kg/m}^2\text{s}$ e $\varepsilon < 0,90$ ao longo de todo o *riser*.

Com base nas taxas de fluxos mássicos, foram realizados ensaios com a Unidade Multipropósito operando a velocidades de ar iguais a $0,394\text{/s}$, $0,526\text{m/s}$, $0,789\text{m/s}$, $1,052\text{m/s}$, $1,315\text{m/s}$ e $1,578\text{m/s}$ e a fluxos mássicos de sólidos iguais a $0,000\text{kg/m}^2\text{s}$, $0,032\text{kg/m}^2\text{s}$, $0,076\text{kg/m}^2\text{s}$, $0,120\text{kg/m}^2\text{s}$, $0,164\text{kg/m}^2\text{s}$ e $0,208\text{kg/m}^2\text{s}$ alimentados na entrada do *downer*.

Com base na concentração de sólidos, estimou-se a fração de vazios do leito através da Equação 3.13. E para todas as condições operacionais estudadas, a Equação 3.13 sempre resultou em $\varepsilon > 0,99$.

Deste modo, o sistema atende aos dois primeiros meios alternativos de Konrad (1986) para escoamentos de fase diluída. Quanto aos dois últimos meios não foi possível comprová-los, pois a Unidade Multipropósito não possui trechos transparentes para a visualização do escoamento, porém, após os experimentos não foi encontrado acúmulo significativo de sólidos na seção da curva em “U” (seção de escoamento mais crítico da unidade).

Assim, considera-se neste trabalho que a Unidade Multipropósito opera em sistema diluído.

4.2. Avaliação da velocidade de choking do escoamento gás-sólido da Unidade Multipropósito

Conforme discutido no item 4.1, para que a Unidade Multipropósito opere em sistema diluído, uma das condições é de que, para escoamento vertical não ocorra o fluxo inverso de sólidos, ou seja, o fenômeno de *choking*.

Deste modo, obtiveram-se os valores da velocidade de *choking* utilizando-se os modelos propostos na Tabela 2.2 (Equações 2.11a, 2.11b, 2.11c e 2.11d) a fim de se avaliar a ocorrência ou não deste fenômeno na seção do *riser* da Unidade Multipropósito. Os resultados são apresentados nas Tabelas A.1 à A.12 do Apêndice A.

Há de se notar, através da análise das Tabelas A.1 à A.12, que em nenhuma ocasião a velocidade de *choking* calculada para a seção do *riser* foi superior a 0,394 m/s, velocidade mais baixa utilizada nos ensaios experimentais. Deste modo, isto vem a reforçar a consideração feita no item 4.1 de que a Unidade Multipropósito opera em sistema diluído, uma vez que não há indícios da ocorrência do fenômeno de *choking*.

Para escoamento horizontal, a condição para operação em sistema diluído, ou seja, velocidade do gás suficiente para suportar todas as partículas em suspensão, não foi avaliada devido ao motivo de a unidade estudada apresentar uma seção de transporte pneumático horizontal com comprimento muito pequeno e área variável, sendo que sua função é apenas de alimentar a mistura, proveniente do *riser*, na entrada do ciclone 1º estágio. Deste modo, não foram obtidos os valores da velocidade de *saltation*, conforme Equação 2.21.

4.3. Avaliação dos resultados de distribuição axial de pressão estática obtidos no escoamento gás-sólido da Unidade Multipropósito

Operando a unidade inicialmente somente com gás, a fim de se efetuar uma verificação da consistência dos dados experimentais, foram realizados ensaios utilizando vazões de ar iguais a 7,5m³/h, 10m³/h, 15 m³/h, 20 m³/h, 25 m³/h, 30 m³/h e fluxos mássicos de sólidos iguais a 0,000kg/m²s, 0,032kg/m²s, 0,076kg/m²s, 0,120kg/m²s, 0,164kg/m²s e 0,208kg/m²s alimentados na entrada do *downer*. Os ensaios foram realizados a uma temperatura média de 30°C. Os valores obtidos para as pressões estáticas ao longo da Unidade Multipropósito utilizando-se apenas a alimentação de ar na entrada do *downer* são apresentados nas Figuras 4.1 à Figura 4.6.

Por intermédio da inspeção das Figuras 4.1 à 4.6, verifica-se, a diminuição da pressão estática ao longo do escoamento. Esta perda está associada, entre outros fatores, à ação do arraste e à de atrito entre ar e parede do equipamento, bem como a presença de sólidos, os quais têm por efeito a diminuição da transferência de quantidade de movimento por ação cisalhante, cuja propagação ocorre da parede em direção ao escoamento central. Observa-se também que há um aumento dos valores de pressão estática com o aumento da velocidade do ar.

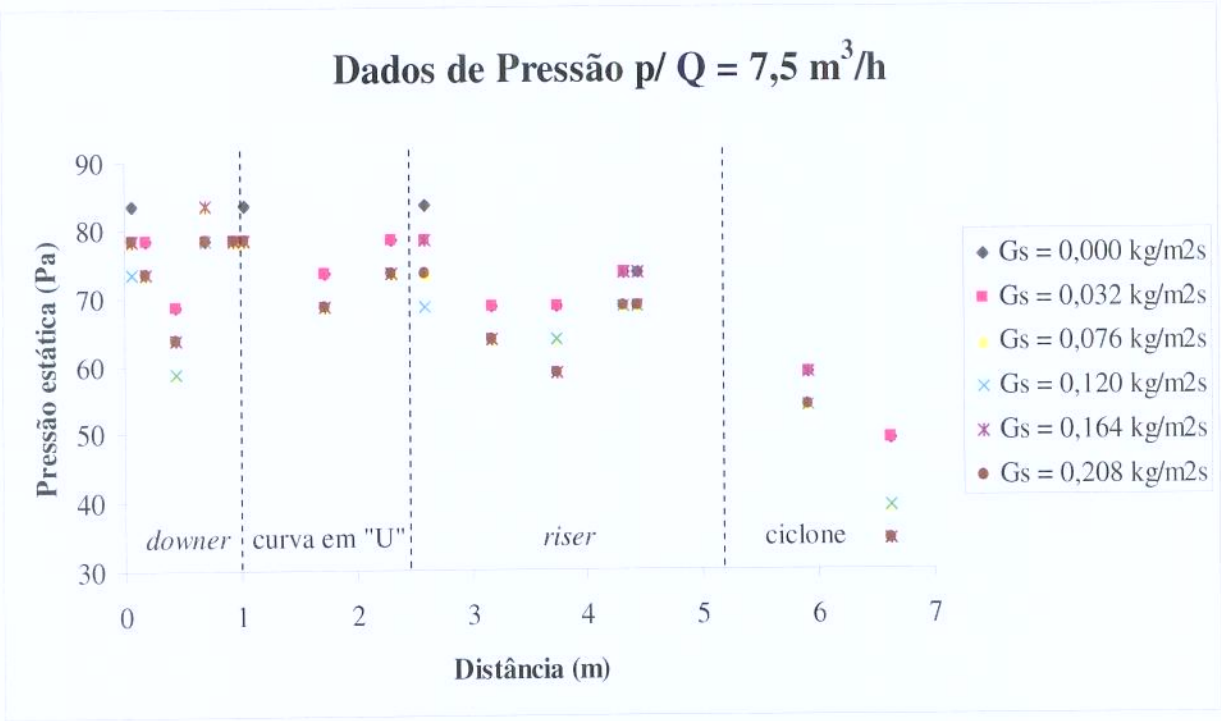


Figura 4.1: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.

Ensaio A. Vazão de ar de 7,5m³/h (0,394 m/s).

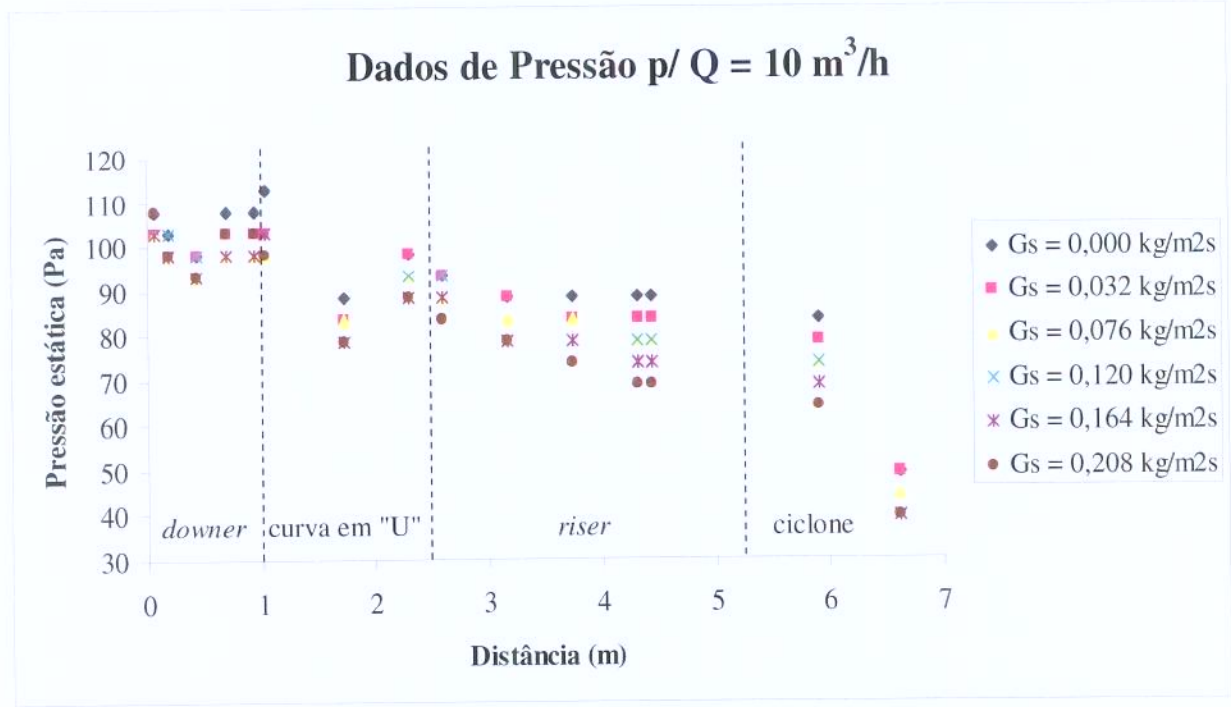


Figura 4.2: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.

Ensaio A. Vazão de ar de 10m³/h (0,526 m/s).

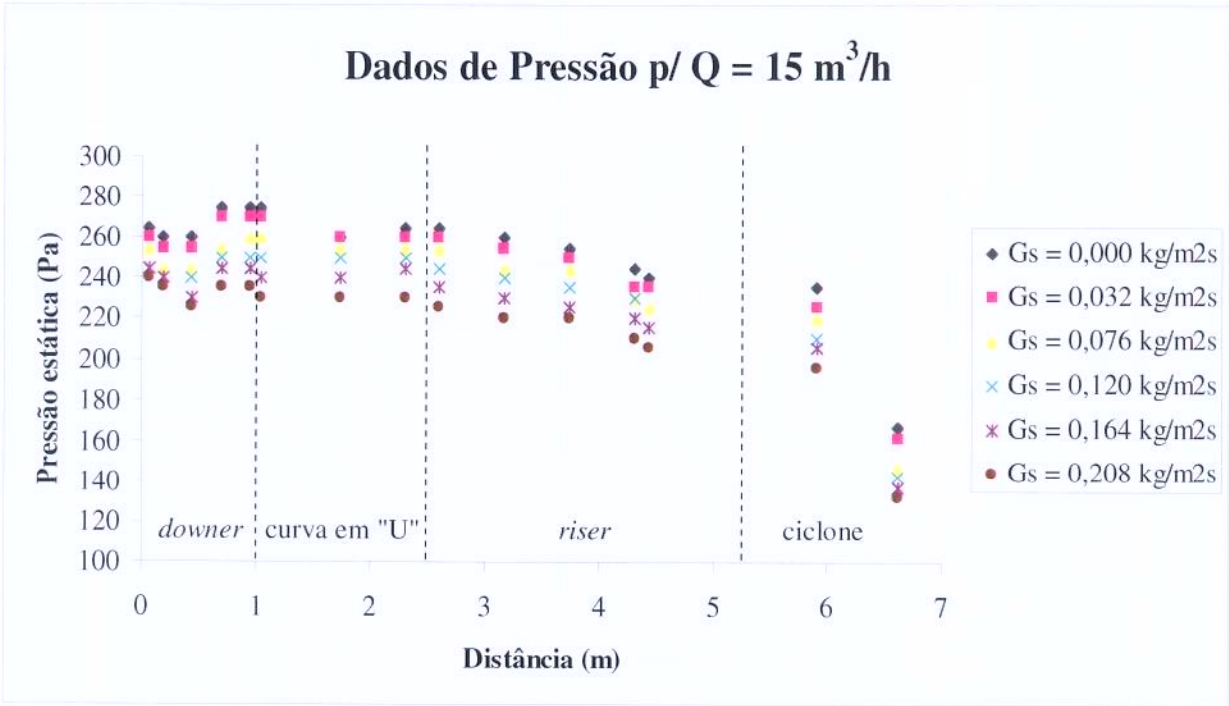


Figura 4.3: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.

Ensaio A. Vazão de ar de 15m³/h (0,789 m/s).

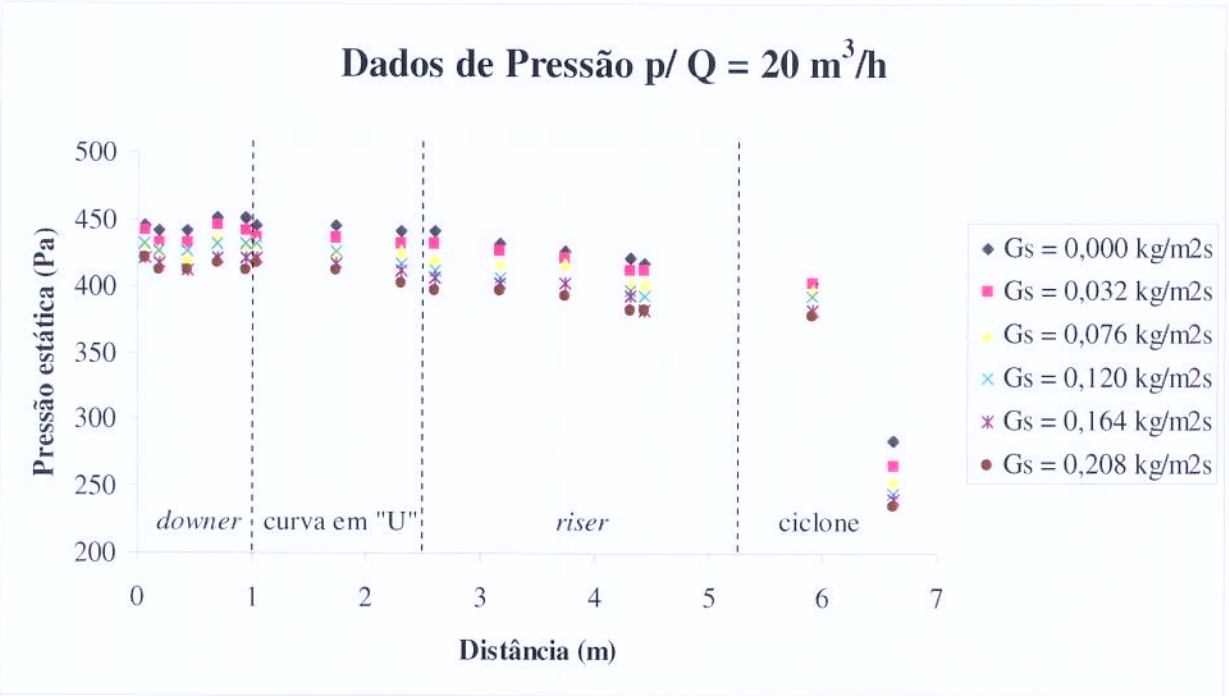


Figura 4.4: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.

Ensaio A. Vazão de ar de 20m³/h (1,052 m/s).

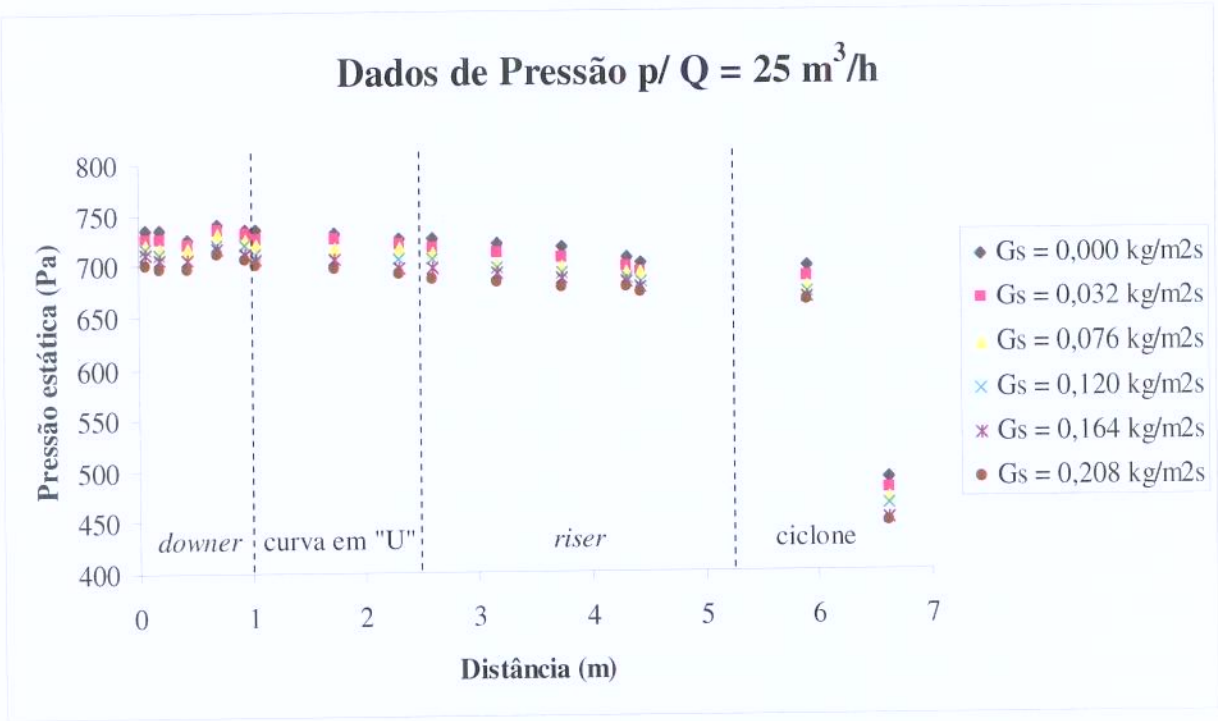


Figura 4.5: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.

Ensaio A. Vazão de ar de $25 \text{ m}^3/\text{h}$ ($1,315 \text{ m/s}$).

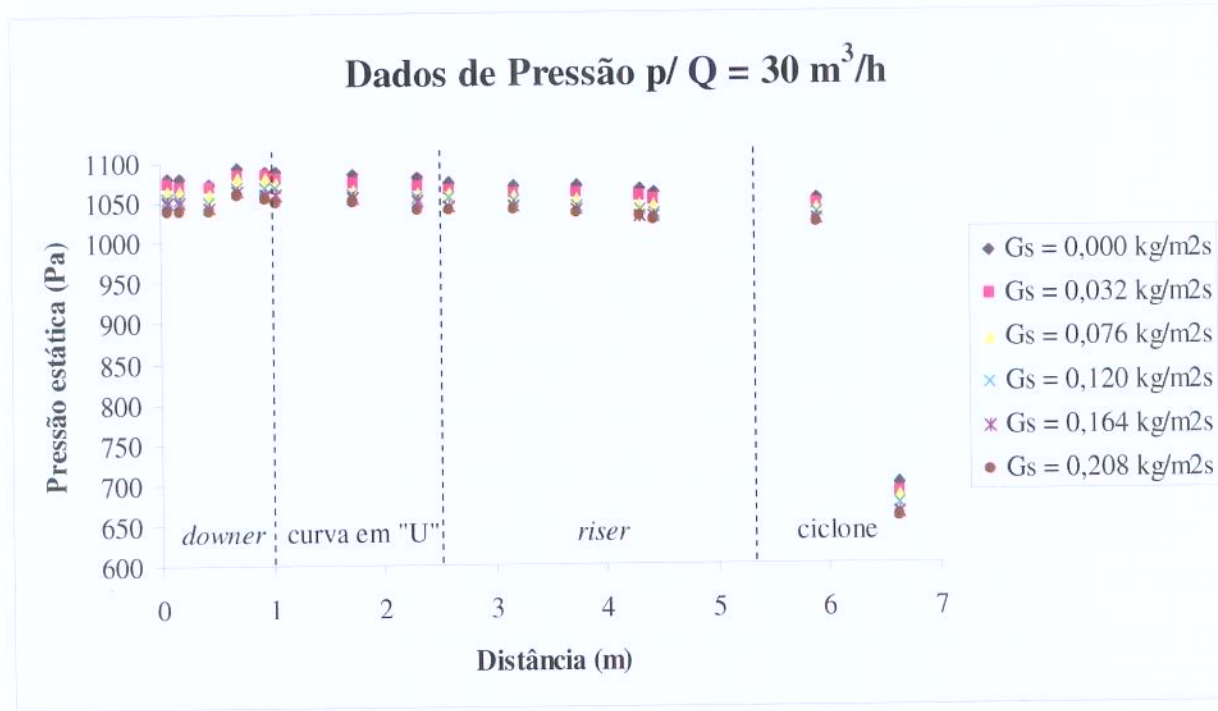


Figura 4.6: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.

Ensaio A. Vazão de ar de $30 \text{ m}^3/\text{h}$ ($1,578 \text{ m/s}$).

Para o escoamento somente com gás, a pressão estática ao longo do escoamento aumenta na medida em que se aumenta a vazão de gás. Devido ao tipo de medidor de pressão usado, esta diferença não pode ser observada tão acuradamente, pois os valores experimentais das diferenças de pressão entre dois pontos subseqüentes estão em torno do erro da leitura da deflexão manométrica, comprometendo a análise quantitativa dos resultados. Porém, pode-se observar que o aumento de pressão foi proporcional à vazão, e como os escoamentos foram todos realizados na mesma tubulação, foi proporcional à velocidade na qual o gás escoava pela Unidade Multipropósito.

Para o escoamento com a mistura gás-sólido, pode-se ver que a presença de sólidos provoca diminuição na pressão estática ao longo do escoamento. Esta observação pode ser explicada pelo fato de a presença de sólidos acarretar no aumento da ação cisalhante da parede da tubulação. Com isto o gás perde energia de pressão para aumentar sua energia cinética, conservando assim a energia total do sistema.

Nas Figuras 4.1 à 4.6, constata-se claramente que a maior perda de carga do sistema ocorre no ciclone 1º estágio e, a fim de se ter uma melhor visualização dos dados experimentais e proporcionar uma análise comparativa sobre as perdas de carga nas diferentes seções de escoamento, apresentam-se a seguir as Figuras 4.7 à 4.12, as quais excluem o ponto P15 ($z = 6,62$ m) localizado na saída do ciclone 1º estágio.

Observa-se nas Figuras 4.7 à 4.12 que nas proximidades de $z = 0$ (seção do *downer*) ocorre um aumento da pressão entre as posições $z = 0,44$ e $0,70$ m seguida por uma redução contínua para z acima de $0,70$ m, indo de encontro com o comportamento observado por Lehner e Wirth (1999) nas Figuras 2.10 e 2.11. Isto indica que entre as posições $z = 0,44$ e $0,70$ m está havendo uma maior contribuição do peso das partículas em relação às contribuições dos atritos gás-parede e partículas-parede. O fato do valor da pressão estática em $z = 0,70$ m ser sempre maior do que em $z = 0,44$ m, para qualquer que seja a concentração de sólidos, também pode estar associado à desaceleração do escoamento em virtude da presença de uma curva à jusante do *downer*. Esta singularidade altera a configuração do escoamento em $z = 0,70$ m reduzindo a área de escoamento neste ponto, o que provoca o aumento brusco na velocidade do gás e cria uma “*vena contracta*” nesta região (Kavassaki, 1985). Assim, as medidas de pressão estática, que são feitas na parede do tubo, não são representativas neste ponto, mascarando os resultados.

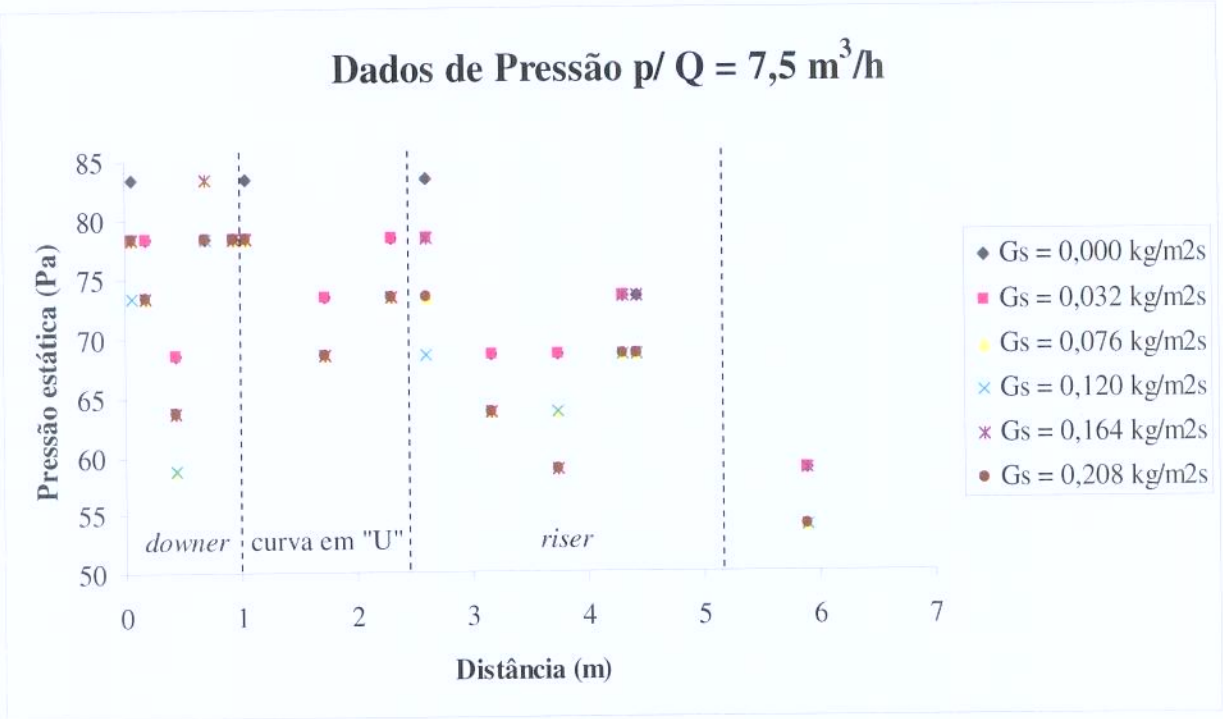


Figura 4.7: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.

Ensaio A. Vazão de ar de 7,5m³/h (0,394 m/s).

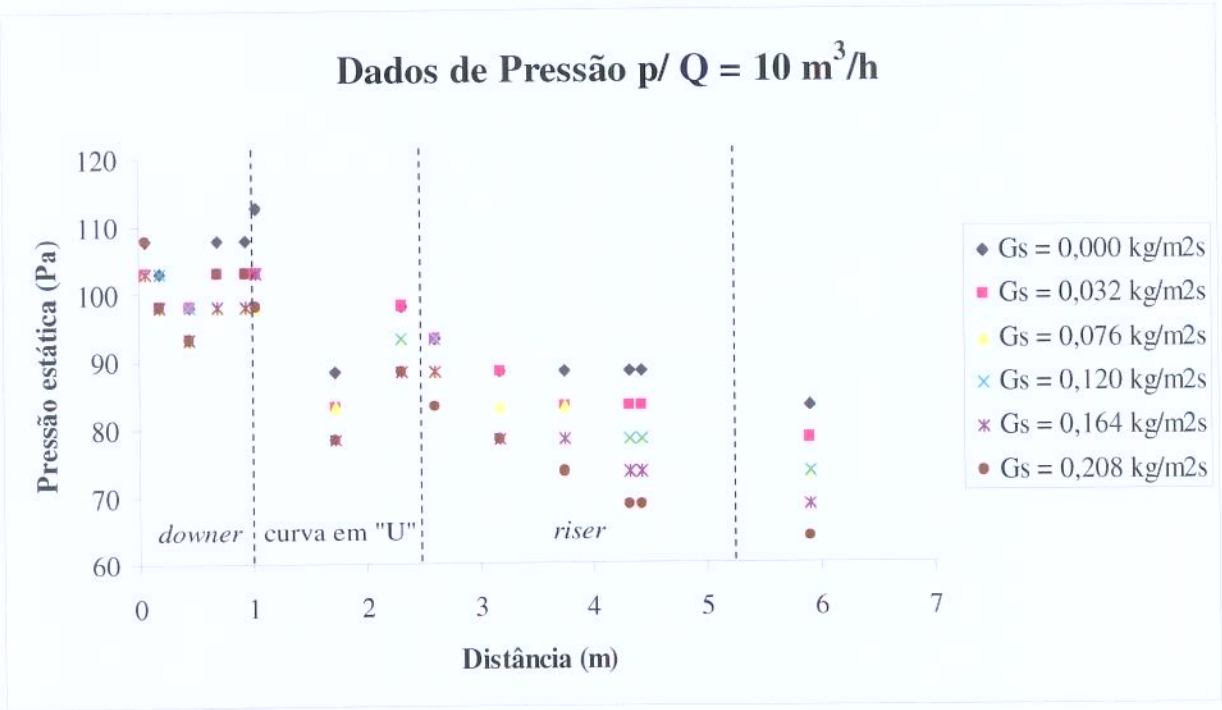


Figura 4.8: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.

Ensaio A. Vazão de ar de 10m³/h (0,526 m/s).

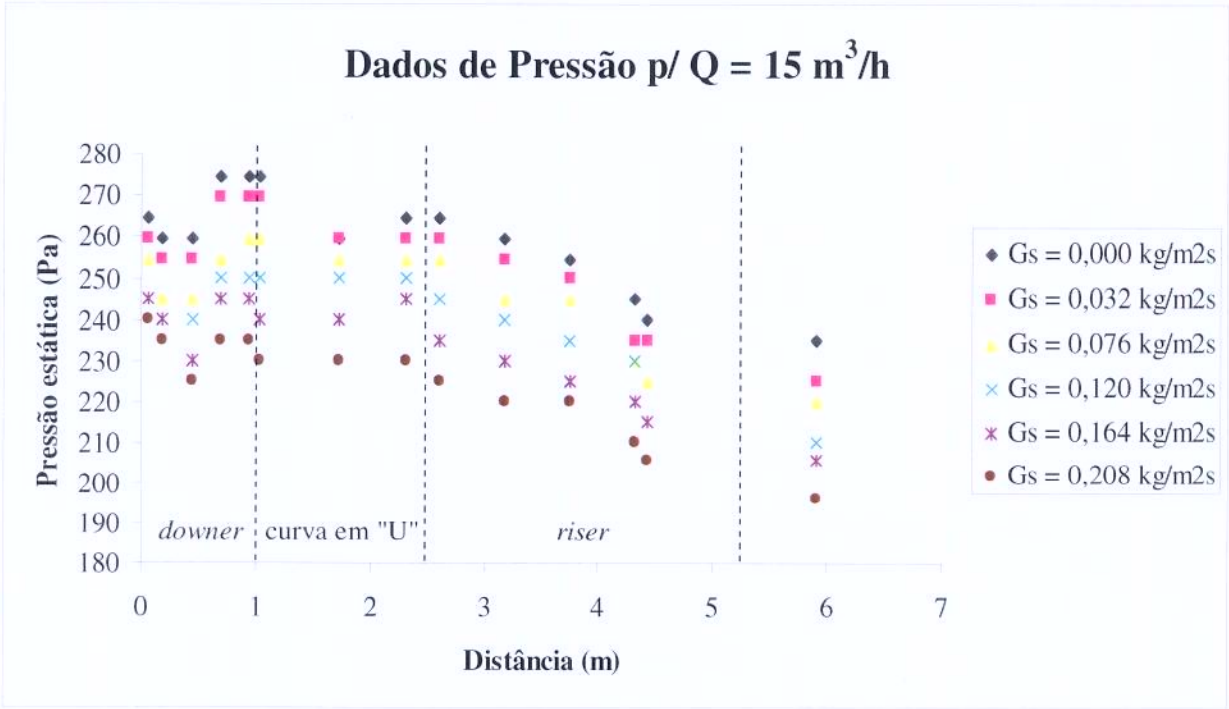


Figura 4.9: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.

Ensaio A. Vazão de ar de 15m³/h (0,789 m/s).

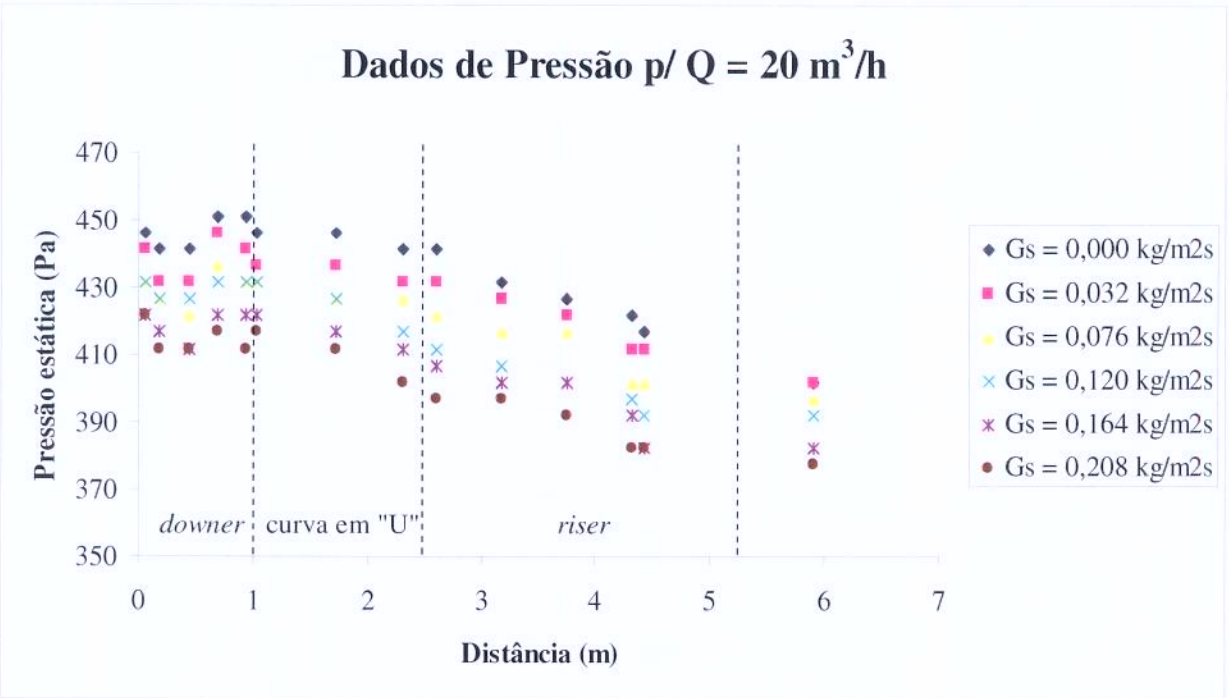


Figura 4.10: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.

Ensaio A. Vazão de ar de 20m³/h (1,052 m/s).

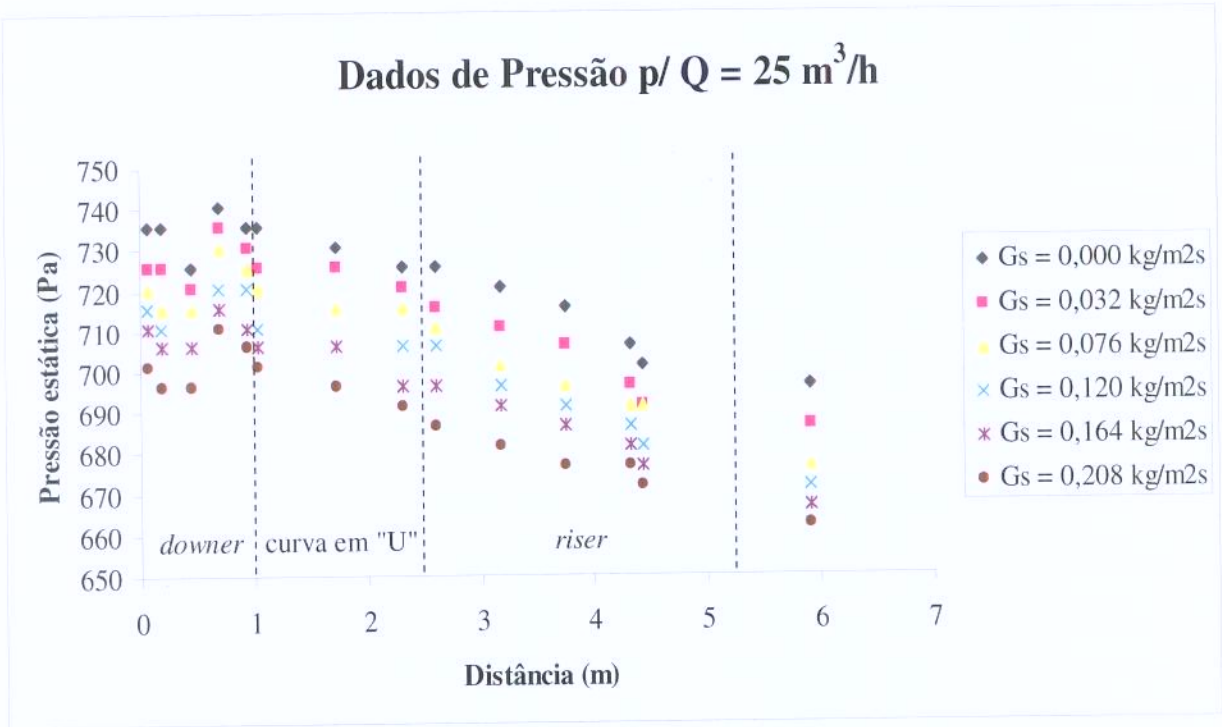


Figura 4.11: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.

Ensaio A. Vazão de ar de 25m³/h (1,315 m/s).

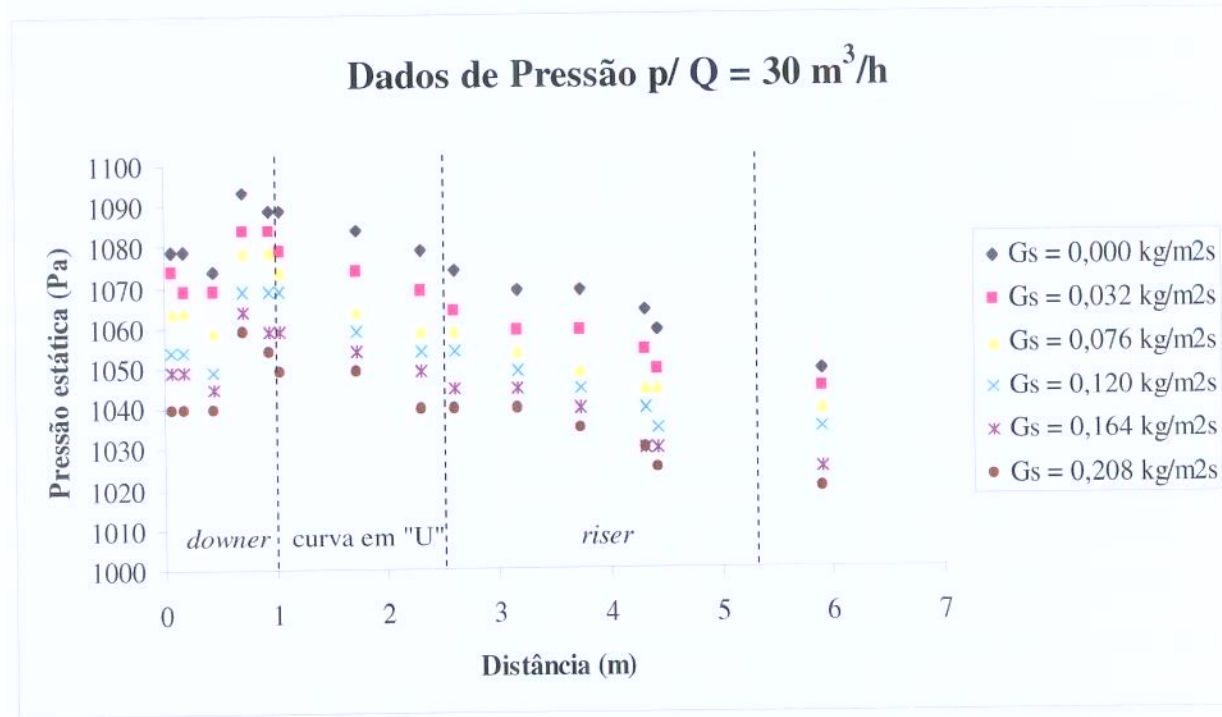


Figura 4.12: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.

Ensaio A. Vazão de ar de 30m³/h (1,578 m/s).

Há de se notar nas Figuras 4.7 e 4.8, velocidades do ar iguais a 0,394 e 0,526 m/s, que os valores de pressão estática para todos os fluxos de sólidos aumentam entre as posições $z = 1,73$ e $2,31$ m (entrada da seção do *riser*). Este fenômeno pode estar associado à aceleração do escoamento em virtude da presença de uma curva a montante do *riser*. A partir da Figura 4.9, ou seja, velocidade do ar igual a 0,789 m/s, observa-se uma diminuição dos valores de pressão estática entre as posições $z = 1,04$ e $2,31$ m (seção da curva em “U”). Nestes casos, o aumento das perdas de carga para a curva em “U” não é tão significativo, provavelmente porque o transporte ocorre em regime diluído.

Há de se notar na Figura 4.7, velocidade do ar igual a 0,394 m/s, que os valores de pressão estática para todos os fluxos de sólidos aumentam entre as posições $z = 3,74$ e $4,31$ m (seção do *riser*). Isto pode estar associado, conforme a inspeção da Equação 3.2, à maior contribuição do peso dos sólidos em relação às perdas de carga devidas às contribuições dos atritos gás-parede e partículas-parede e mesmo devido à desaceleração dos sólidos. A partir da Figura 4.8, velocidade do ar igual a 0,526 m/s, o comportamento da pressão estática modifica-se. Isto pode ser creditado à ocorrência do fenômeno oposto ao relatado para velocidade do gás igual a 0,394 m/s. Neste caso é possível supor que entre as tomadas de pressão localizadas a $z = 3,74$, $4,31$ e $4,43$ m, exista uma região de desaceleração de sólidos.

A seguir, nas Figuras 4.13 à 4.18, apresentam-se os valores obtidos para as pressões estáticas ao longo da Unidade Multipropósito utilizando-se apenas a alimentação de ar na entrada da curva em “U”.

O objetivo destes ensaios é o de se permitir trabalhar com a máxima concentração possível de sólidos na região do *downer*. Além disso, pretende-se também eliminar a região de desaceleração imposta pela seção da curva em “U”, uma vez que o alimentador de ar da entrada da curva em “U” está situado entre as posições $z = 1,04$ e $1,73$ m, ou seja, exatamente na região de desaceleração cuja presença do acessório impõe ao sistema. Além de desacelerar o escoamento, a presença das curvas, no caso do escoamento gás-sólido, gera uma separação, já que a quantidade de movimento das partículas na direção axial tende a arremessá-los em direção à parede mais externa e as forças centrífugas nas curvas provocam a mudança de direção. Assim, são criadas regiões de acúmulo de partículas devido à segregação (Patrocínio e Ferreira, 2004).

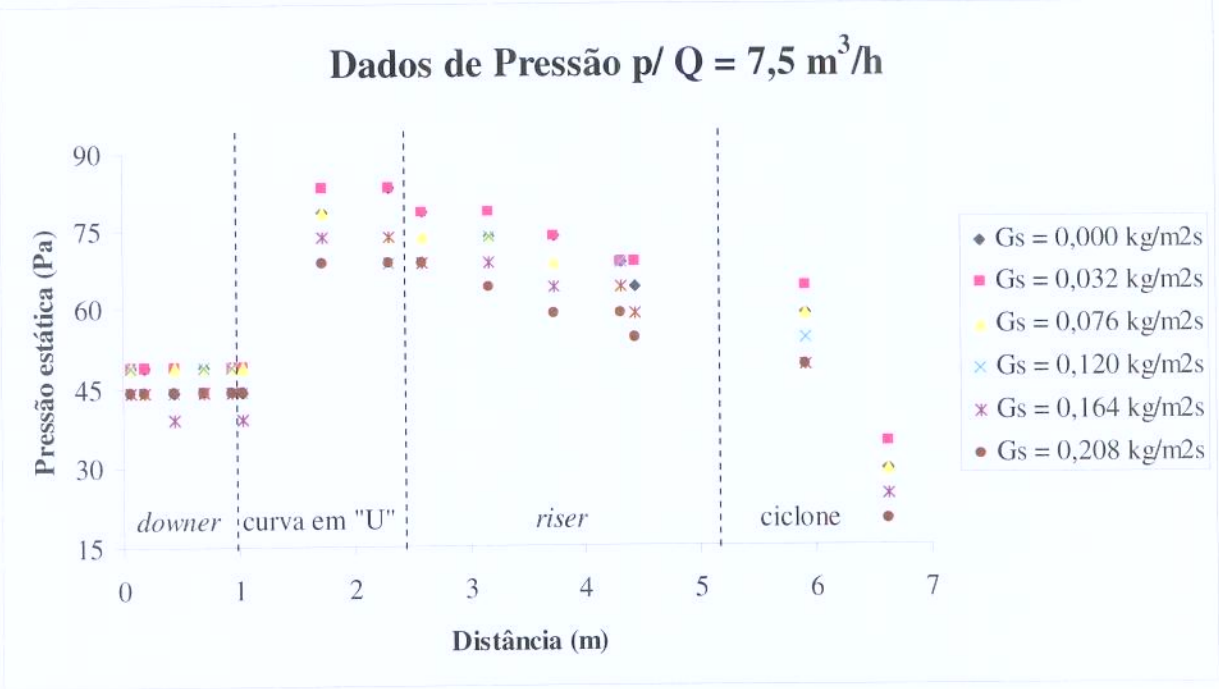


Figura 4.13: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.

Ensaio B. Vazão de ar de 7,5m³/h (0,394 m/s).

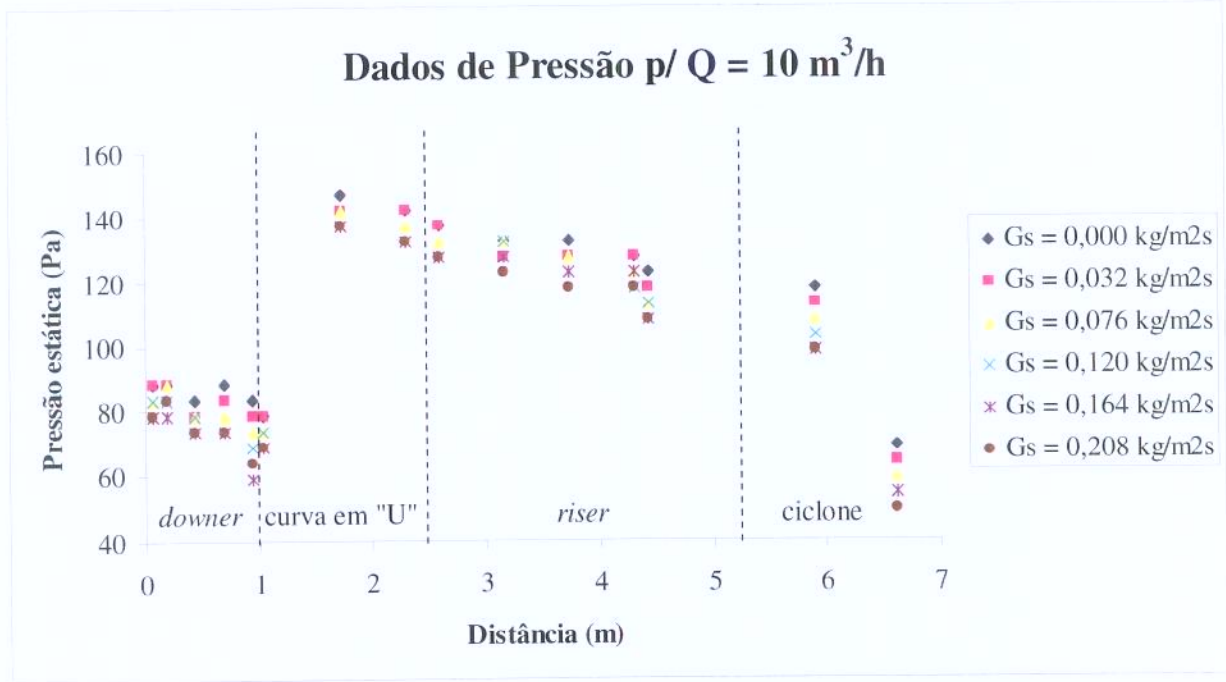


Figura 4.14: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.

Ensaio B. Vazão de ar de 10m³/h (0,526 m/s).

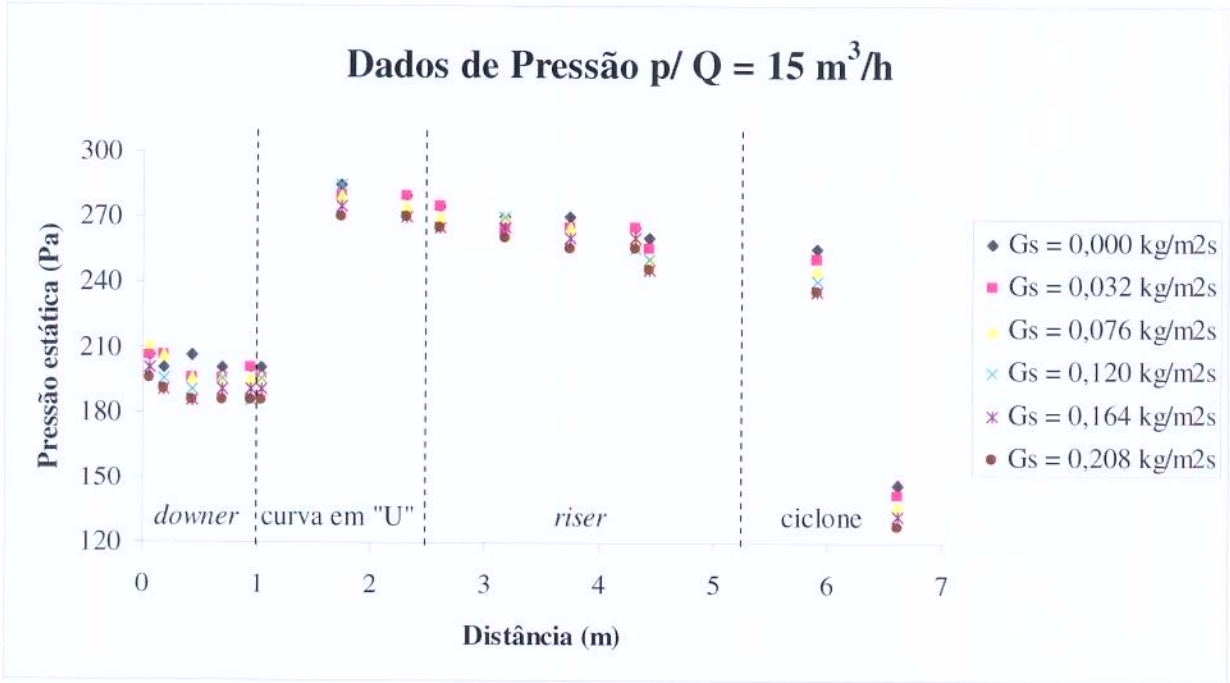


Figura 4.15: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.

Ensaio B. Vazão de ar de 15m³/h (0,789 m/s).

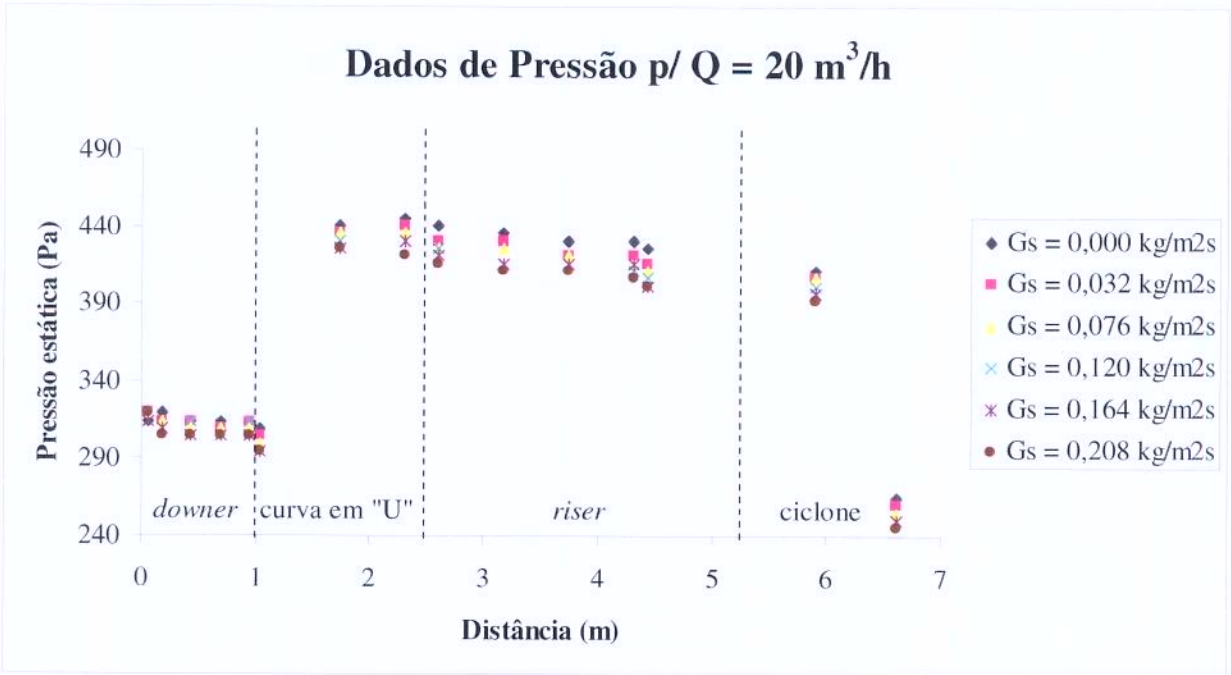


Figura 4.16: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.

Ensaio B. Vazão de ar de 20m³/h (1,052 m/s).

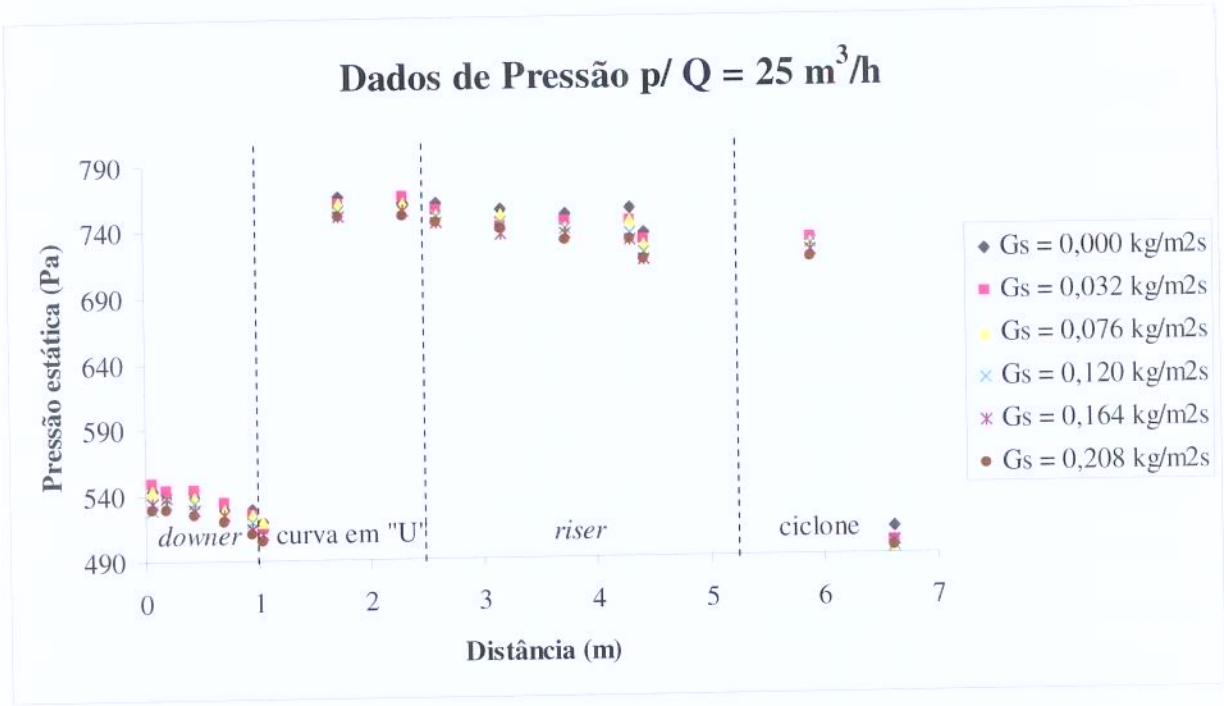


Figura 4.17: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.

Ensaio B. Vazão de ar de 25m³/h (1,315 m/s).

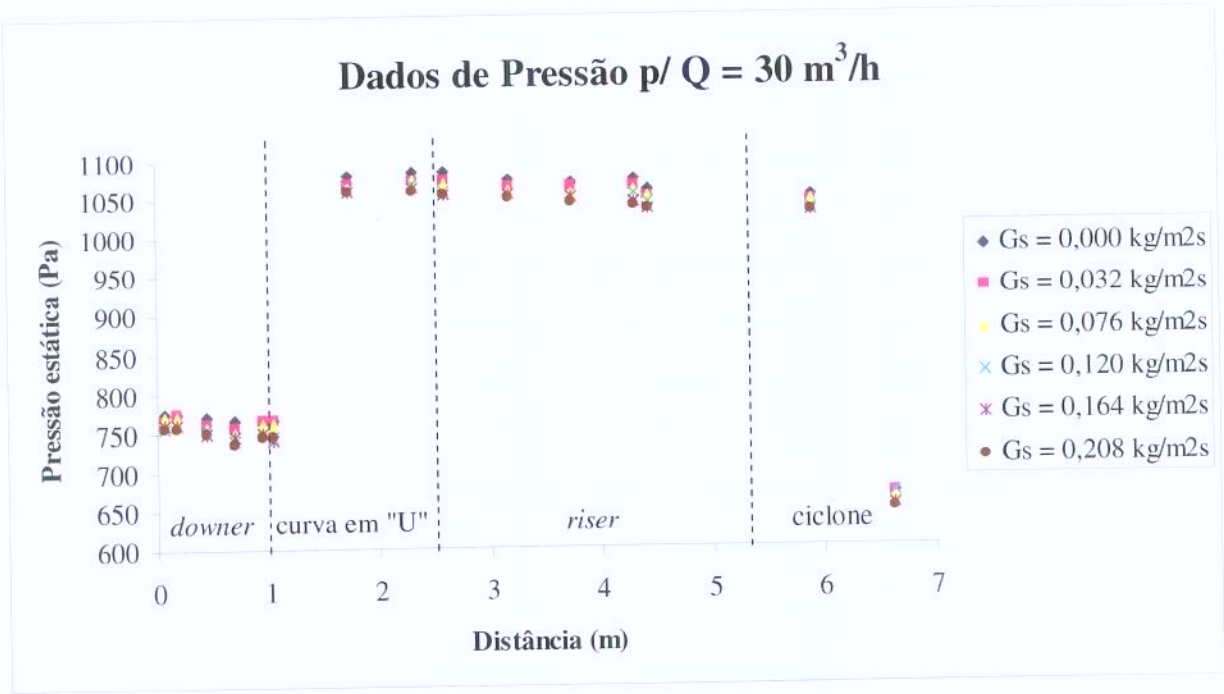


Figura 4.18: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.

Ensaio B. Vazão de ar de 30m³/h (1,578 m/s).

A utilização do alimentador de ar da entrada da curva em “U” também tem a função de eliminar regiões de acúmulo de sólidos e de, principalmente, contribuir para uma maior aceleração do escoamento antes da entrada do *riser*, diminuindo assim a região de aceleração desta seção e fazendo com que se atinja mais rapidamente o escoamento plenamente desenvolvido.

Por intermédio da inspeção das Figuras 4.13 à 4.18, verifica-se, notadamente, o aumento da pressão estática do sistema ao longo do escoamento a partir do alimentador de ar da entrada da curva em “U”. Ou seja, a inserção de vazão de ar no sistema fez com que a pressão estática do escoamento, a partir daquele ponto, aumentasse. Este aumento de pressão a partir do alimentador de ar da entrada da curva em “U” pode ter gerado uma turbulência no escoamento, causando uma queda de pressão permanente à montante deste dispositivo.

Deste modo, tem-se a pressão no *downer* profundamente alterada com a utilização do alimentador de ar na curva em “U”. Neste caso, há o indicativo de que o brusco aumento da pressão estática a partir do alimentador de ar da entrada da curva em “U” produziu no sistema do *downer* efeitos inerciais adicionais, como por exemplo, um novo termo de aceleração na Equação 3.1.

Poderia-se até dizer que se trata de um caso particular do Princípio de Le Chatelier. O Princípio de Le Chatelier (da físico-química) diz: "Modificando-se uma das condições que definem o estado de um sistema em equilíbrio, o mesmo responde opondo-se a esta alteração." Ou seja, quando a vazão de ar do alimentador acelera as partículas na entrada da curva em “U”, elas ganham maior velocidade e se distanciam das partículas que escoam pelo *downer*. Ora, a distância entre os objetos é "uma das condições que definem o estado do conjunto", logo o sistema responde "opondo-se a esta alteração", ou seja, aproximando as partículas (força de atração). Isto gera o efeito de sucção das partículas do *downer*.

Observa-se nas Figuras 4.13 à 4.18 que nas proximidades de $z = 0$ (seção do *downer*) não ocorre mais o comportamento apresentado nas Figuras 4.1 à 4.12 para a variação da pressão estática, com um aumento da pressão entre as posições $z = 0,44$ e $0,70$ m. Isto corrobora a afirmação de que o alimentador de ar da entrada da curva em “U” produziu no *downer* um efeito de aceleração adicional, indicando que, neste caso, o

sistema, em termos de diferença de pressão, esteja sendo governado por este efeito em relação à contribuição do peso das partículas.

Observa-se também na Figura 4.13, velocidade do ar igual a 0,394 m/s, que os valores de pressão estática para todos os fluxos de sólidos não mais aumentam entre as posições $z = 3,74$ e $4,31$ m (seção do *riser*), conforme apresentado na Figura 4.7. Com isto, a utilização do alimentador de ar da entrada da curva em “U” eliminou a região de desaceleração contida entre as tomadas de pressão localizadas a $z = 3,74$, $4,31$ e $4,43$ m.

A seguir, nas Figuras 4.19 à 4.22, apresentam-se os valores obtidos para as pressões estáticas ao longo da Unidade Multipropósito utilizando-se, em conjunto, as alimentações de ar na entrada do *downer* e na entrada da curva em “U”.

O objetivo destes ensaios é, além de manter as melhorias implantadas nos ensaios apresentados nas Figuras 4.13 à 4.18, eliminar a grande diferença de pressão estática introduzida ao escoamento com a utilização do alimentador de ar da entrada da curva em “U”. Utilizar-se-á nestes ensaios a mesma vazão para cada alimentador de ar. Com isso, pretende-se proporcionar uma distribuição de pressão estática mais representativa a fim de viabilizar uma análise mais crítica do escoamento.

Por intermédio da inspeção das Figuras 4.19 à 4.22, verifica-se que a utilização, em conjunto, dos alimentadores de ar da entrada do *downer* e da entrada da curva em “U” contrabalanceou a pressão estática a jusante e a montante do alimentador de ar da curva em “U”, pois a introdução de vazão neste último adicionou uma aceleração extra ao *downer*.

Observa-se nas Figuras 4.19 à 4.22 que nas proximidades de $z = 0$ (seção do *downer*) voltou a ocorrer o comportamento apresentado nas Figuras 4.7 à 4.12 para a variação da pressão estática, com um aumento da pressão entre as posições $z = 0,44$ e $0,70$ m. Isto corrobora a afirmação de que o alimentador de ar da entrada da curva em “U” produziu no *downer* um efeito de aceleração adicional, indicando que, naquele caso, o sistema, em termos de diferença de pressão, estava sendo governado por este efeito em relação à contribuição do peso das partículas, para o regime estabelecido.

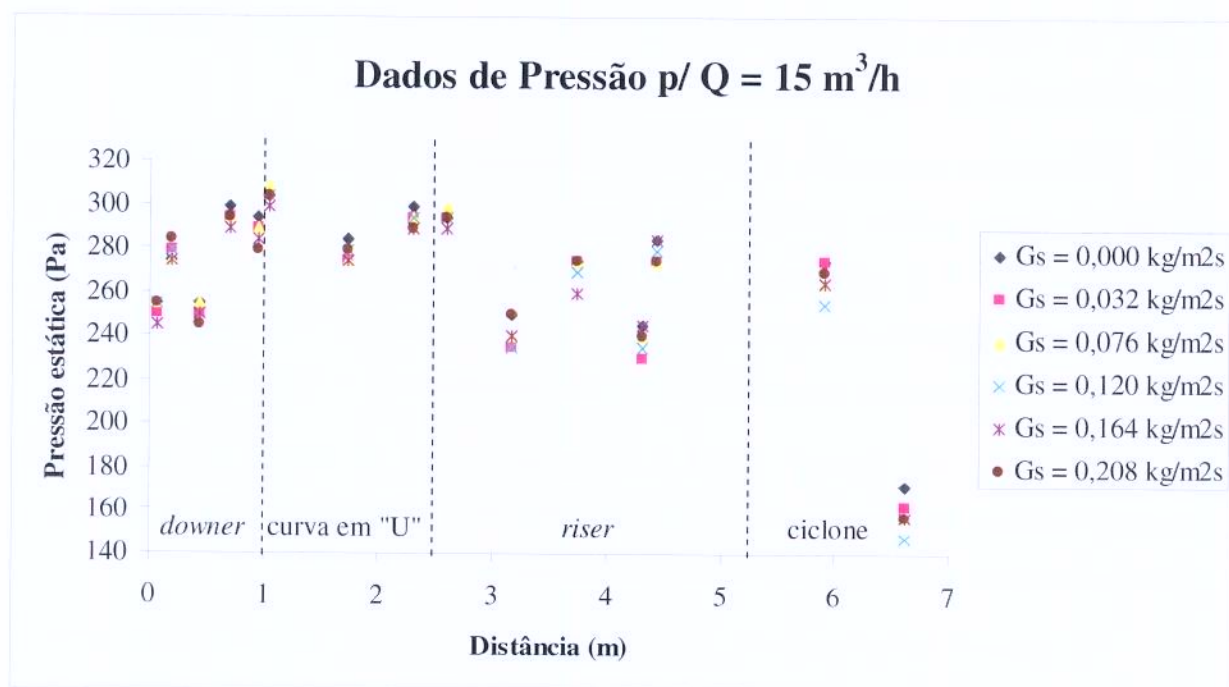


Figura 4.19: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.

Ensaio C. Vazão de ar total de $15 \text{ m}^3/\text{h}$ ($0,789 \text{ m/s}$).

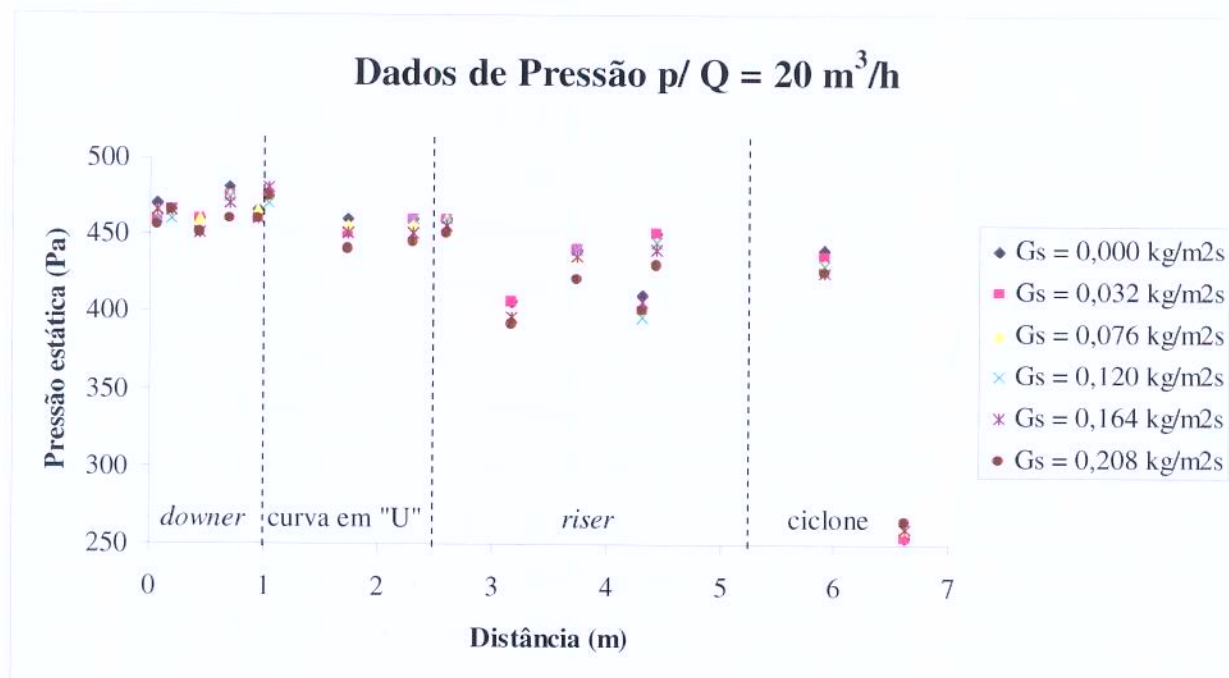


Figura 4.20: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.

Ensaio C. Vazão de ar total de $20 \text{ m}^3/\text{h}$ ($1,052 \text{ m/s}$).

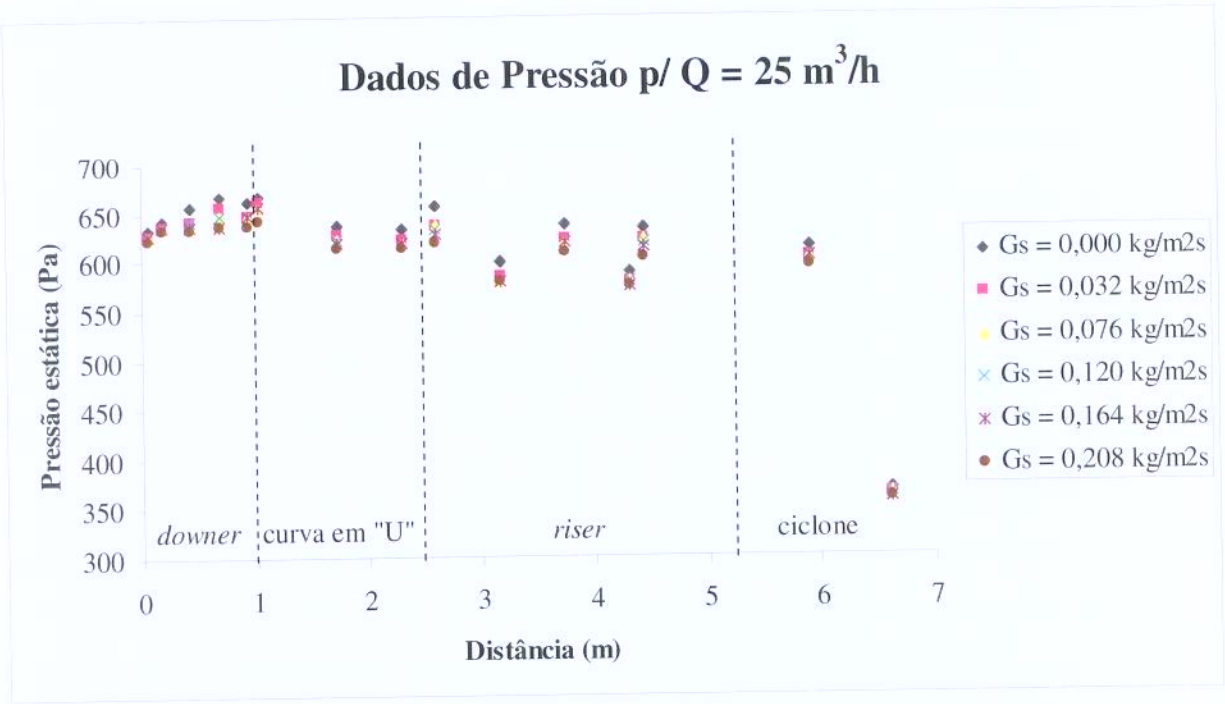


Figura 4.21: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.

Ensaio C. Vazão de ar total de 25m³/h (1,315 m/s).

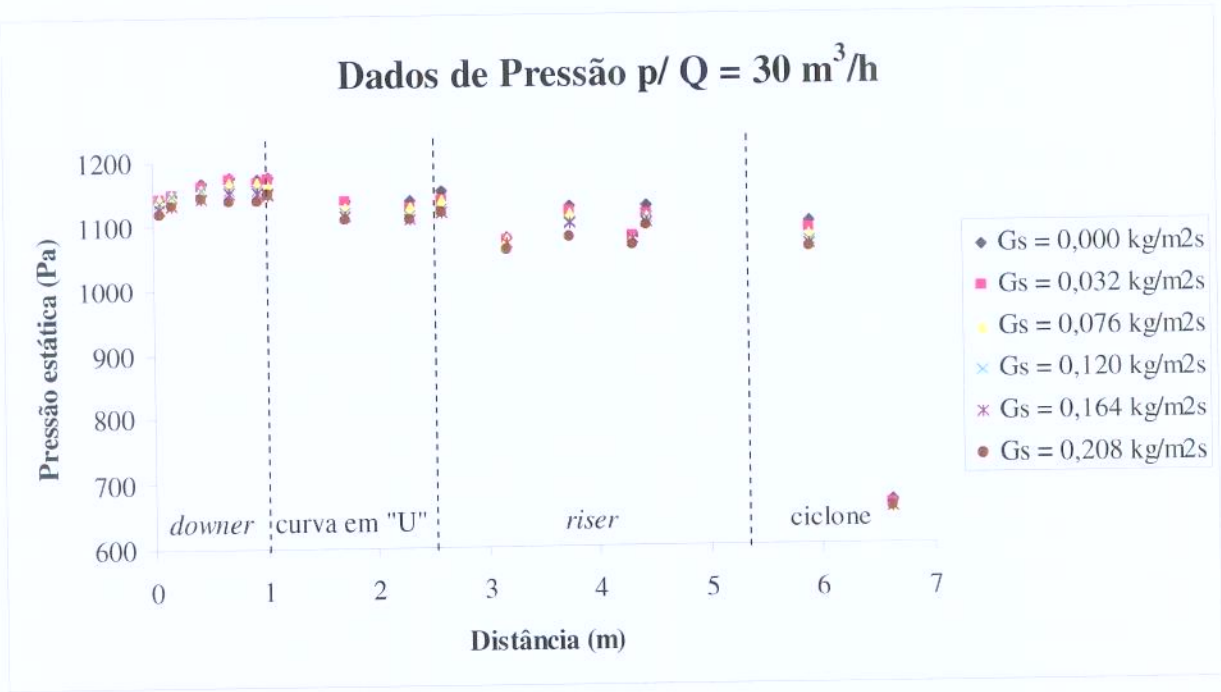


Figura 4.22: Variação da pressão estática ao longo da Unidade Multipropósito.

Ensaio C. Vazão de ar total de 30m³/h (1,578 m/s).

Observa-se também nas Figuras 4.19 à 4.22, que os valores de pressão estática para todos os fluxos de sólidos na seção do *riser* apresentam uma dispersão significativa. Isto ocorre devido à utilização do alimentador de ar da entrada da curva em “U” em conjunto com o da entrada do *downer*, pois este faz com que o escoamento gás-sólido, já em início de aceleração, se some à vazão de ar do alimentador da curva em “U”, que vem a acentuar a região de aceleração que a presença da curva em “U” impõe ao sistema. Isto acarreta em um aumento na região de aceleração da seção do *riser* e com isto tem-se um escoamento com perfil altamente não-uniforme e as medidas de pressão estática não são representativas.

Enfim, da observação das Figuras 4.1 à 4.22 pode-se indicar para a indústria o ensaio B como sendo a melhor alternativa para a alimentação da fase fluida no processo de FCC. Isto porque o ensaio B possibilita um maior contato entre as fases no reator *downer*, uma vez que a velocidade da fase sólida resume-se à sua velocidade terminal. Deste modo, pode-se processar uma menor quantidade de catalisador gerando uma economia ao processo. Para o reator *riser*, o ensaio B tende a diminuir as regiões de recirculação de sólidos que acarretam em reações secundárias, indesejáveis ao processo. Deste modo, tem-se um melhor aproveitamento de catalisador gerando mais uma economia ao processo.

4.4. Avaliação dos resultados de diferença de pressão obtidos no escoamento gás-sólido da Unidade Multipropósito

Por decorrência da análise das Figuras 4.1 à 4.22, definiram-se as tomadas de pressão a serem avaliadas na comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para cada seção da Unidade Multipropósito. A Tabela 4.1 apresenta a definição das tomadas de pressão utilizadas.

Os resultados tanto experimentais quanto aqueles propostos neste trabalho (solução das Equações 2.26, 2.27, 2.19, 3.1 e 3.2), utilizando-se apenas a alimentação de ar na entrada do *downer* (Ensaio A), são apresentados nas Tabelas B.1 à B.26 do Apêndice B.

Por intermédio da inspeção das Tabelas B.1 à B.26, verifica-se a ocorrência de perda de pressão ao longo do escoamento. Esta perda está associada, entre outros fatores, à ação do arraste e à de atrito entre ar e parede do equipamento, bem como a presença de sólidos os quais têm por efeito a diminuição da transferência de quantidade de movimento por ação cisalhante a qual se propaga da parede em direção ao escoamento central.

Tabela 4.1: Definição dos ΔP s entre as tomadas de pressão.

ΔP n°	Tomadas n°	L (m)	Seção
$\Delta P1$	P2 – P1	0,12	<i>Downer</i>
$\Delta P2$	P3 – P2	0,26	<i>Downer</i>
$\Delta P3$	P4 – P3	0,26	<i>Downer</i>
$\Delta P4$	P5 – P4	0,24	<i>Downer</i>
$\Delta P5$	P8 – P6	1,27	Curva em “U”
$\Delta P6$	P10 – P9	0,57	<i>Riser</i>
$\Delta P7$	P11 – P10	0,57	<i>Riser</i>
$\Delta P8$	P12 – P11	0,57	<i>Riser</i>
$\Delta P9$	P13 – P12	0,12	<i>Riser</i>
$\Delta P10$	P15 – P14	0,72	Ciclone 1° estágio

Para o escoamento somente com gás, a queda de pressão aumenta na medida em que se aumenta a vazão de gás. Devido ao tipo de medidor de pressão usado, esta diferença não pode ser observada tão acuradamente, pois os valores experimentais das diferenças de pressão estão em torno do erro da leitura da deflexão manométrica, comprometendo a análise quantitativa dos resultados. Porém, pode-se observar que o aumento de pressão foi proporcional à vazão, e como os escoamentos foram todos realizados na mesma tubulação, foi proporcional a velocidade na qual o gás escoava pela Unidade Multipropósito.

Para o escoamento com a mistura gás-sólido, verifica-se no *downer* que a presença de sólidos provoca um aumento na perda de carga entre as tomadas de pressão, enquanto que no *riser* a presença de sólidos provoca uma diminuição da perda de carga entre as tomadas de pressão ao longo do escoamento. Este comportamento é justificado pelas Equações 3.1 e 3.2, onde o termo $(1 - \epsilon)(\rho_p - \rho_f)g$ representa o ganho ou a perda de pressão devido ao *holdup* de sólidos. No caso de escoamento unidimensional em que o sentido da

força gravitacional é o mesmo do escoamento, caso do *downer*, este termo assume sinal positivo. No caso de sentidos opostos, caso do *riser*, este termo assume sinal negativo.

Há de se notar que os resultados do modelo para a seção do *downer* (Tabelas B.1 à B.7) para velocidades do ar iguais a 0,394, 0,526, 0,789 e 1,578 m/s apontam para o ganho de pressão na região ΔP_3 (entre 0,70 e 0,44 m), o qual está em acordo, qualitativamente, com os resultados obtidos dos ensaios experimentais. Neste caso há o indicativo de que o sistema, em termos de diferença de pressão, esteja sendo governado pelo peso das partículas em relação às contribuições dos atritos gás-parede e partículas-parede, para o regime estabelecido. Todavia, tal comportamento é invertido nas velocidades $v = 1,052$ m/s (exceto para G_s superior a $0,032 \text{ kg/m}^2\text{s}$) e $v = 1,315$ (exceto para G_s superior a $0,076 \text{ kg/m}^2\text{s}$). Em termos quantitativos, o ΔP_3 é a tomada que apresenta menores desvios entre os resultados obtidos experimentalmente e aqueles do modelo.

Os resultados do modelo para a seção da curva em “U” (Tabelas B.8 à B.15) apontam para uma perda de pressão significativa causada por este acessório no escoamento. Os resultados obtidos dos ensaios experimentais apresentam desvios razoáveis quando comparados com os resultados do modelo.

Os resultados do modelo para a seção do *riser* (Tabelas B.16 à B.22) apontam para a perda de pressão contínua ao longo de seu comprimento. Os resultados obtidos dos ensaios experimentais, apesar de algumas oscilações, tendem a concordar, qualitativamente, com os resultados do modelo. Em termos quantitativos, o ΔP_7 e o ΔP_8 são as tomadas que apresentam menores desvios entre os resultados obtidos experimentalmente e aqueles do modelo. No sentido de comparar a perda de carga entre o *downer* e o *riser* nota-se, em média, que a perda de carga na seção *riser* é superior à do *downer*. Isto é consequência, sobretudo, da ação do campo gravitacional, a qual para o *riser* apresenta força adicional a ser vencida no que diz respeito ao transporte do catalisador.

Para a seção do ciclone (Tabelas B.23 à B.26), nota-se uma boa concordância entre os resultados do modelo e os obtidos dos ensaios experimentais para as vazões mais altas (1,315 e 1,578 m/s), com desvios relativos entre 0,005 e 0,20, enquanto que para as vazões menores (0,394 e 0,526 m/s) encontram-se desvios relativos maiores, da ordem de 0,25 a 0,56. Massarani (1997) recomenda trabalhar com a velocidade média do fluido na seção de entrada do ciclone entre 10 e 30 m/s para ciclone Stairmand. Utilizando-se a Equação 2.25,

onde $B_C/D_C = 0,20$ e $H_C/D_C = 0,50$ para um ciclone Stairmand, calcularam-se as velocidades médias na entrada do ciclone como sendo iguais a 2,54, 3,39, 5,09, 6,78, 8,48, 10,17 e 11,87 m/s, respectivamente para cada vazão de alimentação de ar. Deste modo, não é recomendada a operação do ciclone 1º estágio com as velocidades de alimentação de ar 0,394, 0,526, 0,789 e 1,052 m/s. Isto deve estar influenciando nos resultados calculados pelas Equações 2.26 e 2.27 para as vazões mais baixas.

Todavia, de um modo geral, para a seção do ciclone verifica-se uma boa concordância entre os resultados do modelo e os obtidos dos ensaios experimentais. Ambos indicam que é no ciclone que ocorrem as maiores perdas de pressão do escoamento em estudo. Isto se deve, sobretudo, ao efeito da força centrífuga que existe neste equipamento que vem a ser bastante superior às forças envolvidas no transporte vertical, incluindo a ação gravitacional.

A seguir, nas Tabelas B.27 à B.52 do Apêndice B, apresentam-se os valores obtidos para diferença de pressão, tanto experimentais quanto aqueles propostos neste trabalho (solução das Equações 2.26, 2.27, 2.19, 3.1 e 3.2), para cada seção da Unidade Multipropósito utilizando-se apenas a alimentação de ar na entrada da curva em “U” (Ensaio B).

Há de se notar que os resultados do modelo para a seção do *downer* (Tabelas B.27 à B.33) em todas as situações apontam para o ganho de pressão contínuo ao longo de seu comprimento. Neste caso, como dito anteriormente, o alimentador de ar da entrada da curva em “U” produziu no *downer* um efeito de aceleração adicional, indicando que o sistema, em termos de diferença de pressão, esteja sendo governado por este efeito em relação à contribuição do peso das partículas e dos atritos gás-parede (inexistente) e partículas-parede, para o regime estabelecido.

De um modo geral, observa-se que os resultados do modelo para as seções do *downer* (Tabelas B.27 à B.33) e do *riser* (Tabelas B.42 à B.48) mostram um melhor desempenho, em termos qualitativos, com os resultados obtidos dos ensaios experimentais, em relação aos resultados apresentados nas Tabelas B.1 à B.7 e B.16 à B.22. Em termos quantitativos, o ΔP_4 (*downer*) e os ΔP_7 e ΔP_8 (*riser*) são as tomadas que apresentam menores desvios entre os resultados obtidos experimentalmente e aqueles do modelo.

Os resultados obtidos dos ensaios experimentais para a seção da curva em “U” (Tabelas B.34 à B.41) apontam para uma perda de pressão muito elevada, maior até do que a do ciclone, em relação aos resultados apresentados nas Tabelas B.8 à B.15. Isto porque a utilização do alimentador de ar da entrada da curva em “U” criou uma região de aceleração turbulenta, uma vez que o alimentador de ar da entrada da curva está situado entre as posições $z = 1,04$ e $1,73$ m, ou seja, exatamente na região de desaceleração que a presença deste acessório impõe ao sistema. Assim, os ensaios experimentais de diferença de pressão estática não são representativos para esta seção.

Para a seção do ciclone (Tabelas B.49 à B.52), nota-se novamente que de um modo geral há uma boa concordância entre os resultados do modelo e os obtidos dos ensaios experimentais.

A seguir, nas Tabelas B.53 à B.78, apresentam-se os valores obtidos para diferença de pressão, tanto experimentais quanto aqueles propostos neste trabalho (solução das Equações 2.26, 2.27, 2.19, 3.1 e 3.2), para cada seção da Unidade Multipropósito utilizando-se, em conjunto, as alimentações de ar na entrada do *downer* e na entrada da curva em “U” (Ensaio C).

Nota-se que os resultados obtidos dos ensaios experimentais para a seção do *downer* (Tabelas B.53 à B.59) principalmente para velocidade do ar igual a $0,789$ m/s apresentam uma dispersão significativa. O mesmo ocorre para a seção do *riser* (Tabelas B.68 à B.74) para todas as velocidades do ar. Isto ocorre devido à utilização do alimentador de ar da entrada da curva em “U” em conjunto com o da entrada do *downer*, pois este faz com que o escoamento gás-sólido, já em início de aceleração, se some à vazão de ar do alimentador da entrada da curva, que vem a acentuar a região de aceleração que a presença da curva em “U” impõe ao sistema. Isto acarreta em um aumento na região de aceleração da seção do *riser* e com isto tem-se um escoamento com perfil altamente não-uniforme e os ensaios experimentais de diferença de pressão estática não são representativos para esta seção.

Numa breve análise quantitativa, apesar dos grandes desvios ao longo de toda a seção do *riser*, o ΔP_9 é a tomada que apresenta os menores desvios entre os resultados obtidos experimentalmente e aqueles do modelo. Neste caso, há o indicativo de que o

aumento da região de aceleração supracitado teve menor efeito sobre a região do ΔP_9 do que sobre as demais tomadas de pressão.

Os resultados obtidos dos ensaios experimentais para a seção da curva em “U” (Tabelas B.60 à B.67) apontam para uma perda de pressão muito elevada, porém não maior do que a do ciclone, em relação aos resultados apresentados nas Tabelas B.34 à B.41. Isto porque a utilização do alimentador de ar da entrada da curva em “U” em conjunto com o da entrada do *downer* criou uma região de aceleração muito turbulenta, uma vez que o alimentador de ar da entrada da curva em “U” está situado entre as posições $z = 1,04$ e $1,73$ m, ou seja, exatamente na região de desaceleração que a presença deste acessório impõe ao sistema. Assim, os ensaios experimentais de diferença de pressão estática não são representativos para esta seção.

Para a seção do ciclone (Tabelas B.75 à B.78), nota-se assim como apresentado nas Tabelas B.23 à B.26 e B.49 à B.52 uma boa concordância entre os resultados do modelo e os obtidos dos ensaios experimentais.

Por fim, após a obtenção dos valores da diferença de pressão utilizando-se o modelo proposto nas Equações 3.1, 3.2 e 2.19 para todas as correlações de f_p apresentadas na Tabela 2.3 (Equações 2.12a, 2.12b, 2.12c, 2.12d, 2.12e, 2.12f, 2.12g) e a Equação 2.16, faz-se uma análise da perda de carga por atrito na presença de sólidos. Esta perda de carga representada pelo fator de atrito sólido-parede f_p , que engloba os efeitos da parede e das condições de escoamento, varia principalmente com a velocidade dos sólidos u_p . Ambos são inversamente proporcionais, o que implica em dizer que um aumento da velocidade u_p gera um aumento na fração de vazios do leito que, por sua vez, acarreta numa diminuição das colisões sólido-parede e sólido-sólido, o que diminui a resistência ao escoamento. Menos resistência ao escoamento significa um f_p menor e uma menor contribuição do termo de atrito nas Equações 3.1 e 3.2.

Calculou-se o desvio relativo médio dos ΔP s entre todas as velocidades de ar e os fluxos mássicos de sólidos para cada correlação de f_p , a fim de se avaliar quantitativamente qual delas apresenta um melhor desempenho entre os valores da diferença de pressão obtidos pelo modelo e aqueles obtidos pelos ensaios experimentais. Os resultados são apresentados nas Tabelas 4.2 à 4.4, a seguir:

Tabela 4.2: Desvios relativos médios em % dos ΔP s para a seção do *downer*.

<i>downer</i>				
Alimentação de ar	Ensaio A	Ensaio B	Ensaio C	GERAL
Correlação para f_p	Desvio Relativo	Desvio Relativo	Desvio Relativo	Desvio Relativo
Van Swaaij <i>et al.</i> (1970)	96,71	93,87	100,37	96,98
Stemerding (1962)	96,96	94,14	100,28	97,13
Reddy e Pei (1969)	96,82	93,98	100,33	97,05
Konno e Saito (1969)	96,89	94,05	100,31	97,08
Capes e Nakamura (1979)	96,82	93,93	100,33	97,03
Yang (1978)	96,97	94,14	100,28	97,13
da Silva (1984)	96,68	94,00	100,38	97,02

Tabela 4.3: Desvios relativos médios em % dos ΔP s para a seção da curva em “U”.

Curva em “U”				
Alimentação de ar	Ensaio A	Ensaio B	Ensaio C	GERAL
Correlação para f_p	Desvio Relativo	Desvio Relativo	Desvio Relativo	Desvio Relativo
Van Swaaij <i>et al.</i> (1970)	1557,58	145,13	373,42	692,05
Stemerding (1962)	1437,62	132,80	330,14	633,52
Reddy e Pei (1969)	1504,24	139,82	354,42	666,16
Konno e Saito (1969)	1472,17	136,63	343,00	650,60
Capes e Nakamura (1979)	1505,88	142,22	356,58	668,23
Yang (1978)	1432,07	132,64	328,70	631,14
da Silva (1984)	1560,43	139,21	367,66	689,10
Guiotti (2003)	87049,94	935,63	22243,41	36742,99

Tabela 4.4: Desvios relativos médios em % dos ΔP s para a seção do *riser*.

<i>riser</i>				
Alimentação de ar	Ensaio A	Ensaio B	Ensaio C	GERAL
Correlação para f_p	Desvio Relativo	Desvio Relativo	Desvio Relativo	Desvio Relativo
Van Swaaij <i>et al.</i> (1970)	71,82	79,67	98,91	83,47
Stemerding (1962)	72,47	80,23	98,96	83,89
Reddy e Pei (1969)	72,11	79,92	98,93	83,66
Konno e Saito (1969)	72,29	80,07	98,95	83,77
Capes e Nakamura (1979)	72,21	79,99	98,93	83,71
Yang (1978)	72,51	80,26	98,96	83,91
da Silva (1984)	71,70	79,60	98,92	83,41

Há de se notar, através da análise das Tabelas 4.2 à 4.4, que para as seções do *downer* (Tabela 4.2), do *riser* (Tabela 4.4) e da curva em “U” (Tabela 4.3), todas as correlações apresentaram resultados discrepantes. Isto conduz ao raciocínio de que as correlações encontradas na literatura para o cálculo de f_p são inadequadas para o sistema experimental deste trabalho. O modelo proposto nas Equações 3.1 e 3.2 envolve

correlações empíricas (cálculo de f_p) que não descrevem as particularidades da Unidade Multipropósito.

A Tabela 4.3 (curva em “U”) mostra que há algo de errado com a correlação de Guiotti (2003), pois esta apresenta desvios relativos médios totalmente fora da ordem de grandeza dos desvios apresentados pelas demais correlações. De fato, ao analisar-se a Equação 2.16 verifica-se que os termos vertical e horizontal do fator de atrito foram trocados. Deste modo, propõe-se neste trabalho uma modificação nesta correlação, invertendo-se seus termos de modo a garantir que em $\theta = 0^\circ$ e 180° o escoamento seja vertical e em $\theta = 90^\circ$, seja unicamente horizontal:

$$f_p = \left\{ \sin^4(\theta) \left[0,1172 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \left[\frac{(1-\varepsilon)}{(gD)^{1/2}} v_f \sin \theta \right]^{-1,15} \right]^2 + \cos^4(\theta) \left[\frac{0,192}{(v_p \sin \theta)^{1,22}} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4.15)$$

Utilizando-se a Equação 4.15, calcularam-se os valores para diferença de pressão nos ensaios A, B e C, comparando-os com os valores obtidos experimentalmente, conforme apresentado nas Tabelas B.79 à B.81 do Apêndice B. Calculou-se também, o desvio relativo médio destes ΔP s entre todas as velocidades de ar e os fluxos mássicos de sólidos, e os resultados foram incluídos na Tabela 4.3, como segue:

Tabela 4.5: Desvios relativos médios em % dos ΔP s para a seção da curva em “U”.

Curva em “U”				
Alimentação de ar	Ensaio A	Ensaio B	Ensaio C	GERAL
Correlação para f_p	Desvio Relativo	Desvio Relativo	Desvio Relativo	Desvio Relativo
Van Swaaij <i>et al.</i> (1970)	1557,58	145,13	373,42	692,05
Stemerding (1962)	1437,62	132,80	330,14	633,52
Reddy e Pei (1969)	1504,24	139,82	354,42	666,16
Konno e Saito (1969)	1472,17	136,63	343,00	650,60
Capes e Nakamura (1979)	1505,88	142,22	356,58	668,23
Yang (1978)	1432,07	132,64	328,70	631,14
da Silva (1984)	1560,43	139,21	367,66	689,10
Guiotti e Betioli (2007)	1647,55	141,62	394,19	727,79

Da observação da Tabela 4.5 (curva em “U”), verifica-se que a correlação de Guiotti e Betioli (2007) também apresenta resultados discrepantes, conduzindo ao mesmo raciocínio exposto anteriormente.

Do mesmo modo, após a obtenção dos valores da diferença de pressão para o ciclone 1º estágio utilizando-se o modelo proposto nas Equações 2.26 e 2.27, testando-se para esta última todas as constantes apresentadas na Tabela 2.4, calculou-se o desvio relativo médio para cada constante, a fim de se avaliar quantitativamente qual delas apresenta um melhor desempenho entre os valores da diferença de pressão obtidos pelo modelo e aqueles obtidos pelos ensaios experimentais. Os resultados são apresentados na Tabela 4.6, a seguir:

Tabela 4.6: Desvios relativos médios em % dos ΔP s para o ciclone.

Ciclone				
Alimentação de ar	Ensaio A	Ensaio B	Ensaio C	GERAL
Constantes a e b	Desvio Relativo	Desvio Relativo	Desvio Relativo	Desvio Relativo
Briggs (1946)	27,35	13,33	10,35	17,01
Casal (1988)	23,90	34,66	33,38	30,65
Comas (1991)	27,13	13,42	10,43	16,99
Sheid e Massarani (1992)	27,58	13,25	10,26	17,03

Há de se notar, através da análise da Tabela 4.6, que para o ensaio A todas as constantes levam a resultados similares e que para os demais ensaios apenas a constante de Casal (1988) forneceu resultados discrepantes.

De um modo geral, o modelo proposto nas Equações 3.1 e 3.2 mostrou-se inadequado para as condições experimentais deste trabalho. Ou seja, é um modelo proposto para escoamentos plenamente desenvolvidos que não levam em consideração os efeitos de aceleração (entrada) e desaceleração (saída) das fases e envolve correlações empíricas (cálculo de f_p), que podem não se adequar à configuração do sistema experimental.

4.5. Avaliação da região de aceleração no escoamento gás-sólido da Unidade Multipropósito

Através da inspeção das Tabelas B.1 à B.78, verifica-se que, apesar de, em alguns casos, haver um desempenho razoável entre os valores experimentais e calculados de

diferença de pressão, na maioria dos casos há grande discrepância entre os valores. Dentre as possíveis razões para tal pode-se supor que a região em que foram tomadas as pressões ainda sofre os efeitos de aceleração do escoamento e tais efeitos não estão contemplados nas correlações 3.1 e 3.2.

Deste modo, propõe-se avaliar um modelo para a descrição da fluidodinâmica do escoamento gás-sólido vertical para uma região de aceleração. Encontra-se em Klinzing (1981) um modelo para a diferença de pressão na região de aceleração para um escoamento gás-sólido vertical:

$$\Delta P_{ac} = + \int_0^{L_{ac}} \rho_p (1 - \varepsilon) g dL - \int_0^{L_{ac}} \frac{f_f \rho_f u^2 dL}{2D} - \int_0^{L_{ac}} \frac{f_p \rho_p (1 - \varepsilon) u_p^2 dL}{2D} - [\rho_p (1 - \varepsilon) u_p^2] \quad (4.16)$$

$$\Delta P_{ac} = - \int_0^{L_{ac}} \rho_p (1 - \varepsilon) g dL - \int_0^{L_{ac}} \frac{f_f \rho_f u^2 dL}{2D} - \int_0^{L_{ac}} \frac{f_p \rho_p (1 - \varepsilon) u_p^2 dL}{2D} - [\rho_p (1 - \varepsilon) u_p^2] \quad (4.17)$$

As Equações 4.16 e 4.17 se diferem quanto ao sinal do termo $\rho_p(1 - \varepsilon)gdL$. Este termo representa o ganho ou a perda de pressão devido ao *holdup* de sólidos. No caso de escoamento unidimensional em que o sentido da força gravitacional é o mesmo do escoamento, caso do *downer*, este termo assume sinal positivo. No caso de sentidos opostos, caso do *riser*, este termo assume sinal negativo.

Tanto para a seção do *downer* (Equação 4.16) como para a do *riser* (Equação 4.17), faz-se necessário o cálculo do comprimento da região de aceleração L_{ac} , que pode ser obtido, conforme proposto por Klinzing (1981), através da solução das Equações 4.18 e 4.19 a seguir:

$$L_{ac} = \int_{u_{p1}}^{u_{p2}} \frac{u_p du_p}{\frac{3}{4} C_{Ds} \varepsilon^{-4.7} \rho_f (u - u_p)^2 \left/ (\rho_p - \rho_f) d_p + (g - f_p u_p^2 / 2D) \right.} \quad (4.18)$$

$$L_{ac} = \int_{u_{p1}}^{u_{p2}} \frac{u_p du_p}{\frac{3}{4} C_{Ds} \varepsilon^{-4.7} \rho_f (u - u_p)^2 \left/ (\rho_p - \rho_f) d_p - (g + f_p u_p^2 / 2D) \right.} \quad (4.19)$$

As Equações 4.18 e 4.19 podem ser simplificadas utilizando-se um ε médio para (Klinzing, 1981):

$$\Delta L_{ac} = \int_{u_{p1}}^{u_{p2}} \frac{u_p du_p}{\alpha_1 u_p^2 + \alpha_2 u_p + \alpha_3} \quad (4.20)$$

onde $\alpha_1 = \frac{3}{4} \frac{C_{Ds} \varepsilon^{-4.7} \rho_f}{d_p (\rho_p - \rho_f)} - \frac{f_p}{2D}$

$$\alpha_2 = -\frac{3}{2} u \frac{C_{Ds} \varepsilon^{-4.7} \rho_f}{d_p (\rho_p - \rho_f)}$$

$$\alpha_3 = \frac{3}{4} u^2 \frac{C_{Ds} \varepsilon^{-4.7} \rho_f}{d_p (\rho_p - \rho_f)} \pm g$$

A Equação 4.20 pode ser integrada através de fórmulas padronizadas, encontradas na obra de Spiegel (1973). Aplicando-se estas fórmulas à Equação 4.20, chega-se a:

$$\int \frac{u_p du_p}{\alpha_1 u_p^2 + \alpha_2 u_p + \alpha_3} = \frac{1}{2\alpha_1} \ln(\alpha_1 u_p^2 + \alpha_2 u_p + \alpha_3) - \frac{\alpha_2}{2\alpha_1} \int \frac{du_p}{\alpha_1 u_p^2 + \alpha_2 u_p + \alpha_3} \quad (4.21)$$

$$\int \frac{du_p}{\alpha_1 u_p^2 + \alpha_2 u_p + \alpha_3} = \begin{cases} \frac{2}{\sqrt{4\alpha_1\alpha_3 - \alpha_2^2}} \arctan\left(\frac{2\alpha_1 u_p + \alpha_2}{\sqrt{4\alpha_1\alpha_3 - \alpha_2^2}}\right) & (4.22a) \\ \frac{1}{\sqrt{\alpha_2^2 - 4\alpha_1\alpha_3}} \ln\left(\frac{2\alpha_1 u_p + \alpha_2 - \sqrt{\alpha_2^2 - 4\alpha_1\alpha_3}}{2\alpha_1 u_p + \alpha_2 + \sqrt{\alpha_2^2 - 4\alpha_1\alpha_3}}\right) & (4.22b) \end{cases}$$

A seguir, nas Tabelas C.1 à C.6 do Apêndice C, apresentam-se os valores obtidos para o comprimento da região de aceleração L_{ac} para as seções do *downer* e do *riser*. Para o *downer* $u_{p1} = 0$ e $u_{p2} = u_{p-downer}$ (velocidade na saída do *downer*), enquanto que para o *riser* $u_{p1} = u_{p-downer}$ e $u_{p2} = u_{p-riser}$ (velocidade na saída do *riser*). Nestes cálculos considerou-se para o fator de atrito das partículas f_p a correlação de Van Swaaij *et al.* (1970) (Equação 2.12c) para o *downer* e a correlação de da Silva (1984) (Equação 2.12g) para o *riser*, conforme já discutido no item 4.4.

No ensaio B realizado para a seção do *riser* (Tabela C.4) ocorrem valores negativos para o comprimento da região de aceleração L_{ac} . Neste caso, como não há alimentação de ar na entrada do *downer* ($u = 0$ m/s), a velocidade na saída do *downer* $u_{p-downer}$ (Tabela 4.7) se aproxima da velocidade terminal da partícula U_T (Tabela 4.8), sendo menor, inclusive, do que a velocidade de *choking* V_{ch} (Tabelas A.5 à A.8) calculada para o *riser*.

Tabela 4.7: Valores calculados da velocidade das partículas para a seção do *downer*.

(Equação 3.4). Ensaio B.

v (m/s)	0,394	0,526	0,789	1,052	1,315	1,578
Gs (kg/m ² s)	u_p (m/s)	u_p (m/s)	u_p (m/s)	u_p (m/s)	u_p (m/s)	u_p (m/s)
0,032	0,328621	0,327230	0,327924	0,328621	0,327229	0,327229
0,076	0,328553	0,327162	0,327857	0,328553	0,327162	0,327162
0,120	0,328487	0,327095	0,327790	0,328487	0,327095	0,327095
0,164	0,328419	0,327028	0,327723	0,328419	0,327027	0,327027
0,208	0,328352	0,326960	0,327654	0,328352	0,326960	0,326960

Tabela 4.8: Valores calculados da velocidade terminal da partícula para a seção do *downer*.
(Equação 3.13). Ensaio B.

v (m/s)	0,394	0,526	0,789	1,052	1,315	1,578
Gs (kg/m ² s)	U_T (m/s)	U_T (m/s)	U_T (m/s)	U_T (m/s)	U_T (m/s)	U_T (m/s)
0,032	0,328670	0,327279	0,327973	0,328670	0,327279	0,327279
0,076	0,328670	0,327279	0,327973	0,328670	0,327279	0,327279
0,120	0,328670	0,327279	0,327973	0,328670	0,327279	0,327279
0,164	0,328670	0,327279	0,327973	0,328670	0,327279	0,327279
0,208	0,328670	0,327279	0,327973	0,328670	0,327279	0,327279

A velocidade u_{p1} com que as partículas entram no *riser* vai afetar o comprimento da região de aceleração L_{ac} , e para a sua determinação nesta seção considerou-se $u_{p1} = u_{pdowner}$. Porém, nesta região, existem dificuldades na determinação da porosidade e velocidade das partículas, que limitam a verificação de equações utilizadas na modelagem matemática da região de entrada (alimentação de ar na entrada da curva em “U”) para os sistemas gás-sólido (Feltran, 2005).

Assim, sabendo que as partículas ao saírem do *downer* ainda sofrem os efeitos da alimentação de ar na entrada da curva em “U” antes de escoarem pelo *riser*, conclui-se que a consideração feita para o *riser* de que $u_{p1} = u_{pdowner}$, para esta situação (ensaio B), não é válida para a determinação do seu comprimento da região de aceleração L_{ac} , permitindo-se desconsiderar os valores apresentados na Tabela C.4.

Deste modo, através da análise das Tabelas C.1 à C.6 chega-se a conclusão de que o $\Delta P1$ e o $\Delta P6$ (Tabela 4.1) encontram-se na região de aceleração do escoamento. Para estes dois casos, utilizando-se as Equações 4.16 e 4.17, recalculam-se novos valores para as diferenças de pressão $\Delta P1$ e o $\Delta P6$, estes contemplando os efeitos da aceleração do escoamento.

A seguir, nas Tabelas D.1 à D.6 do Apêndice D, apresentam-se os novos valores obtidos para a diferença de pressão, tanto experimentais quanto aqueles propostos pelas Equações 4.16 e 4.17, considerando que as regiões do $\Delta P1$ (seção do *downer*) e do $\Delta P6$ (seção do *riser*) da Unidade Multipropósito se encontram em uma região de aceleração.

Da inspeção das Tabelas D.1 à D.6, verifica-se no *downer* que os valores obtidos para diferença de pressão utilizando-se a Equação 4.16 são menores que aqueles obtidos

utilizando-se as Equações 3.1 (Tabelas B.1 à B.78), exceto para o ensaio B, o que indica que ao considerarmos os efeitos da aceleração no escoamento pneumático vertical estamos acrescentando um termo negativo na Equação 3.1. Para o ensaio B ocorre o inverso pelo fato dele não sofrer os efeitos de aceleração da fase fluida, pois neste ensaio não há alimentação de ar na entrada do *downer* ($u = 0$ m/s).

Ainda inspecionando as Tabelas D.1 à D.6, verifica-se no *riser*, de um modo geral, que apenas para as velocidades do ar iguais a 0,394 e 0,526 m/s os valores obtidos para diferença de pressão utilizando-se a Equação 4.17 são menores que aqueles obtidos utilizando-se as Equações 3.2 (Tabelas B.1 à B.78), o que indica que ao considerarmos os efeitos da aceleração no escoamento pneumático vertical estamos acrescentando um termo negativo na Equação 3.2. Para as demais velocidades do ar ocorre o inverso, o que indica que a Equação 4.17, para as situações estudadas neste trabalho, não apresentou os efeitos esperados para velocidades do ar iguais e maiores a 0,789 m/s.

Deste modo podemos reescrever as Equações 3.1 e 3.2 da seguinte maneira:

$$\frac{\Delta P}{L} = (1 - \varepsilon)(\rho_p - \rho_f)g - \frac{1}{2D} [f_f \varepsilon \rho_f u^2 + f_p (1 - \varepsilon) \rho_p u_p^2] - \left(\frac{\Delta P}{L} \right)_{aceleração} \quad (4.23)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = -(1 - \varepsilon)(\rho_p - \rho_f)g - \frac{1}{2D} [f_f \varepsilon \rho_f u^2 + f_p (1 - \varepsilon) \rho_p u_p^2] - \left(\frac{\Delta P}{L} \right)_{aceleração} \quad (4.24)$$

Por fim, após a obtenção dos valores da diferença de pressão utilizando-se o modelo proposto nas Equações 4.16 e 4.17, calculou-se o desvio relativo médio do ΔP_1 e do ΔP_6 entre todas as velocidades de ar e os fluxos mássicos de sólidos, a fim de se avaliar quantitativamente a aplicabilidade das Equações 4.16 e 4.17 para o sistema considerado. Os resultados são apresentados nas Tabelas 4.9 e 4.10, a seguir:

Tabela 4.9: Desvios relativos médios em % para a seção do *downer* na região de aceleração ΔP_1 .

<i>downer</i>				
Alimentação de ar	Ensaio A	Ensaio B	Ensaio C	GERAL
Correlação para f_p	Desvio Relativo	Desvio Relativo	Desvio Relativo	Desvio Relativo
Van Swaaij <i>et al.</i> (1970)	87,94	96,99	103,39	96,10

Tabela 4.10: Desvios relativos médios em % para a seção do *riser* na região de aceleração ΔP_6 .

<i>riser</i>				
Alimentação de ar	Ensaio A	Ensaio B	Ensaio C	GERAL
Correlação para f_p	Desvio Relativo	Desvio Relativo	Desvio Relativo	Desvio Relativo
da Silva (1984)	90,88	92,40	104,34	95,88

Há de se notar nas Tabelas 4.4 e 4.10 que os resultados obtidos para diferença de pressão na região de aceleração para a seção do *riser* (Equação 4.17) apresentam desvios relativos médios ainda maiores quando comparados com os resultados de diferença de pressão estimados pela Equação 3.2. O mesmo ocorre para a seção *downer* (Equação 4.16), exceto para o ensaio A, uma vez que as Tabelas 4.2 e 4.9 mostram que os resultados de diferença de pressão estimados pela Equação 4.16 apresentam um desvio relativo médio maior que os estimados pela Equação 3.1.

Deste modo, o modelo para a descrição da fluidodinâmica do escoamento gás-sólido vertical para uma região de aceleração proposto por Klinzing (1981) não mostrou boa aplicabilidade tanto para a seção do *riser* como para a seção do *downer*. Para o *riser*, a aplicação da Equação 4.17 apresentou os efeitos esperados apenas para as velocidades do ar iguais a 0,394 e 0,526 m/s, justificando os maiores desvios relativos médios da Tabela 4.10.

No caso do *downer*, isto talvez possa ser explicado pelo fato desta seção ter apresentado diversos sistemas de escoamento, ou seja, dependendo das condições operacionais, o sistema em termos de diferença de pressão pode ser governado pelo peso das partículas, pelos atritos gás-parede e partículas-parede ou ainda por efeitos de aceleração adicionais gerados pela operação do sistema.

4.6. Avaliação da região de tubulação curvada no escoamento gás-sólido da Unidade Multipropósito

Através da inspeção das Tabelas B.8 à B.15, B.34 à B.41 e B.60 à B.67 verifica-se que, na maioria dos casos, há uma grande discrepância entre os valores experimentais e calculados de diferença de pressão. Dentre as possíveis razões para tal pode-se supor que a Equação 2.19, correlação empírica proposta por Schuchart (1968) para estimar o valor da diferença de pressão da curva em “U”, é inadequada para o sistema experimental deste trabalho, pois não reproduz fielmente as especificidades do mesmo.

Deste modo, propõe-se uma modificação na Equação 2.19 para que esta reproduza mais fielmente o modelo para a descrição da fluidodinâmica do escoamento gás-sólido na seção da curva em “U”, do sistema experimental deste trabalho. A proposta é dividir a constante 210 pelo número 3, gerando a seguinte equação:

$$\frac{\Delta P_{curva}}{\Delta P_{reta}} = 70 \left(\frac{2R_c}{D} \right)^{-1,15} \quad (4.25)$$

Assim, utilizando-se a Equação 4.25 calcularam-se os valores para diferença de pressão nos ensaios A, B e C, comparando-os com os valores obtidos experimentalmente, conforme apresentado nas Tabelas E.1 à E.24 do Apêndice E. As Tabelas E.1 à E.24 mostram que houve uma melhora significativa nos resultados do modelo quando comparados com os resultados obtidos nas Tabelas B.8 à B.15, B.34 à B.41 e B.60 à B.67. Porém, os desvios desaconselham a utilização da Equação 4.25 para descrever a perda de carga na região da curva em “U”.

Calculou-se também, o desvio relativo médio destes ΔP s entre todas as velocidades de ar e os fluxos mássicos de sólidos, e os resultados são apresentados na Tabela 4.11. Analisando a Tabela 4.11, verifica-se que para o ensaio C todas as correlações levam a resultados similares e que para os demais ensaios todas as correlações forneceram resultados discrepantes. Nota-se aqui uma sensível melhora nos desvios dos ensaios A e C quando comparados com aqueles da Tabela 4.5.

Tabela 4.11: Desvios relativos médios em % dos ΔP s para a seção da curva em “U”.

Curva em “U”				
Alimentação de ar	Ensaio A	Ensaio B	Ensaio C	GERAL
Correlação para f_p	Desvio Relativo	Desvio Relativo	Desvio Relativo	Desvio Relativo
Van Swaaij <i>et al.</i> (1970)	459,60	115,04	57,80	210,82
Stemerding (1962)	421,37	110,93	46,11	192,80
Reddy e Pei (1969)	442,53	113,28	51,85	202,55
Konno e Saito (1969)	432,32	112,21	48,88	197,80
Capes e Nakamura (1979)	442,97	114,07	52,41	203,15
Yang (1978)	419,64	110,88	45,87	192,13
da Silva (1984)	460,67	113,07	55,89	209,88
Guiotti e Betioli (2007)	489,59	113,87	64,72	222,73

5. Conclusões e Sugestões

Este trabalho mostrou que através de um leito fluidizado circulante é possível estudar em um mesmo sistema, além da fluidodinâmica dos reatores *downer* e *riser*, uma seção que os une assim como um sistema de recirculação de sólidos. Neste sentido, descreveu-se a fluidodinâmica do escoamento gás-sólido ao longo de todo o leito fluidizado circulante, visando o estudo do CFB como um sistema único.

Pelo exposto neste trabalho foi possível obter, para diversas situações de alimentação de ar, vazão de ar e fluxo de sólidos:

- Valores da velocidade de *choking* para a seção do *riser* da Unidade Multipropósito. Esta análise mostrou que não há indícios da ocorrência do fenômeno de *choking* na seção do *riser*;
- Curvas características de pressão estática ao longo de todo o CFB. Por meio da análise dos perfis de pressão estática, verificou-se diversos sistemas de escoamento, ou seja, dependendo das condições operacionais, é possível haver queda de pressão ou ganho de pressão. Verificou-se também os efeitos de entrada de ar no escoamento, ou seja, dependendo da alimentação de ar utilizada, é possível gerar grande influência no perfil de pressão estática ao longo do CFB;
- Informações sobre três tipos de ensaios utilizados neste trabalho – ensaios A, B e C – o que permitiu indicar para a indústria o ensaio B como sendo a melhor alternativa para a alimentação da fase fluida no processo de FCC, pois gera uma economia adicional ao processo;
- Comparação entre os valores de diferença de pressão experimentais e calculados por meio de uma correlação, para regime estabelecido e considerando-se as influências de peso de sólidos, atritos gás-parede e partículas-parede. Da comparação entre estes valores, pode-se citar que para:
 - a seção do *downer* houve discrepância entre os valores experimentais e calculados de diferença de pressão para poucos casos. Dentre as possíveis razões para tal pode(m)-se citar:

i) a região em que foram tomadas as pressões ainda sofre os efeitos de aceleração do escoamento e tais efeitos não estão contemplados no modelo utilizado;

ii) as correlações empíricas encontradas na literatura para o cálculo de f_p , envolvidas no modelo utilizado, são inadequadas para o sistema experimental deste trabalho, pois não descrevem as particularidades da Unidade Multipropósito;

iii) os efeitos inerciais adicionais produzidos pela utilização do alimentador de ar da entrada da curva em “U”, gerando a sucção das partículas do *downer*, sendo que tais efeitos não estão contemplados na correlação utilizada;

iv) presença a jusante de uma curva a qual pode acarretar a desaceleração do escoamento;

v) correlação para o cálculo do coeficiente de atrito partícula-parede desenvolvido para *riser* não, necessariamente, pode ser aplicado no caso de *downer*.

- a seção do *riser* houve discrepância entre os valores experimentais e calculados de diferença de pressão para poucos casos. Dentre as possíveis razões para tal pode-se citar:

i) a região em que foram tomadas as pressões ainda sofre os efeitos de aceleração do escoamento e tais efeitos não estão contemplados no modelo utilizado;

ii) as correlações empíricas encontradas na literatura para o cálculo de f_p , envolvidas no modelo utilizado, são inadequadas para o sistema experimental deste trabalho, pois não descrevem as particularidades da Unidade Multipropósito;

iii) presença a montante de uma curva a qual pode acarretar a aceleração do escoamento.

- a seção da curva em “U” houve discrepância entre os valores experimentais e calculados de diferença de pressão para poucos

casos. Isto deve-se, principalmente, ao fato de que a correlação utilizada para tal provém de uma combinação das correlações utilizadas para o *downer* e para o *riser* corrigidas. Sendo assim, os valores calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” assumem os desvios encontrados para as seções do *downer* e do *riser*.

- a seção do ciclone houve, de um modo geral, uma boa concordância entre os valores experimentais e calculados de diferença de pressão para a maioria dos casos.
- Comparação entre todas as correlações de f_p apresentadas na Tabela 2.3 (Equações 2.12a, 2.12b, 2.12c, 2.12d, 2.12e, 2.12f, 2.12g) e Equação 2.16 para a solução do modelo proposto nas Equações 3.1, 3.2 e 2.19. Para as seções do *downer*, do *riser* e da curva em “U”, todas as correlações apresentaram resultados discrepantes;
- Comparação entre todas as constantes a e b apresentadas na Tabela 2.4 para a solução das Equações 2.26 e 2.27. Todas as constantes levam a resultados similares para o ensaio A, enquanto que para os demais ensaios apenas a constante de Casal (1988) forneceu resultados discrepantes;
- Valores para o comprimento da região de aceleração L_{ac} para as seções do *downer* e do *riser*. Esta análise permitiu concluir que o ΔP_1 e o ΔP_6 encontram-se na região de aceleração do escoamento;
- Comparação entre os valores de diferença de pressão experimentais e calculados por meio de uma correlação considerando-se as influências da região de aceleração. Houve uma sutil melhora nos valores calculados por esta última correlação apenas para o ensaio A da seção do *downer*;
- Proposta de modificação na Equação 2.19 para que esta reproduza mais fielmente o modelo para a descrição da fluidodinâmica do escoamento gás-sólido na seção da curva em “U”, da Unidade Multipropósito. Notou-se uma sensível melhora nos desvios dos ensaios A e C.

Finalmente, para a sequência deste trabalho, sugerem-se os seguintes estudos como trabalhos futuros:

- No que se refere ao equipamento utilizado pode-se propor:
 - i) instalação de transdutores eletrônicos de pressão para proporcionar maior precisão e rapidez nas medidas;
 - ii) em decorrência do item anterior, instalar mais tomadas de pressão ao longo do equipamento;
 - iii) construção de trechos em vidro para a visualização do escoamento;
 - iv) instalação de outro tipo de alimentador de sólidos para possibilitar a análise fluidodinâmica de outras configurações do sistema de alimentação;
 - v) instalação de um sistema que permita a determinação da fração de vazios em cada seção;
 - vi) instalação de uma caixa de amostragem acima do reservatório para desviar a direção do escoamento. Com isto as partículas poderiam ser coletados para se determinar o seu tempo de residência dentro do CFB e vislumbrar estudos sobre o contato gás-sólido para as diferentes condições operacionais.
- Para que se dê continuidade ao estudo da influência da presença de particulados no perfil de pressão estática do equipamento, sugere-se estender o estudo para particulados de diferentes diâmetro e massa específica;
- Quanto ao modelo proposto considerando-se as particularidades da Unidade Multipropósito, sugere-se determinar empiricamente uma correlação para o cálculo de f_p .
- Quanto ao modelo proposto considerando-se as influências da região de aceleração, sugere-se determinar empiricamente os coeficientes da Equação 2.20.
- Quanto ao modelo proposto para regime estabelecido e considerando-se as influências de peso de sólidos, atritos gás-parede e partículas-parede,

sugere-se determinar empiricamente os termos de aceleração das Equações 4.23 e 4.24.

Diante dos resultados apresentados neste trabalho acredita-se na sua contribuição no estado da arte em fluidodinâmica do escoamento gás-sólido ao longo de todo um leito fluidizado circulante e na importância para trabalhos futuros de outros autores.

6. Referências Bibliográficas

- ABADIE, E. *Curso de Craqueamento Catalítico, 2ª versão*. Petrobras/SEREC/CEN-SUD, Rio de Janeiro, RJ, 1997.
- ALL, S. *Pressure drop correlations for down through regular helical coil tubes*. Fluid Dynamics Research, vol. 28, pp. 295-310, 2001.
- BAKER, J. D., KLINZING, G. E. *Optimal performance of pneumatic transport systems*. Powder Technology, vol. 104, pp. 240-247, 1999.
- BETIOLI, M. L. P. *Desenvolvimento de metodologia e procedimentos experimentais para a caracterização física e análise térmica de materiais particulados*. Relatório Parcial de Iniciação Científica/PIBIC/CNPq. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, SP, 2001.
- BETIOLI, M. L. P. *Desenvolvimento de metodologia e procedimentos experimentais para a caracterização física e análise térmica de materiais particulados*. Relatório Final de Iniciação Científica/PIBIC/CNPq. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, SP, 2001.
- BETIOLI, M. L. P., CUNHA, D. A., CREMASCO, M. A. *Análise experimental do gradiente de pressão em um downer*. Anais do XXXII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Maringá, PR, 2006.
- BLAZECK, J. J. *Catalytic cracking – Part One, history and fundamentals*. The Davison Chemical Guide to Catalytic Cracking, 1971.
- BOLKAN – KENNY, J. G., PUGSLEY, T. S., BERRUTI, F. *Computer simulation of the performance of fluid catalytic cracking risers and downers*. Ind. Eng. Chem. Res., 33, pp. 3043-3052, 1991.
- CAO, C., WEINSTEIN, H. *Characterization of downflowing high velocity fluidized beds*. AIChE Journal, vol. 46, nº. 3, pp. 515-522, 2000.
- CHEN, H., LI, H. *Characterization of a high-density downer reactor*. Powder Technology, vol. 146, pp. 84-92, 2004.
- CHENG, Y., WEI, F., YANG, G., JIN Y. *Inlet and outlet effects on flow patterns in gas-solid risers*. Powder Technology, vol. 98, pp. 151-156, 1998.

- CHENG, Y., GUO, Y., WEI, F., JIN, Y., LIN W. *Modelling the hydrodynamics of downer reactors based on kinetic theory*. Chem. Engineering Science, vol. 54, pp. 2019-2027, 1999.
- CHENG, Y., WEI, F., YANG, G., JIN Y. *CFD simulation of hydrodynamics in the entrance region of a downer*. Chem. Engineering Science, vol. 56, pp. 1687-1696, 2001.
- CRANE CO. *Flow of fluids through valves, fittings, and pipe*. Technical Paper nº 410M, Crane Co., Nova York, NY, 1986.
- CREMASCO, M. A. *Estudo sobre o escoamento ar-partículas em um reator ciclônico*. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, SP, 1994.
- CREMASCO, M. A. *Estudo de reator de fluxo descendente para reações de craqueamento catalítico*. Relatório Técnico Parcial I Petrobras/FINEP, Campinas: Universidade Estadual de Campinas, SP, 2002.
- CREMASCO, M. A. *Estudo de reator de fluxo descendente para reações de craqueamento catalítico*. Relatório Técnico Parcial II Petrobras/FINEP, Campinas: Universidade Estadual de Campinas, SP, 2003.
- CREMASCO, M. A. *Aspectos básicos de transporte pneumático*. Apostila do curso IQ121-Sistemas Particulados. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, SP, 2006.
- DA SILVA, M. G. C., PÉCORA, A. A. B. *Estimativa da queda de pressão e parâmetros de projetos para sistemas bifásicos gás-sólido*. Anais do XVIII Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, vol. 1, pp. 279-291, Nova Friburgo, RJ, 1990.
- DAVIDSON, J. F., CLIFT, R., HARRINSON D. *Fluidization*. 2ª ed., Academic Press, Londres, pp. 274-278, 1985.
- FASSANI, F. L., GOLDSTEIN JR., L. *A study of the effect of high inlet solids loading on a cyclone separator pressure drop and collection efficiency*. Powder Technology, vol. 107, pp. 60-65, 2000.

- FELTRAN, M. B. *Estudo do desempenho de um alimentador de sólidos tipo válvula-L de pequeno diâmetro*. Tese de Mestrado. Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, SP, 2005.
- FREIRE, J. T., DA SILVEIRA, A. M., FERREIRA, M. C. *Transporte pneumático vertical*. Monografia. Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, SP, 1993.
- GELDART, D. *Types of gas fluidization*. Powder Technology, vol. 7, pp.285-292, 1973.
- GOMIDE, R. *Fluidos na indústria*. Edição do Autor, São Paulo, SP, 1993.
- GOLDSTEIN JUNIOR, L., PÉCORA, A. A. B., LOMBARDI, G., PAGLIUSO, J. D., *Design characteristics of loop seals to recycle solids in circulating fluidized beds*. 9th Miami International Congress on Energy and Environment, Miami Beach, Florida, EUA, 1989, pp. 9p., 1989.
- GOODALL, R. D. *Catalytic cracking – Part One*. The Davison Chemical Guide to Catalytic Cracking, 1961.
- GRACE CO. *Guide to fluid catalytic cracking – Part One*. W. R. Grace Co., 1993.
- GUIOTTL, L. G. *Modelagem e simulação de leito recirculante*. Relatório Final de Iniciação Científica/PIBIC/CNPq. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, SP, 2003.
- HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER J. *Fundamentos de física – mecânica, vol. 1*. 4^a edição, Editora LTC, Rio de Janeiro, RJ, 1996.
- HERBRETEAU, C., BOUARD, R. *Experimental study of parameters which influence the energy minimum in horizontal gas-solid conveying*. Powder Technology, vol. 112, pp. 213-220, 2000.
- ITO, H. *Friction factors for turbulent flow in curved pipes*. Trans. ASME J. Basic Eng., vol. 81D, pp. 123-129, 1959.
- JAMA, G. A., KLINZING, G. E., RIZK, F. *An investigation of the prevailing flow patterns and pressure fluctuation near the pressure minimum and unstable conveying zone of pneumatic transport systems*. Powder Technology, vol. 112, pp. 87-93, 2000.

- JOHNSTON, P. M., de LASA, H. I., ZHU, J. *Axial flow structure in the entrance region of downer fluidized bed: effects of the distribution design*. Chem. Engineering Science, vol. 54, pp. 2161-2173, 1999.
- KAVASSAKI, Y. *Desenvolvimento de técnicas de medida de baixas pressões diferenciais aplicadas à determinação de perda de carga localizada em conexões com redução*. Tese de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, 1985.
- KLINZING, G. E. *Gas-solid transport*. McGraw-Hill Book Company, 1981.
- KONRAD, K. *Dense phase conveying: a review*. Powder Technology, vol. 49, pp. 1-35, 1986.
- LAOUAR, S., MOLODTSOV, Y. *Experimental characterization of the pressure drop in dense phase pneumatic transport at very low velocity*. Powder Technology, vol. 95, pp. 165-173, 1998.
- LEHNER, P., WIRTH, K.-P. *Characterization of the flow pattern in a downer reactor*. Chem. Engineering Science, vol. 54, pp. 5471-5483, 1999.
- LI, Z. Q., WU, C. N., WEI, F., JIN, Y. *Experimental study of high-density gas-solids flow in a new coupled circulating fluidized bed*. Powder Technology, vol. 139, pp. 214-220, 2004.
- LOPES, C. S., FERREIRA, M. C., FREIRE, J. T. *Análise de gradientes de pressão em um transporte pneumático em "loop" para diferentes configurações de entrada*. Anais do XXXII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Maringá, PR, 2006.
- MASSARANI, G. *Fluidodinâmica em sistemas particulados*. Editora UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1997.
- MCDONALD, A. T., FOX, R. W. *Introdução à mecânica dos fluidos*. 4ª edição, Editora LTC, Rio de Janeiro, RJ, 1992.
- MORIKAWA, Y., TSUHI, Y., MATSUI, K., JITTANI Y. *Pressure drop due to pipe bends in air-solids two phase flow: circular and elliptical bends*. Int. J. Multiphase Flow, vol. 4, pp. 575-583, 1978.

- PATROCÍNIO, A. B., FERREIRA, M. C. *Desenvolvimento de uma linha de transporte pneumático para análise do escoamento gás-sólido em um "loop"*. Anais do XXXI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Uberlândia, MG, 2004.
- PÉCORA, A. A. B., GOLDSTEIN JUNIOR, L. *A fluid dynamics study of a circulating fluidized bed with secondary air injection*. IMECE/ASME – International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Atlanta, EUA, 1996, pp. 287-292, 1996.
- RAMAN, R. *Chemical Process Computations*. Elsevier Applied Science Publishers, London and New Jersey, 1985.
- ROSA, L. M., MORI, M., MARTIGNONI, W. P. *Aplicação de técnicas CFD na simulação bifásica de reações de craqueamento em um riser*. Anais do XXX Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, São Carlos, SP, 2002.
- SADEGHBEIGI, R. *Fluid Catalytic Cracking Handbook: Design, Operation, and Troubleshooting of FCC Facilities*. Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 2000.
- SPIEGEL, M. R. *Manual de fórmulas e tabelas matemáticas*. McGraw-Hill Book Company, 1973.
- WANG, Z., BAI, D., JIN Y. *Hydrodynamics of Cocurrent Downflow Circulating Fluidized Bed (CDCFB)*. Powder Technology, vol. 70, pp. 271 – 275, 1992.
- WANG, Y., WEI, F., WANG, Z., JIN, Y., ZHIQING, Y. *Radial profiles of solids concentration and velocity in a very fine particle (36 μ m) riser*. Powder Technology, vol. 96, pp. 262-266, 1998.
- WANG, S. J., GELDART, D., BECK, M. S., DYAKOXSKE, T. *A Behaviour of a Catalyst Powder Flowing Down in Dipleg*. Proceedings of 1st World Congress on Industrial Process Tomography, pp. 147-152, Buxton, England, April 14-17, 1999.
- WANG, S. J., BOUMA, J. H., DRIES, H. *An experimental study of cyclone flow in fluidized catalytic cracking*. Powder Technology, vol. 112, pp. 221-228, 2000.
- WANG, X., GAO, S., XU, Y., ZHANG J. *Gas-solids flow patterns in a novel dual-loop FCC riser*. Powder Technology, vol. 152, pp. 90-99, 2005.

- WEBB, P., ORR, C. *Analytical methods in fine particle technology*. U.S.A.: Micromeritics Instrument Corp., 1997.
- WEI, F., JIN, Y., YU, Z., CHEIN, W. *Lateral and axial mixing of the disperse particle in CFB*, *J. Chem. Engineering of Japan*, vol. 28, n° 5, pp. 506-510, 1995.
- WEI, F., ZHU, J-X. *Effect of flow direction on axial solid dispersion in gas-solids cocurrent upflow and downflow systems*. *Chem. Engineering J.*, vol. 64, pp. 345-352, 1996.
- WEI, F., FANGBIN, L., YOUNG, J., ZHIQING, Y. *Mass flux profiles in a high density circulating fluidized bed*, *Powder Technology*, vol. 91, pp. 189-195, 1997.
- WEI, F., LIU, J., JIN, Y., YU, Z. *Hydrodynamics and mixing behavior in the entrance region of a downer*. In M. Kwauk, e J. Li, *Circulating fluidized bed V*, Beijing: Science Press, pp. 122 – 127, 1997.
- WEI, F., XING, R., RUJIN, Z.; GUOHUA, L., YOUNG., J. *A dispersion model for fluid catalytic cracking risers and downers reactors*. *Ind. Engineering, Chem. Res.*, vol. 36, n° 12, pp. 5049-5053, 1997.
- WEI, F., LIN, H., CHENG, Y., WANG, Z.; JIN, Y. *Profiles of particle velocity and solids fraction in a high-density riser*. *Powder Technology*, vol. 100, pp. 183-189, 1998
- WILSON, J. W. *Fluid Catalytic cracking technology and operations*. PennWell Books, PennWell Publishing Company, Tulsa, Oklahoma, 1997.
- ZHANG, H., ZHU, J-X., BERGOUGNOU, M. A. *Flow development in a gas-solids downer fluidized bed*. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 77, pp. 194-198, 1999.

Apêndice A: Valores Calculados – velocidade de *choking*

Tabela A.1: Valores calculados da velocidade de *choking* para a seção do *riser* (Equação 2.11a). Ensaio A.

v (m/s)	0,394	0,526	0,789	1,052	1,315	1,578
G_s (kg/m ² s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)
0,032	0,331487	0,331487	0,330075	0,328673	0,330075	0,328673
0,076	0,331491	0,331491	0,330079	0,328677	0,330079	0,328677
0,120	0,331495	0,331495	0,330083	0,328681	0,330083	0,328681
0,164	0,331499	0,331499	0,330087	0,328686	0,330087	0,328686
0,208	0,331503	0,331503	0,330091	0,328690	0,330091	0,328690

Tabela A.2: Valores calculados da velocidade de *choking* para a seção do *riser* (Equação 2.11b). Ensaio A.

v (m/s)	0,394	0,526	0,789	1,052	1,315	1,578
G_s (kg/m ² s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)
0,032	0,136774	0,136774	0,136919	0,137064	0,136919	0,137064
0,076	0,164886	0,164886	0,165061	0,165235	0,165061	0,165235
0,120	0,181843	0,181843	0,182036	0,182228	0,182036	0,182228
0,164	0,194475	0,194475	0,194682	0,194887	0,194682	0,194887
0,208	0,204619	0,204619	0,204837	0,205053	0,204837	0,205053

Tabela A.3: Valores calculados da velocidade de *choking* para a seção do *riser* (Equação 2.11c). Ensaio A.

v (m/s)	0,394	0,526	0,789	1,052	1,315	1,578
G_s (kg/m ² s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)
0,032	0,339472	0,339472	0,338081	0,336700	0,338081	0,336700
0,076	0,343848	0,343848	0,342467	0,341097	0,342467	0,341097
0,120	0,347025	0,347025	0,345653	0,344291	0,345653	0,344291
0,164	0,349666	0,349666	0,348300	0,346945	0,348300	0,346945
0,208	0,351959	0,351959	0,350599	0,349250	0,350599	0,349250

Tabela A.4: Valores calculados da velocidade de *choking* para a seção do *riser* (Equação 2.11d). Ensaio A.

v (m/s)	0,394	0,526	0,789	1,052	1,315	1,578
G_s (kg/m ² s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)
0,032	0,356616	0,356616	0,355326	0,354046	0,355326	0,354046
0,076	0,365110	0,365110	0,363861	0,362623	0,363861	0,362623
0,120	0,370649	0,370649	0,369427	0,368216	0,369427	0,368216
0,164	0,374968	0,374968	0,373768	0,372577	0,373768	0,372577
0,208	0,378552	0,378552	0,377369	0,376196	0,377369	0,376196

Tabela A.5: Valores calculados da velocidade de *choking* para a seção do *riser* (Equação 2.11a). Ensaio B.

v (m/s)	0,394	0,526	0,789	1,052	1,315	1,578
Gs (kg/m ² s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)
0,032	0,328673	0,327282	0,327976	0,328673	0,327282	0,327282
0,076	0,328677	0,327286	0,327980	0,328677	0,327286	0,327286
0,120	0,328681	0,327290	0,327984	0,328681	0,327290	0,327290
0,164	0,328686	0,327294	0,327989	0,328686	0,327294	0,327294
0,208	0,328690	0,327299	0,327993	0,328690	0,327299	0,327299

Tabela A.6: Valores calculados da velocidade de *choking* para a seção do *riser* (Equação 2.11b). Ensaio B.

v (m/s)	0,394	0,526	0,789	1,052	1,315	1,578
Gs (kg/m ² s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)
0,032	0,137064	0,137207	0,137136	0,137064	0,137207	0,137207
0,076	0,165235	0,165408	0,165322	0,165235	0,165408	0,165408
0,120	0,182228	0,182419	0,182324	0,182228	0,182419	0,182419
0,164	0,194887	0,195091	0,194989	0,194887	0,195091	0,195091
0,208	0,205053	0,205268	0,205160	0,205053	0,205268	0,205268

Tabela A.7: Valores calculados da velocidade de *choking* para a seção do *riser* (Equação 2.11c). Ensaio B.

v (m/s)	0,394	0,526	0,789	1,052	1,315	1,578
Gs (kg/m ² s)	V _{ch} (m/s)	V _{ch} (m/s)	V _{ch} (m/s)	V _{ch} (m/s)	V _{ch} (m/s)	V _{ch} (m/s)
0,032	0,336700	0,335329	0,336013	0,336700	0,335329	0,335329
0,076	0,341097	0,339737	0,340416	0,341097	0,339737	0,339737
0,120	0,344291	0,342939	0,343613	0,344291	0,342939	0,342939
0,164	0,346945	0,345599	0,346271	0,346945	0,345599	0,345599
0,208	0,349250	0,347911	0,348579	0,349250	0,347911	0,347911

Tabela A.8: Valores calculados da velocidade de *choking* para a seção do *riser* (Equação 2.11d). Ensaio B.

v (m/s)	0,394	0,526	0,789	1,052	1,315	1,578
Gs (kg/m ² s)	V _{ch} (m/s)	V _{ch} (m/s)	V _{ch} (m/s)	V _{ch} (m/s)	V _{ch} (m/s)	V _{ch} (m/s)
0,032	0,354046	0,352777	0,353410	0,354046	0,352777	0,352777
0,076	0,362623	0,361395	0,362008	0,362623	0,361395	0,361395
0,120	0,368216	0,367015	0,367614	0,368216	0,367015	0,367015
0,164	0,372577	0,371397	0,371986	0,372577	0,371397	0,371397
0,208	0,376196	0,375033	0,375613	0,376196	0,375033	0,375033

Tabela A.9: Valores calculados da velocidade de *choking* para a seção do *riser* (Equação 2.11a). Ensaio C.

v (m/s)	0,789	1,052	1,315	1,578
G_s (kg/m ² s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)
0,032	0,332909	0,332196	0,330779	0,330779
0,076	0,332913	0,332201	0,330783	0,330783
0,120	0,332917	0,332205	0,330788	0,330788
0,164	0,332922	0,332209	0,330792	0,330792
0,208	0,332926	0,332213	0,330796	0,330796

Tabela A.10: Valores calculados da velocidade de *choking* para a seção do *riser* (Equação 2.11b). Ensaio C.

v (m/s)	0,789	1,052	1,315	1,578
G_s (kg/m ² s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)
0,032	0,136628	0,136701	0,136847	0,136847
0,076	0,164709	0,164798	0,164973	0,164973
0,120	0,181648	0,181745	0,181939	0,181939
0,164	0,194267	0,194371	0,194578	0,194578
0,208	0,204400	0,204510	0,204728	0,204728

Tabela A.11: Valores calculados da velocidade de *choking* para a seção do *riser* (Equação 2.11c). Ensaio C.

$v \text{ (m/s)}$	0,789	1,052	1,315	1,578
Gs (kg/m ² s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)
0,032	0,340874	0,340172	0,338775	0,338775
0,076	0,345238	0,344542	0,343156	0,343156
0,120	0,348408	0,347715	0,346338	0,346338
0,164	0,351041	0,350352	0,348981	0,348981
0,208	0,353329	0,352643	0,351278	0,351278

Tabela A.12: Valores calculados da velocidade de *choking* para a seção do *riser* (Equação 2.11d). Ensaio C.

$v \text{ (m/s)}$	0,789	1,052	1,315	1,578
Gs (kg/m ² s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)	V_{ch} (m/s)
0,032	0,357916	0,357264	0,355970	0,355970
0,076	0,366369	0,365738	0,364485	0,364485
0,120	0,371880	0,371263	0,370036	0,370036
0,164	0,376178	0,375572	0,374366	0,374366
0,208	0,379745	0,379147	0,377959	0,377959

Apêndice B: Valores Experimentais e Calculados – diferença de pressão

Tabela B.1: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *downer* (Equação 2.12a para f_p). Ensaio A.

v (m/s)	<i>downer</i>											
	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,903	-0,045	-4,903	-0,080	-4,903	-0,179	-4,903	-0,315	0,000	-0,495	0,000	-0,707
0,000	-9,807	-0,098	-4,903	-0,174	0,000	-0,387	0,000	-0,683	-9,807	-1,072	-4,903	-1,533
0,000	9,807	-0,098	9,807	-0,174	14,710	-0,387	9,807	-0,683	14,710	-1,072	19,613	-1,533
0,000	0,000	-0,091	0,000	-0,161	0,000	-0,357	0,000	-0,630	-4,903	-0,990	-4,903	-1,415
0,032	0,000	0,006	-4,903	-0,037	-4,903	-0,146	-9,807	-0,288	0,000	-0,473	-4,903	-0,688
0,032	-9,807	0,012	0,000	-0,080	0,000	-0,316	0,000	-0,625	-4,903	-1,024	0,000	-1,492
0,032	9,807	0,012	4,903	-0,080	14,710	-0,316	14,710	-0,625	14,710	-1,024	14,710	-1,492
0,032	0,000	0,011	0,000	-0,074	0,000	-0,292	-4,903	-0,577	-4,903	-0,946	0,000	-1,377
0,076	-4,903	0,077	-4,903	0,023	-9,807	-0,100	-4,903	-0,251	-4,903	-0,442	0,000	-0,662
0,076	-14,710	0,167	-4,903	0,050	0,000	-0,216	-4,903	-0,545	0,000	-0,957	-4,903	-1,434
0,076	24,517	0,167	4,903	0,050	9,807	-0,216	14,710	-0,545	14,710	-0,957	19,613	-1,434
0,076	-4,903	0,154	0,000	0,046	4,903	-0,200	-4,903	-0,503	-4,903	-0,884	0,000	-1,324
0,120	0,000	0,148	0,000	0,083	-4,903	-0,054	-4,903	-0,215	-4,903	-0,411	0,000	-0,636
0,120	-14,710	0,320	-4,903	0,180	0,000	-0,117	0,000	-0,465	-4,903	-0,891	-4,903	-1,377
0,120	19,613	0,320	0,000	0,180	9,807	-0,117	4,903	-0,465	14,710	-0,891	19,613	-1,377
0,120	0,000	0,296	0,000	0,166	0,000	-0,108	0,000	-0,429	0,000	-0,822	0,000	-1,271
0,164	-4,903	0,219	-4,903	0,143	-4,903	-0,008	-4,903	-0,177	-4,903	-0,380	0,000	-0,609
0,164	-9,807	0,475	-4,903	0,310	-9,807	-0,018	-4,903	-0,385	0,000	-0,824	-4,903	-1,320
0,164	19,613	0,475	4,903	0,310	14,710	-0,018	9,807	-0,385	9,807	-0,824	19,613	-1,320
0,164	-4,903	0,438	0,000	0,287	0,000	-0,016	0,000	-0,355	-4,903	-0,760	-4,903	-1,218
0,208	-4,903	0,290	-9,807	0,203	-4,903	0,038	-9,807	-0,141	-4,903	-0,349	0,000	-0,583
0,208	-9,807	0,628	-4,903	0,440	-9,807	0,082	0,000	-0,305	0,000	-0,757	0,000	-1,263
0,208	14,710	0,628	9,807	0,440	9,807	0,082	4,903	-0,305	14,710	-0,757	19,613	-1,263
0,208	0,000	0,580	0,000	0,406	0,000	0,075	-4,903	-0,281	-4,903	-0,699	-4,903	-1,166

Tabela B.2: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *downer* (Equação 2.12b para f_p). Ensaio A.

<i>downer</i>												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,903	-0,045	-4,903	-0,080	-4,903	-0,179	-4,903	-0,315	0,000	-0,495	0,000	-0,707
0,000	-9,807	-0,098	-4,903	-0,174	0,000	-0,387	0,000	-0,683	-9,807	-1,072	-4,903	-1,533
0,000	9,807	-0,098	9,807	-0,174	14,710	-0,387	9,807	-0,683	14,710	-1,072	19,613	-1,533
0,000	0,000	-0,091	0,000	-0,161	0,000	-0,357	0,000	-0,630	-4,903	-0,990	-4,903	-1,415
0,032	0,000	0,002	-4,903	-0,041	-4,903	-0,150	-9,807	-0,292	0,000	-0,477	-4,903	-0,692
0,032	-9,807	0,004	0,000	-0,089	0,000	-0,324	0,000	-0,633	-4,903	-1,033	0,000	-1,500
0,032	9,807	0,004	4,903	-0,089	14,710	-0,324	14,710	-0,633	14,710	-1,033	14,710	-1,500
0,032	0,000	0,003	0,000	-0,082	0,000	-0,299	-4,903	-0,585	-4,903	-0,953	0,000	-1,384
0,076	-4,903	0,067	-4,903	0,013	-9,807	-0,109	-4,903	-0,261	-4,903	-0,451	0,000	-0,671
0,076	-14,710	0,146	-4,903	0,029	0,000	-0,237	-4,903	-0,565	0,000	-0,977	-4,903	-1,454
0,076	24,517	0,146	4,903	0,029	9,807	-0,237	14,710	-0,565	14,710	-0,977	19,613	-1,454
0,076	-4,903	0,134	0,000	0,027	4,903	-0,219	-4,903	-0,521	-4,903	-0,902	0,000	-1,342
0,120	0,000	0,133	0,000	0,068	-4,903	-0,069	-4,903	-0,229	-4,903	-0,425	0,000	-0,650
0,120	-14,710	0,287	-4,903	0,147	0,000	-0,150	0,000	-0,497	-4,903	-0,922	-4,903	-1,408
0,120	19,613	0,287	0,000	0,147	9,807	-0,150	4,903	-0,497	14,710	-0,922	19,613	-1,408
0,120	0,000	0,265	0,000	0,136	0,000	-0,138	0,000	-0,458	0,000	-0,851	0,000	-1,300
0,164	-4,903	0,198	-4,903	0,122	-4,903	-0,029	-4,903	-0,198	-4,903	-0,400	0,000	-0,628
0,164	-9,807	0,429	-4,903	0,265	-9,807	-0,062	-4,903	-0,428	0,000	-0,866	-4,903	-1,362
0,164	19,613	0,429	4,903	0,265	14,710	-0,062	9,807	-0,428	9,807	-0,866	19,613	-1,362
0,164	-4,903	0,396	0,000	0,245	0,000	-0,057	0,000	-0,395	-4,903	-0,800	-4,903	-1,257
0,208	-4,903	0,263	-9,807	0,177	-4,903	0,012	-9,807	-0,166	-4,903	-0,374	0,000	-0,607
0,208	-9,807	0,571	-4,903	0,383	-9,807	0,025	0,000	-0,360	0,000	-0,811	0,000	-1,316
0,208	14,710	0,571	9,807	0,383	9,807	0,025	4,903	-0,360	14,710	-0,811	19,613	-1,316
0,208	0,000	0,527	0,000	0,354	0,000	0,023	-4,903	-0,332	-4,903	-0,749	-4,903	-1,215

Tabela B.3: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *downer* (Equação 2.12c para f_p). Ensaio A.

<i>downer</i>												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,903	-0,045	-4,903	-0,080	-4,903	-0,179	-4,903	-0,315	0,000	-0,495	0,000	-0,707
0,000	-9,807	-0,098	-4,903	-0,174	0,000	-0,387	0,000	-0,683	-9,807	-1,072	-4,903	-1,533
0,000	9,807	-0,098	9,807	-0,174	14,710	-0,387	9,807	-0,683	14,710	-1,072	19,613	-1,533
0,000	0,000	-0,091	0,000	-0,161	0,000	-0,357	0,000	-0,630	-4,903	-0,990	-4,903	-1,415
0,032	0,000	-0,001	-4,903	-0,044	-4,903	-0,153	-9,807	-0,296	0,000	-0,480	-4,903	-0,695
0,032	-9,807	-0,003	0,000	-0,096	0,000	-0,331	0,000	-0,640	-4,903	-1,039	0,000	-1,507
0,032	9,807	-0,003	4,903	-0,096	14,710	-0,331	14,710	-0,640	14,710	-1,039	14,710	-1,507
0,032	0,000	-0,003	0,000	-0,089	0,000	-0,306	-4,903	-0,591	-4,903	-0,959	0,000	-1,391
0,076	-4,903	0,060	-4,903	0,006	-9,807	-0,117	-4,903	-0,268	-4,903	-0,458	0,000	-0,678
0,076	-14,710	0,129	-4,903	0,013	0,000	-0,253	-4,903	-0,581	0,000	-0,993	-4,903	-1,470
0,076	24,517	0,129	4,903	0,013	9,807	-0,253	14,710	-0,581	14,710	-0,993	19,613	-1,470
0,076	-4,903	0,119	0,000	0,012	4,903	-0,234	-4,903	-0,537	-4,903	-0,917	0,000	-1,337
0,120	0,000	0,121	0,000	0,056	-4,903	-0,081	-4,903	-0,241	-4,903	-0,437	0,000	-0,662
0,120	-14,710	0,261	-4,903	0,121	0,000	-0,175	0,000	-0,522	-4,903	-0,948	-4,903	-1,434
0,120	19,613	0,261	0,000	0,121	9,807	-0,175	4,903	-0,522	14,710	-0,948	19,613	-1,434
0,120	0,000	0,241	0,000	0,112	0,000	-0,162	0,000	-0,482	0,000	-0,875	0,000	-1,323
0,164	-4,903	0,182	-4,903	0,106	-4,903	-0,045	-4,903	-0,214	-4,903	-0,416	0,000	-0,645
0,164	-9,807	0,394	-4,903	0,230	-9,807	-0,097	-4,903	-0,463	0,000	-0,902	-4,903	-1,397
0,164	19,613	0,394	4,903	0,230	14,710	-0,097	9,807	-0,463	9,807	-0,902	19,613	-1,397
0,164	-4,903	0,364	0,000	0,212	0,000	-0,090	0,000	-0,428	-4,903	-0,832	-4,903	-1,290
0,208	-4,903	0,243	-9,807	0,156	-4,903	-0,009	-9,807	-0,187	-4,903	-0,395	0,000	-0,628
0,208	-9,807	0,526	-4,903	0,338	-9,807	-0,019	0,000	-0,405	0,000	-0,856	0,000	-1,361
0,208	14,710	0,526	9,807	0,338	9,807	-0,019	4,903	-0,405	14,710	-0,856	19,613	-1,361
0,208	0,000	0,485	0,000	0,312	0,000	-0,018	-4,903	-0,373	-4,903	-0,790	-4,903	-1,256

Tabela B.4: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *downer* (Equação 2.12d para f_p). Ensaio A.

v (m/s)	<i>downer</i>											
	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,903	-0,045	-4,903	-0,080	-4,903	-0,179	-4,903	-0,315	0,000	-0,495	0,000	-0,707
0,000	-9,807	-0,098	-4,903	-0,174	0,000	-0,387	0,000	-0,683	-9,807	-1,072	-4,903	-1,533
0,000	9,807	-0,098	9,807	-0,174	14,710	-0,387	9,807	-0,683	14,710	-1,072	19,613	-1,533
0,000	0,000	-0,091	0,000	-0,161	0,000	-0,357	0,000	-0,630	-4,903	-0,990	-4,903	-1,415
0,032	0,000	0,004	-4,903	-0,039	-4,903	-0,148	-9,807	-0,290	0,000	-0,475	-4,903	-0,690
0,032	-9,807	0,008	0,000	-0,085	0,000	-0,320	0,000	-0,629	-4,903	-1,028	0,000	-1,496
0,032	9,807	0,008	4,903	-0,085	14,710	-0,320	14,710	-0,629	14,710	-1,028	14,710	-1,496
0,032	0,000	0,007	0,000	-0,078	0,000	-0,296	-4,903	-0,581	-4,903	-0,949	0,000	-1,381
0,076	-4,903	0,072	-4,903	0,018	-9,807	-0,105	-4,903	-0,256	-4,903	-0,446	0,000	-0,666
0,076	-14,710	0,156	-4,903	0,039	0,000	-0,227	-4,903	-0,555	0,000	-0,967	-4,903	-1,444
0,076	24,517	0,156	4,903	0,039	9,807	-0,227	14,710	-0,555	14,710	-0,967	19,613	-1,444
0,076	-4,903	0,144	0,000	0,036	4,903	-0,210	-4,903	-0,512	-4,903	-0,893	0,000	-1,333
0,120	0,000	0,140	0,000	0,075	-4,903	-0,062	-4,903	-0,222	-4,903	-0,418	0,000	-0,643
0,120	-14,710	0,303	-4,903	0,162	0,000	-0,134	0,000	-0,481	-4,903	-0,906	-4,903	-1,392
0,120	19,613	0,303	0,000	0,162	9,807	-0,134	4,903	-0,481	14,710	-0,906	19,613	-1,392
0,120	0,000	0,279	0,000	0,150	0,000	-0,124	0,000	-0,444	0,000	-0,837	0,000	-1,285
0,164	-4,903	0,208	-4,903	0,132	-4,903	-0,019	-4,903	-0,188	-4,903	-0,390	0,000	-0,619
0,164	-9,807	0,450	-4,903	0,287	-9,807	-0,041	-4,903	-0,407	0,000	-0,845	-4,903	-1,340
0,164	19,613	0,450	4,903	0,287	14,710	-0,041	9,807	-0,407	9,807	-0,845	19,613	-1,340
0,164	-4,903	0,416	0,000	0,264	0,000	-0,038	0,000	-0,375	-4,903	-0,780	-4,903	-1,237
0,208	-4,903	0,276	-9,807	0,189	-4,903	0,024	-9,807	-0,154	-4,903	-0,362	0,000	-0,595
0,208	-9,807	0,598	-4,903	0,410	-9,807	0,052	0,000	-0,333	0,000	-0,784	0,000	-1,289
0,208	14,710	0,598	9,807	0,410	9,807	0,052	4,903	-0,333	14,710	-0,784	19,613	-1,289
0,208	0,000	0,552	0,000	0,378	0,000	0,048	-4,903	-0,307	-4,903	-0,724	-4,903	-1,190

Tabela B.5: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *downer* (Equação 2.12e para f_p). Ensaio A.

<i>downer</i>												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
G_s (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,903	-0,045	-4,903	-0,080	-4,903	-0,179	-4,903	-0,315	0,000	-0,495	0,000	-0,707
0,000	-9,807	-0,098	-4,903	-0,174	0,000	-0,387	0,000	-0,683	-9,807	-1,072	-4,903	-1,533
0,000	9,807	-0,098	9,807	-0,174	14,710	-0,387	9,807	-0,683	14,710	-1,072	19,613	-1,533
0,000	0,000	-0,091	0,000	-0,161	0,000	-0,357	0,000	-0,630	-4,903	-0,990	-4,903	-1,415
0,032	0,000	0,001	-4,903	-0,041	-4,903	-0,150	-9,807	-0,292	0,000	-0,476	-4,903	-0,692
0,032	-9,807	0,003	0,000	-0,090	0,000	-0,325	0,000	-0,633	-4,903	-1,032	0,000	-1,499
0,032	9,807	0,003	4,903	-0,090	14,710	-0,325	14,710	-0,633	14,710	-1,032	14,710	-1,499
0,032	0,000	0,002	0,000	-0,083	0,000	-0,300	-4,903	-0,585	-4,903	-0,953	0,000	-1,384
0,076	-4,903	0,066	-4,903	0,013	-9,807	-0,109	-4,903	-0,260	-4,903	-0,450	0,000	-0,670
0,076	-14,710	0,143	-4,903	0,027	0,000	-0,237	-4,903	-0,564	0,000	-0,976	-4,903	-1,452
0,076	24,517	0,143	4,903	0,027	9,807	-0,237	14,710	-0,564	14,710	-0,976	19,613	-1,452
0,076	-4,903	0,132	0,000	0,025	4,903	-0,219	-4,903	-0,521	-4,903	-0,901	0,000	-1,340
0,120	0,000	0,131	0,000	0,067	-4,903	-0,069	-4,903	-0,229	-4,903	-0,424	0,000	-0,648
0,120	-14,710	0,283	-4,903	0,144	0,000	-0,150	0,000	-0,496	-4,903	-0,920	-4,903	-1,405
0,120	19,613	0,283	0,000	0,144	9,807	-0,150	4,903	-0,496	14,710	-0,920	19,613	-1,405
0,120	0,000	0,261	0,000	0,133	0,000	-0,139	0,000	-0,457	0,000	-0,849	0,000	-1,296
0,164	-4,903	0,195	-4,903	0,121	-4,903	-0,029	-4,903	-0,197	-4,903	-0,398	0,000	-0,626
0,164	-9,807	0,424	-4,903	0,262	-9,807	-0,063	-4,903	-0,427	0,000	-0,863	-4,903	-1,357
0,164	19,613	0,424	4,903	0,262	14,710	-0,063	9,807	-0,427	9,807	-0,863	19,613	-1,357
0,164	-4,903	0,391	0,000	0,241	0,000	-0,058	0,000	-0,394	-4,903	-0,797	-4,903	-1,253
0,208	-4,903	0,260	-9,807	0,175	-4,903	0,011	-9,807	-0,165	-4,903	-0,373	0,000	-0,605
0,208	-9,807	0,563	-4,903	0,378	-9,807	0,024	0,000	-0,358	0,000	-0,807	0,000	-1,310
0,208	14,710	0,563	9,807	0,378	9,807	0,024	4,903	-0,358	14,710	-0,807	19,613	-1,310
0,208	0,000	0,520	0,000	0,349	0,000	0,022	-4,903	-0,330	-4,903	-0,745	-4,903	-1,209

Tabela B.6: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *downer* (Equação 2.12f para f_p). Ensaio A.

v (m/s)	<i>downer</i>											
	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,903	-0,045	-4,903	-0,080	-4,903	-0,179	-4,903	-0,315	0,000	-0,495	0,000	-0,707
0,000	-9,807	-0,098	-4,903	-0,174	0,000	-0,387	0,000	-0,683	-9,807	-1,072	-4,903	-1,533
0,000	9,807	-0,098	9,807	-0,174	14,710	-0,387	9,807	-0,683	14,710	-1,072	19,613	-1,533
0,000	0,000	-0,091	0,000	-0,161	0,000	-0,357	0,000	-0,630	-4,903	-0,990	-4,903	-1,415
0,032	0,000	0,006	-4,903	-0,037	-4,903	-0,145	-9,807	-0,288	0,000	-0,472	-4,903	-0,688
0,032	-9,807	0,013	0,000	-0,080	0,000	-0,315	0,000	-0,624	-4,903	-1,023	0,000	-1,491
0,032	9,807	0,013	4,903	-0,080	14,710	-0,315	14,710	-0,624	14,710	-1,023	14,710	-1,491
0,032	0,000	0,012	0,000	-0,074	0,000	-0,291	-4,903	-0,576	-4,903	-0,945	0,000	-1,376
0,076	-4,903	0,077	-4,903	0,024	-9,807	-0,099	-4,903	-0,251	-4,903	-0,441	0,000	-0,661
0,076	-14,710	0,168	-4,903	0,051	0,000	-0,215	-4,903	-0,543	0,000	-0,955	-4,903	-1,432
0,076	24,517	0,168	4,903	0,051	9,807	-0,215	14,710	-0,543	14,710	-0,955	19,613	-1,432
0,076	-4,903	0,155	0,000	0,047	4,903	-0,198	-4,903	-0,501	-4,903	-0,881	0,000	-1,322
0,120	0,000	0,149	0,000	0,084	-4,903	-0,053	-4,903	-0,213	-4,903	-0,409	0,000	-0,634
0,120	-14,710	0,322	-4,903	0,182	0,000	-0,115	0,000	-0,462	-4,903	-0,887	-4,903	-1,373
0,120	19,613	0,322	0,000	0,182	9,807	-0,115	4,903	-0,462	14,710	-0,887	19,613	-1,373
0,120	0,000	0,297	0,000	0,168	0,000	-0,106	0,000	-0,426	0,000	-0,819	0,000	-1,267
0,164	-4,903	0,220	-4,903	0,144	-4,903	-0,007	-4,903	-0,175	-4,903	-0,378	0,000	-0,606
0,164	-9,807	0,477	-4,903	0,313	-9,807	-0,014	-4,903	-0,380	0,000	-0,819	-4,903	-1,314
0,164	19,613	0,477	4,903	0,313	14,710	-0,014	9,807	-0,380	9,807	-0,819	19,613	-1,314
0,164	-4,903	0,440	0,000	0,289	0,000	-0,013	0,000	-0,351	-4,903	-0,756	-4,903	-1,213
0,208	-4,903	0,291	-9,807	0,205	-4,903	0,040	-9,807	-0,138	-4,903	-0,346	0,000	-0,579
0,208	-9,807	0,631	-4,903	0,444	-9,807	0,086	0,000	-0,299	0,000	-0,750	0,000	-1,255
0,208	14,710	0,631	9,807	0,444	9,807	0,086	4,903	-0,299	14,710	-0,750	19,613	-1,255
0,208	0,000	0,583	0,000	0,410	0,000	0,079	-4,903	-0,276	-4,903	-0,693	-4,903	-1,159

Tabela B.7: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *downer* (Equação 2.12g para f_p). Ensaio A.

<i>downer</i>												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,903	-0,045	-4,903	-0,080	-4,903	-0,179	-4,903	-0,315	0,000	-0,495	0,000	-0,707
0,000	-9,807	-0,098	-4,903	-0,174	0,000	-0,387	0,000	-0,683	-9,807	-1,072	-4,903	-1,533
0,000	9,807	-0,098	9,807	-0,174	14,710	-0,387	9,807	-0,683	14,710	-1,072	19,613	-1,533
0,000	0,000	-0,091	0,000	-0,161	0,000	-0,357	0,000	-0,630	-4,903	-0,990	-4,903	-1,415
0,032	0,000	0,000	-4,903	-0,043	-4,903	-0,153	-9,807	-0,296	0,000	-0,481	-4,903	-0,698
0,032	-9,807	0,000	0,000	-0,094	0,000	-0,331	0,000	-0,642	-4,903	-1,043	0,000	-1,512
0,032	9,807	0,000	4,903	-0,094	14,710	-0,331	14,710	-0,642	14,710	-1,043	14,710	-1,512
0,032	0,000	0,000	0,000	-0,087	0,000	-0,306	-4,903	-0,593	-4,903	-0,963	0,000	-1,396
0,076	-4,903	0,063	-4,903	0,008	-9,807	-0,117	-4,903	-0,271	-4,903	-0,463	0,000	-0,684
0,076	-14,710	0,137	-4,903	0,018	0,000	-0,253	-4,903	-0,586	0,000	-1,002	-4,903	-1,483
0,076	24,517	0,137	4,903	0,018	9,807	-0,253	14,710	-0,586	14,710	-1,002	19,613	-1,483
0,076	-4,903	0,126	0,000	0,016	4,903	-0,234	-4,903	-0,541	-4,903	-0,925	0,000	-1,369
0,120	0,000	0,126	0,000	0,059	-4,903	-0,081	-4,903	-0,245	-4,903	-0,444	0,000	-0,671
0,120	-14,710	0,273	-4,903	0,129	0,000	-0,176	0,000	-0,530	-4,903	-0,962	-4,903	-1,454
0,120	19,613	0,273	0,000	0,129	9,807	-0,176	4,903	-0,530	14,710	-0,962	19,613	-1,454
0,120	0,000	0,252	0,000	0,119	0,000	-0,162	0,000	-0,489	0,000	-0,888	0,000	-1,342
0,164	-4,903	0,189	-4,903	0,111	-4,903	-0,045	-4,903	-0,219	-4,903	-0,425	0,000	-0,658
0,164	-9,807	0,410	-4,903	0,240	-9,807	-0,098	-4,903	-0,474	0,000	-0,921	-4,903	-1,425
0,164	19,613	0,410	4,903	0,240	14,710	-0,098	9,807	-0,474	9,807	-0,921	19,613	-1,425
0,164	-4,903	0,379	0,000	0,222	0,000	-0,090	0,000	-0,437	-4,903	-0,850	-4,903	-1,315
0,208	-4,903	0,252	-9,807	0,162	-4,903	-0,009	-9,807	-0,193	-4,903	-0,407	0,000	-0,644
0,208	-9,807	0,547	-4,903	0,351	-9,807	-0,020	0,000	-0,418	0,000	-0,881	0,000	-1,396
0,208	14,710	0,547	9,807	0,351	9,807	-0,020	4,903	-0,418	14,710	-0,881	19,613	-1,396
0,208	0,000	0,505	0,000	0,324	0,000	-0,019	-4,903	-0,386	-4,903	-0,813	-4,903	-1,289

Tabela B.8: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12a para f_p). Ensaio A.

Curva em “U”												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-18,11	-14,71	-32,08	-9,81	-71,43	-4,90	-125,91	-9,81	-197,79	-9,81	-282,74
0,032	0,00	-17,67	-4,90	-31,73	-9,81	-71,21	-4,90	-125,79	-4,90	-197,74	-9,81	-282,75
0,076	-4,90	-17,05	-4,90	-31,24	-4,90	-70,91	-4,90	-125,62	-4,90	-197,67	-14,71	-282,77
0,120	-4,90	-16,43	-9,81	-30,76	0,00	-70,61	-14,71	-125,45	-4,90	-197,61	-14,71	-282,79
0,164	-4,90	-15,81	-14,71	-30,27	4,90	-70,31	-9,81	-125,28	-9,81	-197,54	-9,81	-282,81
0,208	-4,90	-15,20	-9,81	-29,79	0,00	-70,01	-14,71	-125,12	-9,81	-197,48	-9,81	-282,83

Tabela B.9: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12b para f_p). Ensaio A.

Curva em “U”												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-18,11	-14,71	-32,08	-9,81	-71,43	-4,90	-125,91	-9,81	-197,79	-9,81	-282,74
0,032	0,00	-19,29	-4,90	-33,33	-9,81	-72,79	-4,90	-127,34	-4,90	-199,26	-9,81	-284,24
0,076	-4,90	-20,93	-4,90	-35,09	-4,90	-74,69	-4,90	-129,33	-4,90	-201,31	-14,71	-286,34
0,120	-4,90	-22,57	-9,81	-36,84	0,00	-76,58	-14,71	-131,31	-4,90	-203,36	-14,71	-288,43
0,164	-4,90	-24,21	-14,71	-38,59	4,90	-78,48	-9,81	-133,30	-9,81	-205,41	-9,81	-290,53
0,208	-4,90	-25,85	-9,81	-40,34	0,00	-80,37	-14,71	-135,29	-9,81	-207,45	-9,81	-292,62

Tabela B.10: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12c para f_p). Ensaio A.

Curva em “U”												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-18,11	-14,71	-32,08	-9,81	-71,43	-4,90	-125,91	-9,81	-197,79	-9,81	-282,74
0,032	0,00	-20,55	-4,90	-34,59	-9,81	-74,05	-4,90	-128,60	-4,90	-200,52	-9,81	-285,50
0,076	-4,90	-23,94	-4,90	-38,10	-4,90	-77,70	-4,90	-132,34	-4,90	-204,32	-14,71	-289,35
0,120	-4,90	-27,33	-9,81	-41,60	0,00	-81,34	-14,71	-136,07	-4,90	-208,12	-14,71	-293,19
0,164	-4,90	-30,72	-14,71	-45,11	4,90	-85,00	-9,81	-139,82	-9,81	-211,92	-9,81	-297,04
0,208	-4,90	-34,11	-9,81	-48,60	0,00	-88,64	-14,71	-143,55	-9,81	-215,72	-9,81	-300,88

Tabela B.11: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12d para f_p). Ensaio A.

Curva em “U”												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-18,11	-14,71	-32,08	-9,81	-71,43	-4,90	-125,91	-9,81	-197,79	-9,81	-282,74
0,032	0,00	-18,53	-4,90	-32,58	-9,81	-72,03	-4,90	-126,58	-4,90	-198,50	-9,81	-283,49
0,076	-4,90	-19,12	-4,90	-33,28	-4,90	-72,88	-4,90	-127,52	-4,90	-199,50	-14,71	-284,53
0,120	-4,90	-19,71	-9,81	-33,98	0,00	-73,72	-14,71	-128,45	-4,90	-200,50	-14,71	-285,57
0,164	-4,90	-20,29	-14,71	-34,68	4,90	-74,57	-9,81	-129,39	-9,81	-201,49	-9,81	-286,61
0,208	-4,90	-20,88	-9,81	-35,37	0,00	-75,41	-14,71	-130,32	-9,81	-202,49	-9,81	-287,65

Tabela B.12: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12e para f_p). Ensaio A.

Curva em “U”												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-18,11	-14,71	-32,08	-9,81	-71,43	-4,90	-125,91	-9,81	-197,79	-9,81	-282,74
0,032	0,00	-19,49	-4,90	-33,47	-9,81	-72,82	-4,90	-127,29	-4,90	-199,15	-9,81	-284,08
0,076	-4,90	-21,42	-4,90	-35,41	-4,90	-74,76	-4,90	-129,22	-4,90	-201,05	-14,71	-285,95
0,120	-4,90	-23,34	-9,81	-37,35	0,00	-76,70	-14,71	-131,13	-4,90	-202,94	-14,71	-287,82
0,164	-4,90	-25,27	-14,71	-39,29	4,90	-78,64	-9,81	-133,06	-9,81	-204,84	-9,81	-289,69
0,208	-4,90	-27,18	-9,81	-41,23	0,00	-80,58	-14,71	-134,97	-9,81	-206,73	-9,81	-291,56

Tabela B.13: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12f para f_p). Ensaio A.

Curva em “U”												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-18,11	-14,71	-32,08	-9,81	-71,43	-4,90	-125,91	-9,81	-197,79	-9,81	-282,74
0,032	0,00	-17,59	-4,90	-31,63	-9,81	-71,09	-4,90	-125,64	-4,90	-197,56	-9,81	-282,54
0,076	-4,90	-16,86	-4,90	-31,01	-4,90	-70,61	-4,90	-125,25	-4,90	-197,24	-14,71	-282,26
0,120	-4,90	-16,13	-9,81	-30,40	0,00	-70,14	-14,71	-124,87	-4,90	-196,92	-14,71	-281,99
0,164	-4,90	-15,40	-14,71	-29,78	4,90	-69,67	-9,81	-124,49	-9,81	-196,60	-9,81	-281,71
0,208	-4,90	-14,67	-9,81	-29,16	0,00	-69,20	-14,71	-124,11	-9,81	-196,28	-9,81	-281,44

Tabela B.14: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12g para f_p). Ensaio A.

Curva em “U”												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-18,11	-14,71	-32,08	-9,81	-71,43	-4,90	-125,91	-9,81	-197,79	-9,81	-282,74
0,032	0,00	-19,96	-4,90	-34,22	-9,81	-74,07	-4,90	-128,97	-4,90	-201,22	-9,81	-286,50
0,076	-4,90	-22,54	-4,90	-37,22	-4,90	-77,76	-4,90	-133,24	-4,90	-206,00	-14,71	-291,75
0,120	-4,90	-25,11	-9,81	-40,21	0,00	-81,44	-14,71	-137,50	-4,90	-210,77	-14,71	-296,97
0,164	-4,90	-27,69	-14,71	-43,20	4,90	-85,13	-9,81	-141,77	-9,81	-215,56	-9,81	-302,22
0,208	-4,90	-30,25	-9,81	-46,19	0,00	-88,80	-14,71	-146,02	-9,81	-220,32	-9,81	-307,44

Tabela B.15: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.16 para f_p). Ensaio A.

Curva em “U”												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-18,11	-14,71	-32,08	-9,81	-71,43	-4,90	-125,91	-9,81	-197,79	-9,81	-282,74
0,032	0,00	-4963,48	-4,90	-4707,51	-9,81	-4622,59	-4,90	-4749,55	-4,90	-4974,17	-9,81	-5223,51
0,076	-4,90	-6731,14	-4,90	-6378,85	-4,90	-6249,71	-4,90	-6402,69	-4,90	-6682,00	-14,71	-6990,15
0,120	-4,90	-7895,92	-9,81	-7480,26	0,00	-7322,08	-14,71	-7492,27	-4,90	-7807,66	-14,71	-8154,61
0,164	-4,90	-8809,77	-14,71	-8344,46	4,90	-8163,58	-9,81	-8347,31	-9,81	-8691,04	-9,81	-9068,46
0,208	-4,90	-9571,34	-9,81	-9064,72	0,00	-8864,98	-14,71	-9060,04	-9,81	-9427,41	-9,81	-9830,23

Tabela B.16: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *riser* (Equação 2.12a para f_p). Ensaio A.

v (m/s)	<i>riser</i>											
	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-14,710	-0,215	-4,903	-0,381	-4,903	-0,849	-9,807	-1,497	-4,903	-2,351	-4,903	-3,361
0,000	0,000	-0,215	0,000	-0,381	-4,903	-0,849	-4,903	-1,497	-4,903	-2,351	0,000	-3,361
0,000	4,903	-0,215	0,000	-0,381	-9,807	-0,849	-4,903	-1,497	-9,807	-2,351	-4,903	-3,361
0,000	0,000	-0,045	0,000	-0,080	-4,903	-0,179	-4,903	-0,315	-4,903	-0,495	-4,903	-0,707
0,032	-9,807	-3,005	-4,903	-1,290	-4,903	-1,235	-4,903	-1,742	-4,903	-2,532	-4,903	-3,504
0,032	0,000	-3,005	-4,903	-1,290	-4,903	-1,235	-4,903	-1,742	-4,903	-2,532	0,000	-3,504
0,032	4,903	-3,005	0,000	-1,290	-14,710	-1,235	-9,807	-1,742	-9,807	-2,532	-4,903	-3,504
0,032	-4,903	-0,633	0,000	-0,271	0,000	-0,260	0,000	-0,367	-4,903	-0,533	-4,903	-0,738
0,076	-9,807	-6,848	-4,903	-2,555	-9,807	-1,773	-4,903	-2,084	-9,807	-2,784	-4,903	-3,703
0,076	0,000	-6,848	0,000	-2,555	0,000	-1,773	0,000	-2,084	-4,903	-2,784	-4,903	-3,703
0,076	4,903	-6,848	-4,903	-2,555	-14,710	-1,773	-14,710	-2,084	-4,903	-2,784	-4,903	-3,703
0,076	0,000	-1,442	0,000	-0,538	-4,903	-0,373	0,000	-0,439	0,000	-0,586	0,000	-0,780
0,120	-4,903	-10,619	-14,710	-3,813	-4,903	-2,308	-4,903	-2,425	-9,807	-3,035	-4,903	-3,902
0,120	0,000	-10,619	0,000	-3,813	-4,903	-2,308	-4,903	-2,425	-4,903	-3,035	-4,903	-3,902
0,120	4,903	-10,619	0,000	-3,813	-4,903	-2,308	-4,903	-2,425	-4,903	-3,035	-4,903	-3,902
0,120	0,000	-2,236	0,000	-0,803	-14,710	-0,486	-4,903	-0,510	-4,903	-0,639	-4,903	-0,822
0,164	-14,710	-14,354	-9,807	-5,074	-4,903	-2,846	-4,903	-2,767	-4,903	-3,287	0,000	-4,102
0,164	-4,903	-14,354	0,000	-5,074	-4,903	-2,846	0,000	-2,767	-4,903	-3,287	-4,903	-4,102
0,164	14,710	-14,354	-4,903	-5,074	-4,903	-2,846	-9,807	-2,767	-4,903	-3,287	-9,807	-4,102
0,164	0,000	-3,022	0,000	-1,068	-4,903	-0,599	-9,807	-0,582	-4,903	-0,692	0,000	-0,864
0,208	-9,807	-18,023	-4,903	-6,327	-4,903	-3,381	0,000	-3,107	-4,903	-3,538	0,000	-4,301
0,208	-4,903	-18,023	-4,903	-6,327	0,000	-3,381	-4,903	-3,107	-4,903	-3,538	-4,903	-4,301
0,208	9,807	-18,023	-4,903	-6,327	-9,807	-3,381	-9,807	-3,107	0,000	-3,538	-4,903	-4,301
0,208	0,000	-3,794	0,000	-1,332	-4,903	-0,712	0,000	-0,654	-4,903	-0,745	-4,903	-0,905

Tabela B.17: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *riser* (Equação 2.12b para f_p). Ensaio A.

v (m/s)	<i>riser</i>											
	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-14,710	-0,215	-4,903	-0,381	-4,903	-0,849	-9,807	-1,497	-4,903	-2,351	-4,903	-3,361
0,000	0,000	-0,215	0,000	-0,381	-4,903	-0,849	-4,903	-1,497	-4,903	-2,351	0,000	-3,361
0,000	4,903	-0,215	0,000	-0,381	-9,807	-0,849	-4,903	-1,497	-9,807	-2,351	-4,903	-3,361
0,000	0,000	-0,045	0,000	-0,080	-4,903	-0,179	-4,903	-0,315	-4,903	-0,495	-4,903	-0,707
0,032	-9,807	-3,025	-4,903	-1,310	-4,903	-1,254	-4,903	-1,761	-4,903	-2,551	-4,903	-3,522
0,032	0,000	-3,025	-4,903	-1,310	-4,903	-1,254	-4,903	-1,761	-4,903	-2,551	0,000	-3,522
0,032	4,903	-3,025	0,000	-1,310	-14,710	-1,254	-9,807	-1,761	-9,807	-2,551	-4,903	-3,522
0,032	-4,903	-0,637	0,000	-0,276	0,000	-0,264	0,000	-0,371	-4,903	-0,537	-4,903	-0,742
0,076	-9,807	-6,896	-4,903	-2,603	-9,807	-1,820	-4,903	-2,130	-9,807	-2,829	-4,903	-3,748
0,076	0,000	-6,896	0,000	-2,603	0,000	-1,820	0,000	-2,130	-4,903	-2,829	-4,903	-3,748
0,076	4,903	-6,896	-4,903	-2,603	-14,710	-1,820	-14,710	-2,130	-4,903	-2,829	-4,903	-3,748
0,076	0,000	-1,452	0,000	-0,548	-4,903	-0,383	0,000	-0,448	0,000	-0,596	0,000	-0,789
0,120	-4,903	-10,696	-14,710	-3,888	-4,903	-2,382	-4,903	-2,498	-9,807	-3,106	-4,903	-3,973
0,120	0,000	-10,696	0,000	-3,888	-4,903	-2,382	-4,903	-2,498	-4,903	-3,106	-4,903	-3,973
0,120	4,903	-10,696	0,000	-3,888	-4,903	-2,382	-4,903	-2,498	-4,903	-3,106	-4,903	-3,973
0,120	0,000	-2,252	0,000	-0,819	-14,710	-0,502	-4,903	-0,526	-4,903	-0,654	-4,903	-0,836
0,164	-14,710	-14,459	-9,807	-5,177	-4,903	-2,947	-4,903	-2,867	-4,903	-3,385	0,000	-4,198
0,164	-4,903	-14,459	0,000	-5,177	-4,903	-2,947	0,000	-2,867	-4,903	-3,385	-4,903	-4,198
0,164	14,710	-14,459	-4,903	-5,177	-4,903	-2,947	-9,807	-2,867	-4,903	-3,385	-9,807	-4,198
0,164	0,000	-3,044	0,000	-1,090	-4,903	-0,620	-9,807	-0,604	-4,903	-0,713	0,000	-0,884
0,208	-9,807	-18,155	-4,903	-6,459	-4,903	-3,510	0,000	-3,234	-4,903	-3,662	0,000	-4,423
0,208	-4,903	-18,155	-4,903	-6,459	0,000	-3,510	-4,903	-3,234	-4,903	-3,662	-4,903	-4,423
0,208	9,807	-18,155	-4,903	-6,459	-9,807	-3,510	-9,807	-3,234	0,000	-3,662	-4,903	-4,423
0,208	0,000	-3,822	0,000	-1,360	-4,903	-0,739	0,000	-0,681	-4,903	-0,771	-4,903	-0,931

Tabela B.18: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *riser* (Equação 2.12c para f_p). Ensaio A.

v (m/s)	<i>riser</i>											
	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-14,710	-0,215	-4,903	-0,381	-4,903	-0,849	-9,807	-1,497	-4,903	-2,351	-4,903	-3,361
0,000	0,000	-0,215	0,000	-0,381	-4,903	-0,849	-4,903	-1,497	-4,903	-2,351	0,000	-3,361
0,000	4,903	-0,215	0,000	-0,381	-9,807	-0,849	-4,903	-1,497	-9,807	-2,351	-4,903	-3,361
0,000	0,000	-0,045	0,000	-0,080	-4,903	-0,179	-4,903	-0,315	-4,903	-0,495	-4,903	-0,707
0,032	-9,807	-3,040	-4,903	-1,325	-4,903	-1,269	-4,903	-1,776	-4,903	-2,565	-4,903	-3,537
0,032	0,000	-3,040	-4,903	-1,325	-4,903	-1,269	-4,903	-1,776	-4,903	-2,565	0,000	-3,537
0,032	4,903	-3,040	0,000	-1,325	-14,710	-1,269	-9,807	-1,776	-9,807	-2,565	-4,903	-3,537
0,032	-4,903	-0,640	0,000	-0,279	0,000	-0,267	0,000	-0,374	-4,903	-0,540	-4,903	-0,745
0,076	-9,807	-6,932	-4,903	-2,639	-9,807	-1,855	-4,903	-2,166	-9,807	-2,865	-4,903	-3,784
0,076	0,000	-6,932	0,000	-2,639	0,000	-1,855	0,000	-2,166	-4,903	-2,865	-4,903	-3,784
0,076	4,903	-6,932	-4,903	-2,639	-14,710	-1,855	-14,710	-2,166	-4,903	-2,865	-4,903	-3,784
0,076	0,000	-1,459	0,000	-0,556	-4,903	-0,391	0,000	-0,456	0,000	-0,603	0,000	-0,797
0,120	-4,903	-10,752	-14,710	-3,945	-4,903	-2,439	-4,903	-2,554	-9,807	-3,163	-4,903	-4,029
0,120	0,000	-10,752	0,000	-3,945	-4,903	-2,439	-4,903	-2,554	-4,903	-3,163	-4,903	-4,029
0,120	4,903	-10,752	0,000	-3,945	-4,903	-2,439	-4,903	-2,554	-4,903	-3,163	-4,903	-4,029
0,120	0,000	-2,264	0,000	-0,831	-14,710	-0,513	-4,903	-0,538	-4,903	-0,666	-4,903	-0,848
0,164	-14,710	-14,536	-9,807	-5,255	-4,903	-3,025	-4,903	-2,944	-4,903	-3,462	0,000	-4,276
0,164	-4,903	-14,536	0,000	-5,255	-4,903	-3,025	0,000	-2,944	-4,903	-3,462	-4,903	-4,276
0,164	14,710	-14,536	-4,903	-5,255	-4,903	-3,025	-9,807	-2,944	-4,903	-3,462	-9,807	-4,276
0,164	0,000	-3,060	0,000	-1,106	-4,903	-0,637	-9,807	-0,620	-4,903	-0,729	0,000	-0,900
0,208	-9,807	-18,253	-4,903	-6,557	-4,903	-3,608	0,000	-3,332	-4,903	-3,761	0,000	-4,521
0,208	-4,903	-18,253	-4,903	-6,557	0,000	-3,608	-4,903	-3,332	-4,903	-3,761	-4,903	-4,521
0,208	9,807	-18,253	-4,903	-6,557	-9,807	-3,608	-9,807	-3,332	0,000	-3,761	-4,903	-4,521
0,208	0,000	-3,843	0,000	-1,380	-4,903	-0,760	0,000	-0,702	-4,903	-0,792	-4,903	-0,952

Tabela B.19: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *riser* (Equação 2.12d para f_p). Ensaio A.

v (m/s)	<i>riser</i>											
	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-14,710	-0,215	-4,903	-0,381	-4,903	-0,849	-9,807	-1,497	-4,903	-2,351	-4,903	-3,361
0,000	0,000	-0,215	0,000	-0,381	-4,903	-0,849	-4,903	-1,497	-4,903	-2,351	0,000	-3,361
0,000	4,903	-0,215	0,000	-0,381	-9,807	-0,849	-4,903	-1,497	-9,807	-2,351	-4,903	-3,361
0,000	0,000	-0,045	0,000	-0,080	-4,903	-0,179	-4,903	-0,315	-4,903	-0,495	-4,903	-0,707
0,032	-9,807	-3,016	-4,903	-1,301	-4,903	-1,245	-4,903	-1,752	-4,903	-2,542	-4,903	-3,513
0,032	0,000	-3,016	-4,903	-1,301	-4,903	-1,245	-4,903	-1,752	-4,903	-2,542	0,000	-3,513
0,032	4,903	-3,016	0,000	-1,301	-14,710	-1,245	-9,807	-1,752	-9,807	-2,542	-4,903	-3,513
0,032	-4,903	-0,635	0,000	-0,274	0,000	-0,262	0,000	-0,369	-4,903	-0,535	-4,903	-0,740
0,076	-9,807	-6,875	-4,903	-2,581	-9,807	-1,798	-4,903	-2,109	-9,807	-2,808	-4,903	-3,726
0,076	0,000	-6,875	0,000	-2,581	0,000	-1,798	0,000	-2,109	-4,903	-2,808	-4,903	-3,726
0,076	4,903	-6,875	-4,903	-2,581	-14,710	-1,798	-14,710	-2,109	-4,903	-2,808	-4,903	-3,726
0,076	0,000	-1,447	0,000	-0,543	-4,903	-0,379	0,000	-0,444	0,000	-0,591	0,000	-0,784
0,120	-4,903	-10,662	-14,710	-3,854	-4,903	-2,348	-4,903	-2,464	-9,807	-3,072	-4,903	-3,939
0,120	0,000	-10,662	0,000	-3,854	-4,903	-2,348	-4,903	-2,464	-4,903	-3,072	-4,903	-3,939
0,120	4,903	-10,662	0,000	-3,854	-4,903	-2,348	-4,903	-2,464	-4,903	-3,072	-4,903	-3,939
0,120	0,000	-2,245	0,000	-0,811	-14,710	-0,494	-4,903	-0,519	-4,903	-0,647	-4,903	-0,829
0,164	-14,710	-14,412	-9,807	-5,131	-4,903	-2,901	-4,903	-2,820	-4,903	-3,339	0,000	-4,152
0,164	-4,903	-14,412	0,000	-5,131	-4,903	-2,901	0,000	-2,820	-4,903	-3,339	-4,903	-4,152
0,164	14,710	-14,412	-4,903	-5,131	-4,903	-2,901	-9,807	-2,820	-4,903	-3,339	-9,807	-4,152
0,164	0,000	-3,034	0,000	-1,080	-4,903	-0,611	-9,807	-0,594	-4,903	-0,703	0,000	-0,874
0,208	-9,807	-18,096	-4,903	-6,400	-4,903	-3,451	0,000	-3,175	-4,903	-3,603	0,000	-4,364
0,208	-4,903	-18,096	-4,903	-6,400	0,000	-3,451	-4,903	-3,175	-4,903	-3,603	-4,903	-4,364
0,208	9,807	-18,096	-4,903	-6,400	-9,807	-3,451	-9,807	-3,175	0,000	-3,603	-4,903	-4,364
0,208	0,000	-3,810	0,000	-1,347	-4,903	-0,726	0,000	-0,668	-4,903	-0,759	-4,903	-0,919

Tabela B.20: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *riser* (Equação 2.12e para f_p). Ensaio A.

v (m/s)	<i>riser</i>											
	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ³ s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-14,710	-0,215	-4,903	-0,381	-4,903	-0,849	-9,807	-1,497	-4,903	-2,351	-4,903	-3,361
0,000	0,000	-0,215	0,000	-0,381	-4,903	-0,849	-4,903	-1,497	-4,903	-2,351	0,000	-3,361
0,000	4,903	-0,215	0,000	-0,381	-9,807	-0,849	-4,903	-1,497	-9,807	-2,351	-4,903	-3,361
0,000	0,000	-0,045	0,000	-0,080	-4,903	-0,179	-4,903	-0,315	-4,903	-0,495	-4,903	-0,707
0,032	-9,807	-3,044	-4,903	-1,320	-4,903	-1,259	-4,903	-1,764	-4,903	-2,551	-4,903	-3,522
0,032	0,000	-3,044	-4,903	-1,320	-4,903	-1,259	-4,903	-1,764	-4,903	-2,551	0,000	-3,522
0,032	4,903	-3,044	0,000	-1,320	-14,710	-1,259	-9,807	-1,764	-9,807	-2,551	-4,903	-3,522
0,032	-4,903	-0,641	0,000	-0,278	0,000	-0,265	0,000	-0,371	-4,903	-0,537	-4,903	-0,742
0,076	-9,807	-6,940	-4,903	-2,627	-9,807	-1,831	-4,903	-2,136	-9,807	-2,831	-4,903	-3,748
0,076	0,000	-6,940	0,000	-2,627	0,000	-1,831	0,000	-2,136	-4,903	-2,831	-4,903	-3,748
0,076	4,903	-6,940	-4,903	-2,627	-14,710	-1,831	-14,710	-2,136	-4,903	-2,831	-4,903	-3,748
0,076	0,000	-1,461	0,000	-0,553	-4,903	-0,386	0,000	-0,450	0,000	-0,596	0,000	-0,789
0,120	-4,903	-10,765	-14,710	-3,926	-4,903	-2,401	-4,903	-2,507	-9,807	-3,110	-4,903	-3,972
0,120	0,000	-10,765	0,000	-3,926	-4,903	-2,401	-4,903	-2,507	-4,903	-3,110	-4,903	-3,972
0,120	4,903	-10,765	0,000	-3,926	-4,903	-2,401	-4,903	-2,507	-4,903	-3,110	-4,903	-3,972
0,120	0,000	-2,266	0,000	-0,827	-14,710	-0,505	-4,903	-0,528	-4,903	-0,655	-4,903	-0,836
0,164	-14,710	-14,554	-9,807	-5,229	-4,903	-2,972	-4,903	-2,879	-4,903	-3,390	0,000	-4,197
0,164	-4,903	-14,554	0,000	-5,229	-4,903	-2,972	0,000	-2,879	-4,903	-3,390	-4,903	-4,197
0,164	14,710	-14,554	-4,903	-5,229	-4,903	-2,972	-9,807	-2,879	-4,903	-3,390	-9,807	-4,197
0,164	0,000	-3,064	0,000	-1,101	-4,903	-0,626	-9,807	-0,606	-4,903	-0,714	0,000	-0,884
0,208	-9,807	-18,275	-4,903	-6,524	-4,903	-3,541	0,000	-3,250	-4,903	-3,669	0,000	-4,422
0,208	-4,903	-18,275	-4,903	-6,524	0,000	-3,541	-4,903	-3,250	-4,903	-3,669	-4,903	-4,422
0,208	9,807	-18,275	-4,903	-6,524	-9,807	-3,541	-9,807	-3,250	0,000	-3,669	-4,903	-4,422
0,208	0,000	-3,847	0,000	-1,374	-4,903	-0,746	0,000	-0,684	-4,903	-0,772	-4,903	-0,931

Tabela B.21: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *riser* (Equação 2.12f para f_p). Ensaio A.

<i>riser</i>												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
G_s (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-14,710	-0,215	-4,903	-0,381	-4,903	-0,849	-9,807	-1,497	-4,903	-2,351	-4,903	-3,361
0,000	0,000	-0,215	0,000	-0,381	-4,903	-0,849	-4,903	-1,497	-4,903	-2,351	0,000	-3,361
0,000	4,903	-0,215	0,000	-0,381	-9,807	-0,849	-4,903	-1,497	-9,807	-2,351	-4,903	-3,361
0,000	0,000	-0,045	0,000	-0,080	-4,903	-0,179	-4,903	-0,315	-4,903	-0,495	-4,903	-0,707
0,032	-9,807	-3,005	-4,903	-1,289	-4,903	-1,234	-4,903	-1,741	-4,903	-2,530	-4,903	-3,502
0,032	0,000	-3,005	-4,903	-1,289	-4,903	-1,234	-4,903	-1,741	-4,903	-2,530	0,000	-3,502
0,032	4,903	-3,005	0,000	-1,289	-14,710	-1,234	-9,807	-1,741	-9,807	-2,530	-4,903	-3,502
0,032	-4,903	-0,633	0,000	-0,271	0,000	-0,260	0,000	-0,367	-4,903	-0,533	-4,903	-0,737
0,076	-9,807	-6,848	-4,903	-2,554	-9,807	-1,771	-4,903	-2,082	-9,807	-2,781	-4,903	-3,699
0,076	0,000	-6,848	0,000	-2,554	0,000	-1,771	0,000	-2,082	-4,903	-2,781	-4,903	-3,699
0,076	4,903	-6,848	-4,903	-2,554	-14,710	-1,771	-14,710	-2,082	-4,903	-2,781	-4,903	-3,699
0,076	0,000	-1,442	0,000	-0,538	-4,903	-0,373	0,000	-0,438	0,000	-0,585	0,000	-0,779
0,120	-4,903	-10,619	-14,710	-3,812	-4,903	-2,306	-4,903	-2,421	-9,807	-3,030	-4,903	-3,896
0,120	0,000	-10,619	0,000	-3,812	-4,903	-2,306	-4,903	-2,421	-4,903	-3,030	-4,903	-3,896
0,120	4,903	-10,619	0,000	-3,812	-4,903	-2,306	-4,903	-2,421	-4,903	-3,030	-4,903	-3,896
0,120	0,000	-2,236	0,000	-0,803	-14,710	-0,485	-4,903	-0,510	-4,903	-0,638	-4,903	-0,820
0,164	-14,710	-14,354	-9,807	-5,073	-4,903	-2,843	-4,903	-2,762	-4,903	-3,280	0,000	-4,093
0,164	-4,903	-14,354	0,000	-5,073	-4,903	-2,843	0,000	-2,762	-4,903	-3,280	-4,903	-4,093
0,164	14,710	-14,354	-4,903	-5,073	-4,903	-2,843	-9,807	-2,762	-4,903	-3,280	-9,807	-4,093
0,164	0,000	-3,022	0,000	-1,068	-4,903	-0,598	-9,807	-0,581	-4,903	-0,691	0,000	-0,862
0,208	-9,807	-18,022	-4,903	-6,326	-4,903	-3,377	0,000	-3,101	-4,903	-3,530	0,000	-4,290
0,208	-4,903	-18,022	-4,903	-6,326	0,000	-3,377	-4,903	-3,101	-4,903	-3,530	-4,903	-4,290
0,208	9,807	-18,022	-4,903	-6,326	-9,807	-3,377	-9,807	-3,101	0,000	-3,530	-4,903	-4,290
0,208	0,000	-3,794	0,000	-1,332	-4,903	-0,711	0,000	-0,653	-4,903	-0,743	-4,903	-0,903

Tabela B.22: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *riser* (Equação 2.12g para f_p). Ensaio A.

v (m/s)	<i>riser</i>											
	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-14,710	-0,215	-4,903	-0,381	-4,903	-0,849	-9,807	-1,497	-4,903	-2,351	-4,903	-3,361
0,000	0,000	-0,215	0,000	-0,381	-4,903	-0,849	-4,903	-1,497	-4,903	-2,351	0,000	-3,361
0,000	4,903	-0,215	0,000	-0,381	-9,807	-0,849	-4,903	-1,497	-9,807	-2,351	-4,903	-3,361
0,000	0,000	-0,045	0,000	-0,080	-4,903	-0,179	-4,903	-0,315	-4,903	-0,495	-4,903	-0,707
0,032	-9,807	-3,013	-4,903	-1,303	-4,903	-1,256	-4,903	-1,769	-4,903	-2,563	-4,903	-3,540
0,032	0,000	-3,013	-4,903	-1,303	-4,903	-1,256	-4,903	-1,769	-4,903	-2,563	0,000	-3,540
0,032	4,903	-3,013	0,000	-1,303	-14,710	-1,256	-9,807	-1,769	-9,807	-2,563	-4,903	-3,540
0,032	-4,903	-0,634	0,000	-0,274	0,000	-0,264	0,000	-0,372	-4,903	-0,540	-4,903	-0,745
0,076	-9,807	-6,866	-4,903	-2,588	-9,807	-1,824	-4,903	-2,149	-9,807	-2,860	-4,903	-3,790
0,076	0,000	-6,866	0,000	-2,588	0,000	-1,824	0,000	-2,149	-4,903	-2,860	-4,903	-3,790
0,076	4,903	-6,866	-4,903	-2,588	-14,710	-1,824	-14,710	-2,149	-4,903	-2,860	-4,903	-3,790
0,076	0,000	-1,446	0,000	-0,545	-4,903	-0,384	0,000	-0,452	0,000	-0,602	0,000	-0,798
0,120	-4,903	-10,649	-14,710	-3,865	-4,903	-2,390	-4,903	-2,528	-9,807	-3,155	-4,903	-4,038
0,120	0,000	-10,649	0,000	-3,865	-4,903	-2,390	-4,903	-2,528	-4,903	-3,155	-4,903	-4,038
0,120	4,903	-10,649	0,000	-3,865	-4,903	-2,390	-4,903	-2,528	-4,903	-3,155	-4,903	-4,038
0,120	0,000	-2,242	0,000	-0,814	-14,710	-0,503	-4,903	-0,532	-4,903	-0,664	-4,903	-0,850
0,164	-14,710	-14,394	-9,807	-5,145	-4,903	-2,957	-4,903	-2,908	-4,903	-3,452	0,000	-4,288
0,164	-4,903	-14,394	0,000	-5,145	-4,903	-2,957	0,000	-2,908	-4,903	-3,452	-4,903	-4,288
0,164	14,710	-14,394	-4,903	-5,145	-4,903	-2,957	-9,807	-2,908	-4,903	-3,452	-9,807	-4,288
0,164	0,000	-3,030	0,000	-1,083	-4,903	-0,623	-9,807	-0,612	-4,903	-0,727	0,000	-0,903
0,208	-9,807	-18,074	-4,903	-6,418	-4,903	-3,522	0,000	-3,286	-4,903	-3,747	0,000	-4,537
0,208	-4,903	-18,074	-4,903	-6,418	0,000	-3,522	-4,903	-3,286	-4,903	-3,747	-4,903	-4,537
0,208	9,807	-18,074	-4,903	-6,418	-9,807	-3,522	-9,807	-3,286	0,000	-3,747	-4,903	-4,537
0,208	0,000	-3,805	0,000	-1,351	-4,903	-0,741	0,000	-0,692	-4,903	-0,789	-4,903	-0,955

Tabela B.23: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do ciclone (Equação 2.27 com constantes de Briggs (1946)). Ensaio A.

Ciclone												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-9,807	-22,485	-34,323	-39,973	-68,647	-89,345	-117,680	-157,794	-205,941	-248,180	-353,041	-355,038
0,032	-9,807	-22,432	-29,420	-39,891	-63,744	-89,196	-137,294	-157,566	-205,941	-247,860	-357,945	-354,618
0,076	-14,710	-22,403	-29,420	-39,847	-73,550	-89,115	-142,197	-157,441	-205,941	-247,685	-357,945	-354,388
0,120	-14,710	-22,382	-34,323	-39,815	-68,647	-89,056	-147,101	-157,351	-205,941	-247,558	-362,848	-354,222
0,164	-24,517	-22,365	-29,420	-39,788	-68,647	-89,007	-142,197	-157,276	-215,747	-247,453	-362,848	-354,084
0,208	-19,613	-22,350	-24,517	-39,765	-63,744	-88,964	-142,197	-157,210	-215,747	-247,361	-362,848	-353,964

Tabela B.24: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do ciclone (Equação 2.27 com constantes de Casal (1988)). Ensaio A.

Ciclone												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-9,807	-22,485	-34,323	-39,973	-68,647	-89,345	-117,680	-157,794	-205,941	-248,180	-353,041	-355,038
0,032	-9,807	-15,301	-29,420	-27,549	-63,744	-62,633	-137,294	-111,909	-205,941	-177,646	-357,945	-255,902
0,076	-14,710	-14,690	-29,420	-26,478	-73,550	-60,288	-142,197	-107,830	-205,941	-171,313	-357,945	-246,933
0,120	-14,710	-14,361	-34,323	-25,900	-68,647	-59,019	-147,101	-105,619	-205,941	-167,875	-362,848	-242,059
0,164	-24,517	-14,132	-29,420	-25,497	-68,647	-58,133	-142,197	-104,073	-215,747	-165,470	-362,848	-238,648
0,208	-19,613	-13,956	-24,517	-25,188	-63,744	-57,454	-142,197	-102,888	-215,747	-163,625	-362,848	-236,030

Tabela B.25: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do ciclone (Equação 2.27 com constantes de Comas (1991)). Ensaio A.

Ciclone												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-9,807	-22,485	-34,323	-39,973	-68,647	-89,345	-117,680	-157,794	-205,941	-248,180	-353,041	-355,038
0,032	-9,807	-22,398	-29,420	-39,847	-63,744	-89,132	-137,294	-157,484	-205,941	-247,764	-357,945	-354,509
0,076	-14,710	-22,328	-29,420	-39,744	-73,550	-88,956	-142,197	-157,228	-205,941	-247,420	-357,945	-354,074
0,120	-14,710	-22,270	-34,323	-39,659	-68,647	-88,813	-147,101	-157,019	-205,941	-247,139	-362,848	-353,717
0,164	-24,517	-22,219	-29,420	-39,585	-68,647	-88,685	-142,197	-156,833	-215,747	-246,888	-362,848	-353,399
0,208	-19,613	-22,172	-24,517	-39,516	-63,744	-88,568	-142,197	-156,663	-215,747	-246,660	-362,848	-353,109

Tabela B.26: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do ciclone (Equação 2.27 com constantes de Sheid e Massarani (1992)). Ensaio A.

Ciclone												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-9,807	-22,485	-34,323	-39,973	-68,647	-89,345	-117,680	-157,794	-205,941	-248,180	-353,041	-355,038
0,032	-9,807	-22,484	-29,420	-39,972	-63,744	-89,345	-137,294	-157,794	-205,941	-248,180	-357,945	-355,037
0,076	-14,710	-22,484	-29,420	-39,972	-73,550	-89,344	-142,197	-157,794	-205,941	-248,179	-357,945	-355,036
0,120	-14,710	-22,484	-34,323	-39,972	-68,647	-89,344	-147,101	-157,793	-205,941	-248,179	-362,848	-355,035
0,164	-24,517	-22,484	-29,420	-39,972	-68,647	-89,344	-142,197	-157,793	-215,747	-248,178	-362,848	-355,035
0,208	-19,613	-22,484	-24,517	-39,972	-63,744	-89,344	-142,197	-157,792	-215,747	-248,178	-362,848	-355,034

Tabela B.27: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *downer* (Equação 2.12a para f_p). Ensaio B.

v (m/s)	<i>downer</i>											
	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-4,903	0,000	4,903	0,000	-4,903	0,000	0,000	0,000
0,000	-4,903	0,000	-4,903	0,000	4,903	0,000	-4,903	0,000	0,000	0,000	-4,903	0,000
0,000	4,903	0,000	4,903	0,000	-4,903	0,000	0,000	0,000	-9,807	0,000	-4,903	0,000
0,000	0,000	0,000	-4,903	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,032	0,000	0,113	0,000	0,114	0,000	0,113	-4,903	0,113	-4,903	0,114	9,807	0,114
0,032	0,000	0,245	-9,807	0,246	-9,807	0,246	0,000	0,245	0,000	0,246	-14,710	0,246
0,032	-4,903	0,245	4,903	0,246	0,000	0,246	-4,903	0,245	-9,807	0,246	-4,903	0,246
0,032	4,903	0,226	-4,903	0,227	4,903	0,227	4,903	0,226	-9,807	0,227	9,807	0,227
0,076	-4,903	0,271	4,903	0,272	-4,903	0,272	-4,903	0,271	-4,903	0,272	0,000	0,272
0,076	4,903	0,587	-9,807	0,590	-9,807	0,588	-4,903	0,587	0,000	0,590	-14,710	0,590
0,076	0,000	0,587	0,000	0,590	0,000	0,588	0,000	0,587	-9,807	0,590	-4,903	0,590
0,076	0,000	0,542	-4,903	0,544	0,000	0,543	0,000	0,542	-4,903	0,544	9,807	0,544
0,120	-4,903	0,428	0,000	0,430	-4,903	0,429	-4,903	0,428	4,903	0,430	4,903	0,430
0,120	0,000	0,928	-4,903	0,932	-4,903	0,930	4,903	0,928	0,000	0,932	-4,903	0,932
0,120	4,903	0,928	-4,903	0,932	4,903	0,930	-9,807	0,928	-9,807	0,932	-14,710	0,932
0,120	0,000	0,857	-4,903	0,860	-9,807	0,858	9,807	0,857	-4,903	0,860	9,807	0,860
0,164	0,000	0,586	0,000	0,589	-9,807	0,588	-4,903	0,586	4,903	0,589	0,000	0,589
0,164	-4,903	1,270	-4,903	1,276	-4,903	1,273	-4,903	1,270	-9,807	1,276	-9,807	1,276
0,164	4,903	1,270	0,000	1,276	4,903	1,273	0,000	1,270	-4,903	1,276	-4,903	1,276
0,164	0,000	1,173	-14,710	1,178	0,000	1,175	0,000	1,173	-9,807	1,178	4,903	1,178
0,208	0,000	0,744	4,903	0,747	-4,903	0,745	-14,710	0,744	0,000	0,747	0,000	0,747
0,208	0,000	1,611	-9,807	1,618	-4,903	1,615	0,000	1,611	-4,903	1,618	-4,903	1,618
0,208	0,000	1,611	0,000	1,618	0,000	1,615	0,000	1,611	-4,903	1,618	-14,710	1,618
0,208	0,000	1,488	-9,807	1,494	0,000	1,491	0,000	1,488	-9,807	1,494	9,807	1,494

Tabela B.28: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *downer* (Equação 2.12b para f_p). Ensaio B.

<i>downer</i>												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
G_s (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-4,903	0,000	4,903	0,000	-4,903	0,000	0,000	0,000
0,000	-4,903	0,000	-4,903	0,000	4,903	0,000	-4,903	0,000	0,000	0,000	-4,903	0,000
0,000	4,903	0,000	4,903	0,000	-4,903	0,000	0,000	0,000	-9,807	0,000	-4,903	0,000
0,000	0,000	0,000	-4,903	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,032	0,000	0,109	0,000	0,109	0,000	0,109	-4,903	0,109	-4,903	0,109	9,807	0,109
0,032	0,000	0,236	-9,807	0,237	-9,807	0,237	0,000	0,236	0,000	0,237	-14,710	0,237
0,032	-4,903	0,236	4,903	0,237	0,000	0,237	-4,903	0,236	-9,807	0,237	-4,903	0,237
0,032	4,903	0,218	-4,903	0,219	4,903	0,218	4,903	0,218	-9,807	0,219	9,807	0,219
0,076	-4,903	0,261	4,903	0,262	-4,903	0,262	-4,903	0,261	-4,903	0,262	0,000	0,262
0,076	4,903	0,566	-9,807	0,568	-9,807	0,567	-4,903	0,566	0,000	0,568	-14,710	0,568
0,076	0,000	0,566	0,000	0,568	0,000	0,567	0,000	0,566	-9,807	0,568	-4,903	0,568
0,076	0,000	0,522	-4,903	0,524	0,000	0,523	0,000	0,522	-4,903	0,524	9,807	0,524
0,120	-4,903	0,413	0,000	0,414	-4,903	0,413	-4,903	0,413	4,903	0,414	4,903	0,414
0,120	0,000	0,894	-4,903	0,898	-4,903	0,896	4,903	0,894	0,000	0,898	-4,903	0,898
0,120	4,903	0,894	-4,903	0,898	4,903	0,896	-9,807	0,894	-9,807	0,898	-14,710	0,898
0,120	0,000	0,825	-4,903	0,829	-9,807	0,827	9,807	0,825	-4,903	0,829	9,807	0,829
0,164	0,000	0,565	0,000	0,567	-9,807	0,566	-4,903	0,565	4,903	0,567	0,000	0,567
0,164	-4,903	1,224	-4,903	1,229	-4,903	1,226	-4,903	1,224	-9,807	1,229	-9,807	1,229
0,164	4,903	1,224	0,000	1,229	4,903	1,226	0,000	1,224	-4,903	1,229	-4,903	1,229
0,164	0,000	1,130	-14,710	1,135	0,000	1,132	0,000	1,130	-9,807	1,135	4,903	1,135
0,208	0,000	0,716	4,903	0,720	-4,903	0,718	-14,710	0,716	0,000	0,720	0,000	0,720
0,208	0,000	1,552	-9,807	1,559	-4,903	1,556	0,000	1,552	-4,903	1,559	-4,903	1,559
0,208	0,000	1,552	0,000	1,559	0,000	1,556	0,000	1,552	-4,903	1,559	-14,710	1,559
0,208	0,000	1,433	-9,807	1,439	0,000	1,436	0,000	1,433	-9,807	1,439	9,807	1,439

Tabela B.29: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *downer* (Equação 2.12c para f_p). Ensaio B.

<i>downer</i>												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-4,903	0,000	4,903	0,000	-4,903	0,000	0,000	0,000
0,000	-4,903	0,000	-4,903	0,000	4,903	0,000	-4,903	0,000	0,000	0,000	-4,903	0,000
0,000	4,903	0,000	4,903	0,000	-4,903	0,000	0,000	0,000	-9,807	0,000	-4,903	0,000
0,000	0,000	0,000	-4,903	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,032	0,000	0,106	0,000	0,106	0,000	0,106	-4,903	0,106	-4,903	0,106	9,807	0,106
0,032	0,000	0,229	-9,807	0,230	-9,807	0,230	0,000	0,229	0,000	0,230	-14,710	0,230
0,032	-4,903	0,229	4,903	0,230	0,000	0,230	-4,903	0,229	-9,807	0,230	-4,903	0,230
0,032	4,903	0,212	-4,903	0,213	4,903	0,212	4,903	0,212	-9,807	0,213	9,807	0,213
0,076	-4,903	0,254	4,903	0,255	-4,903	0,254	-4,903	0,254	-4,903	0,255	0,000	0,255
0,076	4,903	0,549	-9,807	0,552	-9,807	0,551	-4,903	0,549	0,000	0,552	-14,710	0,552
0,076	0,000	0,549	0,000	0,552	0,000	0,551	0,000	0,549	-9,807	0,552	-4,903	0,552
0,076	0,000	0,507	-4,903	0,509	0,000	0,508	0,000	0,507	-4,903	0,509	9,807	0,509
0,120	-4,903	0,401	0,000	0,402	-4,903	0,402	-4,903	0,401	4,903	0,402	4,903	0,402
0,120	0,000	0,868	-4,903	0,872	-4,903	0,870	4,903	0,868	0,000	0,872	-4,903	0,872
0,120	4,903	0,868	-4,903	0,872	4,903	0,870	-9,807	0,868	-9,807	0,872	-14,710	0,872
0,120	0,000	0,801	-4,903	0,805	-9,807	0,803	9,807	0,801	-4,903	0,805	9,807	0,805
0,164	0,000	0,548	0,000	0,551	-9,807	0,550	-4,903	0,548	4,903	0,551	0,000	0,551
0,164	-4,903	1,188	-4,903	1,194	-4,903	1,191	-4,903	1,188	-9,807	1,194	-9,807	1,194
0,164	4,903	1,188	0,000	1,194	4,903	1,191	0,000	1,188	-4,903	1,194	-4,903	1,194
0,164	0,000	1,097	-14,710	1,102	0,000	1,099	0,000	1,097	-9,807	1,102	4,903	1,102
0,208	0,000	0,696	4,903	0,699	-4,903	0,697	-14,710	0,696	0,000	0,699	0,000	0,699
0,208	0,000	1,507	-9,807	1,514	-4,903	1,511	0,000	1,507	-4,903	1,514	-4,903	1,514
0,208	0,000	1,507	0,000	1,514	0,000	1,511	0,000	1,507	-4,903	1,514	-14,710	1,514
0,208	0,000	1,391	-9,807	1,398	0,000	1,395	0,000	1,391	-9,807	1,398	9,807	1,398

Tabela B.30: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *downer* (Equação 2.12d para f_p). Ensaio B.

v (m/s)	<i>downer</i>											
	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-4,903	0,000	4,903	0,000	-4,903	0,000	0,000	0,000
0,000	-4,903	0,000	-4,903	0,000	4,903	0,000	-4,903	0,000	0,000	0,000	-4,903	0,000
0,000	4,903	0,000	4,903	0,000	-4,903	0,000	0,000	0,000	-9,807	0,000	-4,903	0,000
0,000	0,000	0,000	-4,903	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,032	0,000	0,111	0,000	0,111	0,000	0,111	-4,903	0,111	-4,903	0,111	9,807	0,111
0,032	0,000	0,240	-9,807	0,241	-9,807	0,241	0,000	0,240	0,000	0,241	-14,710	0,241
0,032	-4,903	0,240	4,903	0,241	0,000	0,241	-4,903	0,240	-9,807	0,241	-4,903	0,241
0,032	4,903	0,222	-4,903	0,223	4,903	0,222	-4,903	0,222	-9,807	0,223	9,807	0,223
0,076	-4,903	0,266	4,903	0,267	-4,903	0,266	-4,903	0,266	-4,903	0,267	0,000	0,267
0,076	4,903	0,575	-9,807	0,578	-9,807	0,577	-4,903	0,575	0,000	0,578	-14,710	0,578
0,076	0,000	0,575	0,000	0,578	0,000	0,577	0,000	0,575	-9,807	0,578	-4,903	0,578
0,076	0,000	0,531	-4,903	0,533	0,000	0,532	0,000	0,531	-4,903	0,533	9,807	0,533
0,120	-4,903	0,420	0,000	0,422	-4,903	0,421	-4,903	0,420	4,903	0,422	4,903	0,422
0,120	0,000	0,909	-4,903	0,913	-4,903	0,911	4,903	0,909	0,000	0,913	-4,903	0,913
0,120	4,903	0,909	-4,903	0,913	4,903	0,911	-9,807	0,909	-9,807	0,913	-14,710	0,913
0,120	0,000	0,839	-4,903	0,843	-9,807	0,841	9,807	0,839	-4,903	0,843	9,807	0,843
0,164	0,000	0,575	0,000	0,577	-9,807	0,576	-4,903	0,575	4,903	0,577	0,000	0,577
0,164	-4,903	1,245	-4,903	1,250	-4,903	1,248	-4,903	1,245	-9,807	1,250	-9,807	1,250
0,164	4,903	1,245	0,000	1,250	4,903	1,248	0,000	1,245	-4,903	1,250	-4,903	1,250
0,164	0,000	1,149	-14,710	1,154	0,000	1,152	0,000	1,149	-9,807	1,154	4,903	1,154
0,208	0,000	0,729	4,903	0,732	-4,903	0,730	-14,710	0,729	0,000	0,732	0,000	0,732
0,208	0,000	1,579	-9,807	1,586	-4,903	1,583	0,000	1,579	-4,903	1,586	-4,903	1,586
0,208	0,000	1,579	0,000	1,586	0,000	1,583	0,000	1,579	-4,903	1,586	-14,710	1,586
0,208	0,000	1,458	-9,807	1,464	0,000	1,461	0,000	1,458	-9,807	1,464	9,807	1,464

Tabela B.31: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *downer* (Equação 2.12e para f_p). Ensaio B.

<i>downer</i>												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-4,903	0,000	4,903	0,000	-4,903	0,000	0,000	0,000
0,000	-4,903	0,000	-4,903	0,000	4,903	0,000	-4,903	0,000	0,000	0,000	-4,903	0,000
0,000	4,903	0,000	4,903	0,000	-4,903	0,000	0,000	0,000	-9,807	0,000	-4,903	0,000
0,000	0,000	0,000	-4,903	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,032	0,000	0,108	0,000	0,108	0,000	0,108	-4,903	0,108	-4,903	0,108	9,807	0,108
0,032	0,000	0,233	-9,807	0,234	-9,807	0,234	0,000	0,233	0,000	0,234	-14,710	0,234
0,032	-4,903	0,233	4,903	0,234	0,000	0,234	-4,903	0,233	-9,807	0,234	-4,903	0,234
0,032	4,903	0,215	-4,903	0,216	4,903	0,216	4,903	0,215	-9,807	0,216	9,807	0,216
0,076	-4,903	0,258	4,903	0,259	-4,903	0,258	-4,903	0,258	-4,903	0,259	0,000	0,259
0,076	4,903	0,558	-9,807	0,561	-9,807	0,559	-4,903	0,558	0,000	0,561	-14,710	0,561
0,076	0,000	0,558	0,000	0,561	0,000	0,559	0,000	0,558	-9,807	0,561	-4,903	0,561
0,076	0,000	0,515	-4,903	0,518	0,000	0,516	0,000	0,515	-4,903	0,518	9,807	0,518
0,120	-4,903	0,407	0,000	0,409	-4,903	0,408	-4,903	0,407	4,903	0,409	4,903	0,409
0,120	0,000	0,882	-4,903	0,886	-4,903	0,884	4,903	0,882	0,000	0,886	-4,903	0,886
0,120	4,903	0,882	-4,903	0,886	4,903	0,884	-9,807	0,882	-9,807	0,886	-14,710	0,886
0,120	0,000	0,814	-4,903	0,818	-9,807	0,816	9,807	0,814	-4,903	0,818	9,807	0,818
0,164	0,000	0,557	0,000	0,560	-9,807	0,559	-4,903	0,557	4,903	0,560	0,000	0,560
0,164	-4,903	1,208	-4,903	1,213	-4,903	1,210	-4,903	1,208	-9,807	1,213	-9,807	1,213
0,164	4,903	1,208	0,000	1,213	4,903	1,210	0,000	1,208	-4,903	1,213	-4,903	1,213
0,164	0,000	1,115	-14,710	1,120	0,000	1,117	0,000	1,115	-9,807	1,120	4,903	1,120
0,208	0,000	0,707	4,903	0,710	-4,903	0,709	-14,710	0,707	0,000	0,710	0,000	0,710
0,208	0,000	1,532	-9,807	1,539	-4,903	1,535	0,000	1,532	-4,903	1,539	-4,903	1,539
0,208	0,000	1,532	0,000	1,539	0,000	1,535	0,000	1,532	-4,903	1,539	-14,710	1,539
0,208	0,000	1,414	-9,807	1,420	0,000	1,417	0,000	1,414	-9,807	1,420	9,807	1,420

Tabela B.32: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *downer* (Equação 2.12f para f_p). Ensaio B.

<i>downer</i>												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-4,903	0,000	4,903	0,000	-4,903	0,000	0,000	0,000
0,000	-4,903	0,000	-4,903	0,000	4,903	0,000	-4,903	0,000	0,000	0,000	-4,903	0,000
0,000	4,903	0,000	4,903	0,000	-4,903	0,000	0,000	0,000	-9,807	0,000	-4,903	0,000
0,000	0,000	0,000	-4,903	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,032	0,000	0,113	0,000	0,114	0,000	0,113	-4,903	0,113	-4,903	0,114	9,807	0,114
0,032	0,000	0,245	-9,807	0,246	-9,807	0,246	0,000	0,245	0,000	0,246	-14,710	0,246
0,032	-4,903	0,245	4,903	0,246	0,000	0,246	-4,903	0,245	-9,807	0,246	-4,903	0,246
0,032	4,903	0,226	-4,903	0,227	4,903	0,227	4,903	0,226	-9,807	0,227	9,807	0,227
0,076	-4,903	0,271	4,903	0,272	-4,903	0,272	-4,903	0,271	-4,903	0,272	0,000	0,272
0,076	4,903	0,588	-9,807	0,590	-9,807	0,589	-4,903	0,588	0,000	0,590	-14,710	0,590
0,076	0,000	0,588	0,000	0,590	0,000	0,589	0,000	0,588	-9,807	0,590	-4,903	0,590
0,076	0,000	0,543	-4,903	0,545	0,000	0,544	0,000	0,543	-4,903	0,545	9,807	0,545
0,120	-4,903	0,429	0,000	0,430	-4,903	0,430	-4,903	0,429	4,903	0,430	4,903	0,430
0,120	0,000	0,929	-4,903	0,933	-4,903	0,931	4,903	0,929	0,000	0,933	-4,903	0,933
0,120	4,903	0,929	-4,903	0,933	4,903	0,931	-9,807	0,929	-9,807	0,933	-14,710	0,933
0,120	0,000	0,857	-4,903	0,861	-9,807	0,859	9,807	0,857	-4,903	0,861	9,807	0,861
0,164	0,000	0,587	0,000	0,589	-9,807	0,588	-4,903	0,587	4,903	0,589	0,000	0,589
0,164	-4,903	1,271	-4,903	1,277	-4,903	1,274	-4,903	1,271	-9,807	1,277	-9,807	1,277
0,164	4,903	1,271	0,000	1,277	4,903	1,274	0,000	1,271	-4,903	1,277	-4,903	1,277
0,164	0,000	1,174	-14,710	1,179	0,000	1,176	0,000	1,174	-9,807	1,179	4,903	1,179
0,208	0,000	0,744	4,903	0,748	-4,903	0,746	-14,710	0,744	0,000	0,748	0,000	0,748
0,208	0,000	1,613	-9,807	1,620	-4,903	1,616	0,000	1,613	-4,903	1,620	-4,903	1,620
0,208	0,000	1,613	0,000	1,620	0,000	1,616	0,000	1,613	-4,903	1,620	-14,710	1,620
0,208	0,000	1,489	-9,807	1,495	0,000	1,492	0,000	1,489	-9,807	1,495	9,807	1,495

Tabela B.33: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *downer* (Equação 2.12g para f_p). Ensaio B.

<i>downer</i>												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-4,903	0,000	4,903	0,000	-4,903	0,000	0,000	0,000
0,000	-4,903	0,000	-4,903	0,000	4,903	0,000	-4,903	0,000	0,000	0,000	-4,903	0,000
0,000	4,903	0,000	4,903	0,000	-4,903	0,000	0,000	0,000	-9,807	0,000	-4,903	0,000
0,000	0,000	0,000	-4,903	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,032	0,000	0,109	0,000	0,110	0,000	0,110	-4,903	0,109	-4,903	0,110	9,807	0,110
0,032	0,000	0,237	-9,807	0,238	-9,807	0,237	0,000	0,237	0,000	0,238	-14,710	0,238
0,032	-4,903	0,237	4,903	0,238	0,000	0,237	-4,903	0,237	-9,807	0,238	-4,903	0,238
0,032	4,903	0,219	-4,903	0,220	4,903	0,219	4,903	0,219	-9,807	0,220	9,807	0,220
0,076	-4,903	0,262	4,903	0,263	-4,903	0,262	-4,903	0,262	-4,903	0,263	0,000	0,263
0,076	4,903	0,567	-9,807	0,570	-9,807	0,569	-4,903	0,567	0,000	0,570	-14,710	0,570
0,076	0,000	0,567	0,000	0,570	0,000	0,569	0,000	0,567	-9,807	0,570	-4,903	0,570
0,076	0,000	0,524	-4,903	0,526	0,000	0,525	0,000	0,524	-4,903	0,526	9,807	0,526
0,120	-4,903	0,414	0,000	0,416	-4,903	0,415	-4,903	0,414	4,903	0,416	4,903	0,416
0,120	0,000	0,897	-4,903	0,901	-4,903	0,899	4,903	0,897	0,000	0,901	-4,903	0,901
0,120	4,903	0,897	-4,903	0,901	4,903	0,899	-9,807	0,897	-9,807	0,901	-14,710	0,901
0,120	0,000	0,828	-4,903	0,832	-9,807	0,830	9,807	0,828	-4,903	0,832	9,807	0,832
0,164	0,000	0,567	0,000	0,569	-9,807	0,568	-4,903	0,567	4,903	0,569	0,000	0,569
0,164	-4,903	1,228	-4,903	1,233	-4,903	1,230	-4,903	1,228	-9,807	1,233	-9,807	1,233
0,164	4,903	1,228	0,000	1,233	4,903	1,230	0,000	1,228	-4,903	1,233	-4,903	1,233
0,164	0,000	1,133	-14,710	1,138	0,000	1,136	0,000	1,133	-9,807	1,138	4,903	1,138
0,208	0,000	0,719	4,903	0,722	-4,903	0,720	-14,710	0,719	0,000	0,722	0,000	0,722
0,208	0,000	1,557	-9,807	1,564	-4,903	1,561	0,000	1,557	-4,903	1,564	-4,903	1,564
0,208	0,000	1,557	0,000	1,564	0,000	1,561	0,000	1,557	-4,903	1,564	-14,710	1,564
0,208	0,000	1,438	-9,807	1,444	0,000	1,441	0,000	1,438	-9,807	1,444	9,807	1,444

Tabela B.34: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em "U" (Equação 2.12a para f_p). Ensaio B.

Curva em "U"												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	39,23	-8,71	63,74	-15,33	78,45	-34,46	137,29	-61,34	240,26	-95,12	318,72	-136,86
0,032	34,32	-7,59	63,74	-14,20	83,36	-33,34	137,29	-60,22	250,07	-93,99	308,91	-135,74
0,076	24,52	-6,02	63,74	-12,63	78,45	-31,77	137,29	-58,66	240,26	-92,43	313,81	-134,17
0,120	24,52	-4,46	58,84	-11,06	73,55	-30,21	137,29	-57,11	245,17	-90,87	323,62	-132,61
0,164	34,32	-2,90	63,74	-9,49	78,45	-28,64	137,29	-55,54	245,17	-89,30	323,62	-131,05
0,208	24,52	-1,34	63,74	-7,92	83,36	-27,08	127,49	-53,98	245,17	-87,73	313,81	-129,49

Tabela B.35: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em "U" (Equação 2.12b para f_p). Ensaio B.

Curva em "U"												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	39,23	-8,71	63,74	-15,33	78,45	-34,46	137,29	-61,34	240,26	-95,12	318,72	-136,86
0,032	34,32	-9,26	63,74	-15,87	83,36	-35,01	137,29	-61,89	250,07	-95,66	308,91	-137,40
0,076	24,52	-10,01	63,74	-16,62	78,45	-35,76	137,29	-62,65	240,26	-96,42	313,81	-138,16
0,120	24,52	-10,77	58,84	-17,37	73,55	-36,51	137,29	-63,41	245,17	-97,17	323,62	-138,92
0,164	34,32	-11,52	63,74	-18,12	78,45	-37,27	137,29	-64,17	245,17	-97,92	323,62	-139,67
0,208	24,52	-12,27	63,74	-18,86	83,36	-38,02	127,49	-64,92	245,17	-98,67	313,81	-140,43

Tabela B.36: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12c para f_p). Ensaio B.

Curva em “U”												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	39,23	-8,71	63,74	-15,33	78,45	-34,46	137,29	-61,34	240,26	-95,12	318,72	-136,86
0,032	34,32	-10,51	63,74	-17,13	83,36	-36,26	137,29	-63,15	250,07	-96,92	308,91	-138,66
0,076	24,52	-13,02	63,74	-19,63	78,45	-38,77	137,29	-65,66	240,26	-99,43	313,81	-141,17
0,120	24,52	-15,53	58,84	-22,12	73,55	-41,27	137,29	-68,17	245,17	-101,93	323,62	-143,68
0,164	34,32	-18,04	63,74	-24,63	78,45	-43,78	137,29	-70,68	245,17	-104,44	323,62	-146,19
0,208	24,52	-20,54	63,74	-27,12	83,36	-46,28	127,49	-73,18	245,17	-106,93	313,81	-148,69

Tabela B.37: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12d para f_p). Ensaio B.

Curva em “U”												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	39,23	-8,71	63,74	-15,33	78,45	-34,46	137,29	-61,34	240,26	-95,12	318,72	-136,86
0,032	34,32	-8,50	63,74	-15,11	83,36	-34,25	137,29	-61,13	250,07	-94,90	308,91	-136,65
0,076	24,52	-8,20	63,74	-14,81	78,45	-33,95	137,29	-60,84	240,26	-94,60	313,81	-136,35
0,120	24,52	-7,91	58,84	-14,50	73,55	-33,65	137,29	-60,55	245,17	-94,31	323,62	-136,06
0,164	34,32	-7,61	63,74	-14,20	78,45	-33,35	137,29	-60,25	245,17	-94,01	323,62	-135,76
0,208	24,52	-7,31	63,74	-13,89	83,36	-33,05	127,49	-59,96	245,17	-93,71	313,81	-135,46

Tabela B.38: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12e para f_p). Ensaio B.

Curva em “U”												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	39,23	-8,71	63,74	-15,33	78,45	-34,46	137,29	-61,34	240,26	-95,12	318,72	-136,86
0,032	34,32	-9,82	63,74	-16,44	83,36	-35,57	137,29	-62,46	250,07	-96,23	308,91	-137,97
0,076	24,52	-11,37	63,74	-17,98	78,45	-37,12	137,29	-64,01	240,26	-97,78	313,81	-139,52
0,120	24,52	-12,91	58,84	-19,52	73,55	-38,66	137,29	-65,55	245,17	-99,32	323,62	-141,07
0,164	34,32	-14,46	63,74	-21,06	78,45	-40,21	137,29	-67,10	245,17	-100,87	323,62	-142,62
0,208	24,52	-16,00	63,74	-22,60	83,36	-41,75	127,49	-68,65	245,17	-102,41	313,81	-144,16

Tabela B.39: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12f para f_p). Ensaio B.

Curva em “U”												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	39,23	-8,71	63,74	-15,33	78,45	-34,46	137,29	-61,34	240,26	-95,12	318,72	-136,86
0,032	34,32	-7,55	63,74	-14,17	83,36	-33,30	137,29	-60,19	250,07	-93,96	308,91	-135,70
0,076	24,52	-5,94	63,74	-12,54	78,45	-31,69	137,29	-58,57	240,26	-92,34	313,81	-134,09
0,120	24,52	-4,33	58,84	-10,93	73,55	-30,07	137,29	-56,97	245,17	-90,73	323,62	-132,48
0,164	34,32	-2,71	63,74	-9,30	78,45	-28,45	137,29	-55,35	245,17	-89,11	323,62	-130,86
0,208	24,52	-1,10	63,74	-7,68	83,36	-26,84	127,49	-53,74	245,17	-87,50	313,81	-129,25

Tabela B.40: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12g para f_p). Ensaio B.

Curva em “U”												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ³ s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	39,23	-8,71	63,74	-15,33	78,45	-34,46	137,29	-61,34	240,26	-95,12	318,72	-136,86
0,032	34,32	-9,11	63,74	-15,72	83,36	-34,86	137,29	-61,75	250,07	-95,51	308,91	-137,26
0,076	24,52	-9,67	63,74	-16,27	78,45	-35,41	137,29	-62,31	240,26	-96,07	313,81	-137,81
0,120	24,52	-10,22	58,84	-16,81	73,55	-35,96	137,29	-62,87	245,17	-96,61	323,62	-138,36
0,164	34,32	-10,78	63,74	-17,36	78,45	-36,52	137,29	-63,42	245,17	-97,16	323,62	-138,91
0,208	24,52	-11,33	63,74	-17,90	83,36	-37,06	127,49	-63,98	245,17	-97,71	313,81	-139,46

Tabela B.41: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.16 para f_p). Ensaio B.

Curva em “U”												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ³ s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	39,23	-8,71	63,74	-15,33	78,45	-34,46	137,29	-61,34	240,26	-95,12	318,72	-136,86
0,032	34,32	-660,05	63,74	-479,86	83,36	-326,80	137,29	-272,00	250,07	-256,90	308,91	-267,99
0,076	24,52	-892,41	63,74	-645,49	78,45	-430,93	137,29	-346,97	240,26	-314,40	313,81	-314,55
0,120	24,52	-1045,26	58,84	-754,40	73,55	-499,36	137,29	-396,20	245,17	-352,14	323,62	-345,08
0,164	34,32	-1164,98	63,74	-839,69	78,45	-552,92	137,29	-434,71	245,17	-381,64	323,62	-368,94
0,208	24,52	-1264,60	63,74	-910,63	83,36	-597,45	127,49	-466,71	245,17	-406,14	313,81	-388,75

Tabela B.42: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *riser* (Equação 2.12a para f_p). Ensaio B.

<i>riser</i>												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,903	-0,213	-4,903	-0,374	-4,903	-0,841	-4,903	-1,497	-4,903	-2,320	-9,807	-3,339
0,000	0,000	-0,213	0,000	-0,374	0,000	-0,841	-4,903	-1,497	-4,903	-2,320	-4,903	-3,339
0,000	-4,903	-0,213	-4,903	-0,374	-4,903	-0,841	0,000	-1,497	4,903	-2,320	4,903	-3,339
0,000	-4,903	-0,045	-4,903	-0,079	-4,903	-0,177	-4,903	-0,315	-19,613	-0,489	-14,710	-0,703
0,032	0,000	-2,884	-9,807	-1,263	-9,807	-1,225	0,000	-1,742	-9,807	-2,501	-9,807	-3,482
0,032	-4,903	-2,884	0,000	-1,263	0,000	-1,225	-9,807	-1,742	0,000	-2,501	0,000	-3,482
0,032	-4,903	-2,884	0,000	-1,263	0,000	-1,225	0,000	-1,742	0,000	-2,501	0,000	-3,482
0,032	0,000	-0,607	-9,807	-0,266	-9,807	-0,258	-4,903	-0,367	-14,710	-0,526	-14,710	-0,733
0,076	0,000	-6,569	0,000	-2,502	0,000	-1,760	0,000	-2,084	0,000	-2,752	-9,807	-3,681
0,076	-4,903	-6,569	-4,903	-2,502	-4,903	-1,760	-4,903	-2,084	-9,807	-2,752	-4,903	-3,681
0,076	-4,903	-6,569	-4,903	-2,502	-4,903	-1,760	-4,903	-2,084	4,903	-2,752	4,903	-3,681
0,076	-4,903	-1,383	-9,807	-0,527	-9,807	-0,371	-4,903	-0,439	-19,613	-0,579	-9,807	-0,775
0,120	4,903	-10,189	4,903	-3,733	4,903	-2,293	-9,807	-2,425	-4,903	-3,003	-4,903	-3,880
0,120	-9,807	-10,189	-9,807	-3,733	-9,807	-2,293	0,000	-2,425	-4,903	-3,003	-4,903	-3,880
0,120	4,903	-10,189	-4,903	-3,733	-4,903	-2,293	-4,903	-2,425	-4,903	-3,003	4,903	-3,880
0,120	-9,807	-2,145	-4,903	-0,786	-4,903	-0,483	-4,903	-0,510	-14,710	-0,632	-9,807	-0,817
0,164	0,000	-13,778	0,000	-4,968	0,000	-2,828	-4,903	-2,767	-9,807	-3,254	0,000	-4,079
0,164	-4,903	-13,778	-4,903	-4,968	-4,903	-2,828	0,000	-2,767	0,000	-3,254	-4,903	-4,079
0,164	0,000	-13,778	0,000	-4,968	0,000	-2,828	0,000	-2,767	-4,903	-3,254	-4,903	-4,079
0,164	-4,903	-2,901	-14,710	-1,046	-14,710	-0,595	-14,710	-0,582	-14,710	-0,685	-9,807	-0,859
0,208	-4,903	-17,307	-4,903	-6,196	-4,903	-3,361	-4,903	-3,107	-4,903	-3,504	-4,903	-4,278
0,208	-4,903	-17,307	-4,903	-6,196	-4,903	-3,361	0,000	-3,107	-9,807	-3,504	-4,903	-4,278
0,208	0,000	-17,307	0,000	-6,196	0,000	-3,361	-4,903	-3,107	0,000	-3,504	-4,903	-4,278
0,208	-4,903	-3,644	-9,807	-1,304	-9,807	-0,708	-4,903	-0,654	-14,710	-0,738	-4,903	-0,901

Tabela B.43: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *riser* (Equação 2.12b para f_p). Ensaio B.

<i>riser</i>												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,903	-0,213	-4,903	-0,374	-4,903	-0,841	-4,903	-1,497	-4,903	-2,320	-9,807	-3,339
0,000	0,000	-0,213	0,000	-0,374	0,000	-0,841	-4,903	-1,497	-4,903	-2,320	-4,903	-3,339
0,000	-4,903	-0,213	-4,903	-0,374	-4,903	-0,841	0,000	-1,497	4,903	-2,320	4,903	-3,339
0,000	-4,903	-0,045	-4,903	-0,079	-4,903	-0,177	-4,903	-0,315	-19,613	-0,489	-14,710	-0,703
0,032	0,000	-2,905	-9,807	-1,283	-9,807	-1,244	0,000	-1,761	-9,807	-2,520	-9,807	-3,500
0,032	-4,903	-2,905	0,000	-1,283	0,000	-1,244	-9,807	-1,761	0,000	-2,520	0,000	-3,500
0,032	-4,903	-2,905	0,000	-1,283	0,000	-1,244	0,000	-1,761	0,000	-2,520	0,000	-3,500
0,032	0,000	-0,611	-9,807	-0,270	-9,807	-0,262	-4,903	-0,371	-14,710	-0,530	-14,710	-0,737
0,076	0,000	-6,617	0,000	-2,550	0,000	-1,807	0,000	-2,130	0,000	-2,798	-9,807	-3,726
0,076	-4,903	-6,617	-4,903	-2,550	-4,903	-1,807	-4,903	-2,130	-9,807	-2,798	-4,903	-3,726
0,076	-4,903	-6,617	-4,903	-2,550	-4,903	-1,807	-4,903	-2,130	4,903	-2,798	4,903	-3,726
0,076	-4,903	-1,393	-9,807	-0,537	-9,807	-0,380	-4,903	-0,448	-19,613	-0,589	-9,807	-0,784
0,120	4,903	-10,265	4,903	-3,809	4,903	-2,368	-9,807	-2,498	-4,903	-3,074	-4,903	-3,950
0,120	-9,807	-10,265	-9,807	-3,809	-9,807	-2,368	0,000	-2,498	-4,903	-3,074	-4,903	-3,950
0,120	4,903	-10,265	-4,903	-3,809	-4,903	-2,368	-4,903	-2,498	-4,903	-3,074	4,903	-3,950
0,120	-9,807	-2,161	-4,903	-0,802	-4,903	-0,498	-4,903	-0,526	-14,710	-0,647	-9,807	-0,832
0,164	0,000	-13,882	0,000	-5,072	0,000	-2,930	-4,903	-2,867	-9,807	-3,352	0,000	-4,176
0,164	-4,903	-13,882	-4,903	-5,072	-4,903	-2,930	0,000	-2,867	0,000	-3,352	-4,903	-4,176
0,164	0,000	-13,882	0,000	-5,072	0,000	-2,930	0,000	-2,867	-4,903	-3,352	-4,903	-4,176
0,164	-4,903	-2,923	-14,710	-1,068	-14,710	-0,617	-14,710	-0,604	-14,710	-0,706	-9,807	-0,879
0,208	-4,903	-17,439	-4,903	-6,327	-4,903	-3,490	-4,903	-3,234	-4,903	-3,629	-4,903	-4,400
0,208	-4,903	-17,439	-4,903	-6,327	-4,903	-3,490	0,000	-3,234	-9,807	-3,629	-4,903	-4,400
0,208	0,000	-17,439	0,000	-6,327	0,000	-3,490	-4,903	-3,234	0,000	-3,629	-4,903	-4,400
0,208	-4,903	-3,671	-9,807	-1,332	-9,807	-0,735	-4,903	-0,681	-14,710	-0,764	-4,903	-0,926

Tabela B.44: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do riser (Equação 2.12c para f_p). Ensaio B.

<i>riser</i>												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,903	-0,213	-4,903	-0,374	-4,903	-0,841	-4,903	-1,497	-4,903	-2,320	-9,807	-3,339
0,000	0,000	-0,213	0,000	-0,374	0,000	-0,841	-4,903	-1,497	-4,903	-2,320	-4,903	-3,339
0,000	-4,903	-0,213	-4,903	-0,374	-4,903	-0,841	0,000	-1,497	4,903	-2,320	4,903	-3,339
0,000	-4,903	-0,045	-4,903	-0,079	-4,903	-0,177	-4,903	-0,315	-19,613	-0,489	-14,710	-0,703
0,032	0,000	-2,919	-9,807	-1,298	-9,807	-1,259	0,000	-1,776	-9,807	-2,535	-9,807	-3,515
0,032	-4,903	-2,919	0,000	-1,298	0,000	-1,259	-9,807	-1,776	0,000	-2,535	0,000	-3,515
0,032	-4,903	-2,919	0,000	-1,298	0,000	-1,259	0,000	-1,776	0,000	-2,535	0,000	-3,515
0,032	0,000	-0,615	-9,807	-0,273	-9,807	-0,265	-4,903	-0,374	-14,710	-0,534	-14,710	-0,740
0,076	0,000	-6,653	0,000	-2,586	0,000	-1,843	0,000	-2,166	0,000	-2,833	-9,807	-3,762
0,076	-4,903	-6,653	-4,903	-2,586	-4,903	-1,843	-4,903	-2,166	-9,807	-2,833	-4,903	-3,762
0,076	-4,903	-6,653	-4,903	-2,586	-4,903	-1,843	-4,903	-2,166	4,903	-2,833	4,903	-3,762
0,076	-4,903	-1,401	-9,807	-0,544	-9,807	-0,388	-4,903	-0,456	-19,613	-0,596	-9,807	-0,792
0,120	4,903	-10,322	4,903	-3,866	4,903	-2,424	-9,807	-2,554	-4,903	-3,131	-4,903	-4,007
0,120	-9,807	-10,322	-9,807	-3,866	-9,807	-2,424	0,000	-2,554	-4,903	-3,131	-4,903	-4,007
0,120	4,903	-10,322	-4,903	-3,866	-4,903	-2,424	-4,903	-2,554	-4,903	-3,131	4,903	-4,007
0,120	-9,807	-2,173	-4,903	-0,814	-4,903	-0,510	-4,903	-0,538	-14,710	-0,659	-9,807	-0,844
0,164	0,000	-13,960	0,000	-5,149	0,000	-3,007	-4,903	-2,944	-9,807	-3,430	0,000	-4,253
0,164	-4,903	-13,960	-4,903	-5,149	-4,903	-3,007	0,000	-2,944	0,000	-3,430	-4,903	-4,253
0,164	0,000	-13,960	0,000	-5,149	0,000	-3,007	0,000	-2,944	-4,903	-3,430	-4,903	-4,253
0,164	-4,903	-2,939	-14,710	-1,084	-14,710	-0,633	-14,710	-0,620	-14,710	-0,722	-9,807	-0,895
0,208	-4,903	-17,538	-4,903	-6,425	-4,903	-3,588	-4,903	-3,332	-4,903	-3,727	-4,903	-4,498
0,208	-4,903	-17,538	-4,903	-6,425	-4,903	-3,588	0,000	-3,332	-9,807	-3,727	-4,903	-4,498
0,208	0,000	-17,538	0,000	-6,425	0,000	-3,588	-4,903	-3,332	0,000	-3,727	-4,903	-4,498
0,208	-4,903	-3,692	-9,807	-1,353	-9,807	-0,755	-4,903	-0,702	-14,710	-0,785	-4,903	-0,947

Tabela B.45: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *riser* (Equação 2.12d para f_p). Ensaio B.

<i>riser</i>												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,903	-0,213	-4,903	-0,374	-4,903	-0,841	-4,903	-1,497	-4,903	-2,320	-9,807	-3,339
0,000	0,000	-0,213	0,000	-0,374	0,000	-0,841	-4,903	-1,497	-4,903	-2,320	-4,903	-3,339
0,000	-4,903	-0,213	-4,903	-0,374	-4,903	-0,841	0,000	-1,497	4,903	-2,320	4,903	-3,339
0,000	-4,903	-0,045	-4,903	-0,079	-4,903	-0,177	-4,903	-0,315	-19,613	-0,489	-14,710	-0,703
0,032	0,000	-2,896	-9,807	-1,274	-9,807	-1,235	0,000	-1,752	-9,807	-2,511	-9,807	-3,491
0,032	-4,903	-2,896	0,000	-1,274	0,000	-1,235	-9,807	-1,752	0,000	-2,511	0,000	-3,491
0,032	-4,903	-2,896	0,000	-1,274	0,000	-1,235	0,000	-1,752	0,000	-2,511	0,000	-3,491
0,032	0,000	-0,610	-9,807	-0,268	-9,807	-0,260	-4,903	-0,369	-14,710	-0,529	-14,710	-0,735
0,076	0,000	-6,595	0,000	-2,528	0,000	-1,786	0,000	-2,109	0,000	-2,776	-9,807	-3,704
0,076	-4,903	-6,595	-4,903	-2,528	-4,903	-1,786	-4,903	-2,109	-9,807	-2,776	-4,903	-3,704
0,076	-4,903	-6,595	-4,903	-2,528	-4,903	-1,786	-4,903	-2,109	4,903	-2,776	4,903	-3,704
0,076	-4,903	-1,389	-9,807	-0,532	-9,807	-0,376	-4,903	-0,444	-19,613	-0,584	-9,807	-0,780
0,120	4,903	-10,231	4,903	-3,775	4,903	-2,334	-9,807	-2,464	-4,903	-3,040	-4,903	-3,916
0,120	-9,807	-10,231	-9,807	-3,775	-9,807	-2,334	0,000	-2,464	-4,903	-3,040	-4,903	-3,916
0,120	4,903	-10,231	-4,903	-3,775	-4,903	-2,334	-4,903	-2,464	-4,903	-3,040	4,903	-3,916
0,120	-9,807	-2,154	-4,903	-0,795	-4,903	-0,491	-4,903	-0,519	-14,710	-0,640	-9,807	-0,824
0,164	0,000	-13,836	0,000	-5,025	0,000	-2,883	-4,903	-2,820	-9,807	-3,306	0,000	-4,129
0,164	-4,903	-13,836	-4,903	-5,025	-4,903	-2,883	0,000	-2,820	0,000	-3,306	-4,903	-4,129
0,164	0,000	-13,836	0,000	-5,025	0,000	-2,883	0,000	-2,820	-4,903	-3,306	-4,903	-4,129
0,164	-4,903	-2,913	-14,710	-1,058	-14,710	-0,607	-14,710	-0,594	-14,710	-0,696	-9,807	-0,869
0,208	-4,903	-17,380	-4,903	-6,268	-4,903	-3,431	-4,903	-3,175	-4,903	-3,570	-4,903	-4,341
0,208	-4,903	-17,380	-4,903	-6,268	-4,903	-3,431	0,000	-3,175	-9,807	-3,570	-4,903	-4,341
0,208	0,000	-17,380	0,000	-6,268	0,000	-3,431	-4,903	-3,175	0,000	-3,570	-4,903	-4,341
0,208	-4,903	-3,659	-9,807	-1,320	-9,807	-0,722	-4,903	-0,668	-14,710	-0,752	-4,903	-0,914

Tabela B.46: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *riser* (Equação 2.12e para f_p). Ensaio B.

v (m/s)	<i>riser</i>											
	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,903	-0,213	-4,903	-0,374	-4,903	-0,841	-4,903	-1,497	-4,903	-2,320	-9,807	-3,339
0,000	0,000	-0,213	0,000	-0,374	0,000	-0,841	-4,903	-1,497	-4,903	-2,320	-4,903	-3,339
0,000	-4,903	-0,213	-4,903	-0,374	-4,903	-0,841	0,000	-1,497	4,903	-2,320	4,903	-3,339
0,000	-4,903	-0,045	-4,903	-0,079	-4,903	-0,177	-4,903	-0,315	-19,613	-0,489	-14,710	-0,703
0,032	0,000	-2,923	-9,807	-1,293	-9,807	-1,249	0,000	-1,764	-9,807	-2,521	-9,807	-3,500
0,032	-4,903	-2,923	0,000	-1,293	0,000	-1,249	-9,807	-1,764	0,000	-2,521	0,000	-3,500
0,032	-4,903	-2,923	0,000	-1,293	0,000	-1,249	0,000	-1,764	0,000	-2,521	0,000	-3,500
0,032	0,000	-0,615	-9,807	-0,272	-9,807	-0,263	-4,903	-0,371	-14,710	-0,531	-14,710	-0,737
0,076	0,000	-6,660	0,000	-2,573	0,000	-1,819	0,000	-2,136	0,000	-2,800	-9,807	-3,725
0,076	-4,903	-6,660	-4,903	-2,573	-4,903	-1,819	-4,903	-2,136	-9,807	-2,800	-4,903	-3,725
0,076	-4,903	-6,660	-4,903	-2,573	-4,903	-1,819	-4,903	-2,136	4,903	-2,800	4,903	-3,725
0,076	-4,903	-1,402	-9,807	-0,542	-9,807	-0,383	-4,903	-0,450	-19,613	-0,589	-9,807	-0,784
0,120	4,903	-10,333	4,903	-3,846	4,903	-2,386	-9,807	-2,507	-4,903	-3,078	-4,903	-3,950
0,120	-9,807	-10,333	-9,807	-3,846	-9,807	-2,386	0,000	-2,507	-4,903	-3,078	-4,903	-3,950
0,120	-4,903	-10,333	-4,903	-3,846	-4,903	-2,386	-4,903	-2,507	-4,903	-3,078	4,903	-3,950
0,120	-9,807	-2,175	-4,903	-0,810	-4,903	-0,502	-4,903	-0,528	-14,710	-0,648	-9,807	-0,832
0,164	0,000	-13,975	0,000	-5,123	0,000	-2,955	-4,903	-2,879	-9,807	-3,357	0,000	-4,175
0,164	-4,903	-13,975	-4,903	-5,123	-4,903	-2,955	0,000	-2,879	0,000	-3,357	-4,903	-4,175
0,164	0,000	-13,975	0,000	-5,123	0,000	-2,955	0,000	-2,879	-4,903	-3,357	-4,903	-4,175
0,164	-4,903	-2,942	-14,710	-1,078	-14,710	-0,622	-14,710	-0,606	-14,710	-0,707	-9,807	-0,879
0,208	-4,903	-17,557	-4,903	-6,391	-4,903	-3,521	-4,903	-3,250	-4,903	-3,635	-4,903	-4,399
0,208	-4,903	-17,557	-4,903	-6,391	-4,903	-3,521	0,000	-3,250	-9,807	-3,635	-4,903	-4,399
0,208	0,000	-17,557	0,000	-6,391	0,000	-3,521	-4,903	-3,250	0,000	-3,635	-4,903	-4,399
0,208	-4,903	-3,696	-9,807	-1,346	-9,807	-0,741	-4,903	-0,684	-14,710	-0,765	-4,903	-0,926

Tabela B.47: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *riser* (Equação 2.12f para f_p). Ensaio B.

v (m/s)	<i>riser</i>											
	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,903	-0,213	-4,903	-0,374	-4,903	-0,841	-4,903	-1,497	-4,903	-2,320	-9,807	-3,339
0,000	0,000	-0,213	0,000	-0,374	0,000	-0,841	-4,903	-1,497	-4,903	-2,320	-4,903	-3,339
0,000	-4,903	-0,213	-4,903	-0,374	-4,903	-0,841	0,000	-1,497	4,903	-2,320	4,903	-3,339
0,000	-4,903	-0,045	-4,903	-0,079	-4,903	-0,177	-4,903	-0,315	-19,613	-0,489	-14,710	-0,703
0,032	0,000	-2,884	-9,807	-1,263	-9,807	-1,224	0,000	-1,741	-9,807	-2,499	-9,807	-3,480
0,032	-4,903	-2,884	0,000	-1,263	0,000	-1,224	-9,807	-1,741	0,000	-2,499	0,000	-3,480
0,032	-4,903	-2,884	0,000	-1,263	0,000	-1,224	0,000	-1,741	0,000	-2,499	0,000	-3,480
0,032	0,000	-0,607	-9,807	-0,266	-9,807	-0,258	-4,903	-0,367	-14,710	-0,526	-14,710	-0,733
0,076	0,000	-6,568	0,000	-2,501	0,000	-1,759	0,000	-2,082	0,000	-2,749	-9,807	-3,677
0,076	-4,903	-6,568	-4,903	-2,501	-4,903	-1,759	-4,903	-2,082	-9,807	-2,749	-4,903	-3,677
0,076	-4,903	-6,568	-4,903	-2,501	-4,903	-1,759	-4,903	-2,082	4,903	-2,749	4,903	-3,677
0,076	-4,903	-1,383	-9,807	-0,527	-9,807	-0,370	-4,903	-0,438	-19,613	-0,579	-9,807	-0,774
0,120	4,903	-10,189	4,903	-3,732	4,903	-2,291	-9,807	-2,421	-4,903	-2,998	-4,903	-3,874
0,120	-9,807	-10,189	-9,807	-3,732	-9,807	-2,291	0,000	-2,421	-4,903	-2,998	-4,903	-3,874
0,120	4,903	-10,189	-4,903	-3,732	-4,903	-2,291	-4,903	-2,421	-4,903	-2,998	4,903	-3,874
0,120	-9,807	-2,145	-4,903	-0,786	-4,903	-0,482	-4,903	-0,510	-14,710	-0,631	-9,807	-0,816
0,164	0,000	-13,778	0,000	-4,967	0,000	-2,825	-4,903	-2,762	-9,807	-3,247	0,000	-4,071
0,164	-4,903	-13,778	-4,903	-4,967	-4,903	-2,825	0,000	-2,762	0,000	-3,247	-4,903	-4,071
0,164	0,000	-13,778	0,000	-4,967	0,000	-2,825	0,000	-2,762	-4,903	-3,247	-4,903	-4,071
0,164	-4,903	-2,901	-14,710	-1,046	-14,710	-0,595	-14,710	-0,581	-14,710	-0,684	-9,807	-0,857
0,208	-4,903	-17,306	-4,903	-6,194	-4,903	-3,357	-4,903	-3,101	-4,903	-3,496	-4,903	-4,267
0,208	-4,903	-17,306	-4,903	-6,194	-4,903	-3,357	0,000	-3,101	-9,807	-3,496	-4,903	-4,267
0,208	0,000	-17,306	0,000	-6,194	0,000	-3,357	-4,903	-3,101	0,000	-3,496	-4,903	-4,267
0,208	-4,903	-3,643	-9,807	-1,304	-9,807	-0,707	-4,903	-0,653	-14,710	-0,736	-4,903	-0,898

Tabela B.48: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *riser* (Equação 2.12g para f_p). Ensaio B.

<i>riser</i>												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
G_s (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,903	-0,213	-4,903	-0,374	-4,903	-0,841	-4,903	-1,497	-4,903	-2,320	-9,807	-3,339
0,000	0,000	-0,213	0,000	-0,374	0,000	-0,841	-4,903	-1,497	-4,903	-2,320	-4,903	-3,339
0,000	-4,903	-0,213	-4,903	-0,374	-4,903	-0,841	0,000	-1,497	4,903	-2,320	4,903	-3,339
0,000	-4,903	-0,045	-4,903	-0,079	-4,903	-0,177	-4,903	-0,315	-19,613	-0,489	-14,710	-0,703
0,032	0,000	-2,892	-9,807	-1,277	-9,807	-1,246	0,000	-1,769	-9,807	-2,533	-9,807	-3,518
0,032	-4,903	-2,892	0,000	-1,277	0,000	-1,246	-9,807	-1,769	0,000	-2,533	0,000	-3,518
0,032	-4,903	-2,892	0,000	-1,277	0,000	-1,246	0,000	-1,769	0,000	-2,533	0,000	-3,518
0,032	0,000	-0,609	-9,807	-0,269	-9,807	-0,262	-4,903	-0,372	-14,710	-0,533	-14,710	-0,741
0,076	0,000	-6,588	0,000	-2,535	0,000	-1,812	0,000	-2,149	0,000	-2,829	-9,807	-3,767
0,076	-4,903	-6,588	-4,903	-2,535	-4,903	-1,812	-4,903	-2,149	-9,807	-2,829	-4,903	-3,767
0,076	-4,903	-6,588	-4,903	-2,535	-4,903	-1,812	-4,903	-2,149	4,903	-2,829	4,903	-3,767
0,076	-4,903	-1,387	-9,807	-0,534	-9,807	-0,381	-4,903	-0,452	-19,613	-0,596	-9,807	-0,793
0,120	4,903	-10,219	4,903	-3,786	4,903	-2,375	-9,807	-2,528	-4,903	-3,123	-4,903	-4,016
0,120	-9,807	-10,219	-9,807	-3,786	-9,807	-2,375	0,000	-2,528	-4,903	-3,123	-4,903	-4,016
0,120	4,903	-10,219	-4,903	-3,786	-4,903	-2,375	-4,903	-2,528	-4,903	-3,123	4,903	-4,016
0,120	-9,807	-2,151	-4,903	-0,797	-4,903	-0,500	-4,903	-0,532	-14,710	-0,658	-9,807	-0,845
0,164	0,000	-13,819	0,000	-5,040	0,000	-2,940	-4,903	-2,908	-9,807	-3,419	0,000	-4,266
0,164	-4,903	-13,819	-4,903	-5,040	-4,903	-2,940	0,000	-2,908	0,000	-3,419	-4,903	-4,266
0,164	0,000	-13,819	0,000	-5,040	0,000	-2,940	0,000	-2,908	-4,903	-3,419	-4,903	-4,266
0,164	-4,903	-2,909	-14,710	-1,061	-14,710	-0,619	-14,710	-0,612	-14,710	-0,720	-9,807	-0,898
0,208	-4,903	-17,359	-4,903	-6,287	-4,903	-3,503	-4,903	-3,286	-4,903	-3,714	-4,903	-4,514
0,208	-4,903	-17,359	-4,903	-6,287	-4,903	-3,503	0,000	-3,286	-9,807	-3,714	-4,903	-4,514
0,208	0,000	-17,359	0,000	-6,287	0,000	-3,503	-4,903	-3,286	0,000	-3,714	-4,903	-4,514
0,208	-4,903	-3,655	-9,807	-1,324	-9,807	-0,737	-4,903	-0,692	-14,710	-0,782	-4,903	-0,950

Tabela B.49: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do ciclone (Equação 2.27 com constantes de Briggs (1946)). Ensaio B.

Ciclone												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-29,420	-22,190	-49,034	-39,192	-107,874	-88,469	-147,101	-157,794	-220,651	-244,948	-382,461	-352,726
0,032	-29,420	-22,137	-49,034	-39,111	-107,874	-88,321	-147,101	-157,566	-230,457	-244,630	-377,558	-352,307
0,076	-29,420	-22,109	-49,034	-39,067	-107,874	-88,240	-152,004	-157,441	-230,457	-244,456	-382,461	-352,079
0,120	-29,420	-22,088	-49,034	-39,036	-107,874	-88,182	-152,004	-157,351	-230,457	-244,330	-367,751	-351,913
0,164	-24,517	-22,071	-44,130	-39,009	-102,970	-88,133	-147,101	-157,276	-220,651	-244,225	-377,558	-351,775
0,208	-29,420	-22,056	-49,034	-38,986	-107,874	-88,091	-147,101	-157,210	-220,651	-244,134	-382,461	-351,655

Tabela B.50: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do ciclone (Equação 2.27 com constantes de Casal (1988)). Ensaio B.

Ciclone												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-29,420	-22,190	-49,034	-39,192	-107,874	-88,469	-147,101	-157,794	-220,651	-244,948	-382,461	-352,726
0,032	-29,420	-15,091	-49,034	-26,987	-107,874	-61,994	-147,101	-111,909	-230,457	-175,242	-377,558	-254,171
0,076	-29,420	-14,488	-49,034	-25,937	-107,874	-59,671	-152,004	-107,830	-230,457	-168,986	-382,461	-245,257
0,120	-29,420	-14,163	-49,034	-25,369	-107,874	-58,413	-152,004	-105,619	-230,457	-165,590	-367,751	-240,413
0,164	-24,517	-13,937	-44,130	-24,974	-102,970	-57,535	-147,101	-104,073	-220,651	-163,215	-377,558	-237,023
0,208	-29,420	-13,764	-49,034	-24,671	-107,874	-56,863	-147,101	-102,888	-220,651	-161,393	-382,461	-234,422

Tabela B.51: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do ciclone (Equação 2.27 com constantes de Comas (1991)). Ensaio B.

Ciclone												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-29,420	-22,190	-49,034	-39,192	-107,874	-88,469	-147,101	-157,794	-220,651	-244,948	-382,461	-352,726
0,032	-29,420	-22,104	-49,034	-39,067	-107,874	-88,257	-147,101	-157,484	-230,457	-244,533	-377,558	-352,199
0,076	-29,420	-22,034	-49,034	-38,964	-107,874	-88,082	-152,004	-157,228	-230,457	-244,191	-382,461	-351,764
0,120	-29,420	-21,976	-49,034	-38,881	-107,874	-87,939	-152,004	-157,019	-230,457	-243,911	-367,751	-351,408
0,164	-24,517	-21,925	-44,130	-38,806	-102,970	-87,811	-147,101	-156,833	-220,651	-243,662	-377,558	-351,091
0,208	-29,420	-21,879	-49,034	-38,738	-107,874	-87,695	-147,101	-156,663	-220,651	-243,434	-382,461	-350,801

Tabela B.52: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do ciclone (Equação 2.27 com constantes de Sheid e Massarani (1992)). Ensaio B.

Ciclone												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-29,420	-22,190	-49,034	-39,192	-107,874	-88,469	-147,101	-157,794	-220,651	-244,948	-382,461	-352,726
0,032	-29,420	-22,190	-49,034	-39,192	-107,874	-88,469	-147,101	-157,794	-230,457	-244,948	-377,558	-352,725
0,076	-29,420	-22,190	-49,034	-39,191	-107,874	-88,469	-152,004	-157,794	-230,457	-244,947	-382,461	-352,724
0,120	-29,420	-22,189	-49,034	-39,191	-107,874	-88,469	-152,004	-157,793	-230,457	-244,947	-367,751	-352,724
0,164	-24,517	-22,189	-44,130	-39,191	-102,970	-88,468	-147,101	-157,793	-220,651	-244,946	-377,558	-352,723
0,208	-29,420	-22,189	-49,034	-39,191	-107,874	-88,468	-147,101	-157,792	-220,651	-244,946	-382,461	-352,723

Tabela B.53: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *downer* (Equação 2.12a para f_p). Ensaio C.

<i>downer</i>								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	19,613	-0,049	-4,903	-0,087	9,807	-0,135	4,903	-0,193
0,000	-19,613	-0,107	-4,903	-0,188	14,710	-0,292	19,613	-0,419
0,000	44,130	-0,107	19,613	-0,188	9,807	-0,292	9,807	-0,419
0,000	-4,903	-0,098	-14,710	-0,174	-4,903	-0,269	-4,903	-0,387
0,032	29,420	0,005	4,903	-0,037	9,807	-0,087	4,903	-0,146
0,032	-29,420	0,012	-4,903	-0,081	4,903	-0,189	14,710	-0,317
0,032	44,130	0,012	14,710	-0,081	14,710	-0,189	9,807	-0,317
0,032	-4,903	0,011	-14,710	-0,075	-9,807	-0,175	-4,903	-0,293
0,076	19,613	0,076	0,000	0,023	9,807	-0,035	4,903	-0,100
0,076	-19,613	0,166	-4,903	0,049	0,000	-0,076	9,807	-0,218
0,076	39,227	0,166	14,710	0,049	9,807	-0,076	9,807	-0,218
0,076	-4,903	0,153	-9,807	0,046	0,000	-0,070	0,000	-0,201
0,120	24,517	0,147	0,000	0,083	9,807	0,017	9,807	-0,055
0,120	-29,420	0,319	-9,807	0,179	4,903	0,036	9,807	-0,119
0,120	39,227	0,319	24,517	0,179	4,903	0,036	0,000	-0,119
0,120	-4,903	0,294	-14,710	0,165	0,000	0,033	0,000	-0,109
0,164	29,420	0,218	0,000	0,143	9,807	0,069	4,903	-0,009
0,164	-24,517	0,473	-14,710	0,309	0,000	0,149	9,807	-0,019
0,164	39,227	0,473	19,613	0,309	0,000	0,149	9,807	-0,019
0,164	-4,903	0,437	-9,807	0,286	9,807	0,138	0,000	-0,018
0,208	29,420	0,289	9,807	0,203	9,807	0,121	14,710	0,037
0,208	-39,227	0,626	-14,710	0,439	0,000	0,262	9,807	0,080
0,208	49,034	0,626	9,807	0,439	4,903	0,262	-4,903	0,080
0,208	-14,710	0,578	0,000	0,405	0,000	0,242	0,000	0,074

Tabela B.54: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *downer* (Equação 2.12b para f_p). Ensaio C.

<i>downer</i>								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	19,613	-0,049	-4,903	-0,087	9,807	-0,135	4,903	-0,193
0,000	-19,613	-0,107	-4,903	-0,188	14,710	-0,292	19,613	-0,419
0,000	44,130	-0,107	19,613	-0,188	9,807	-0,292	9,807	-0,419
0,000	-4,903	-0,098	-14,710	-0,174	-4,903	-0,269	-4,903	-0,387
0,032	29,420	0,001	4,903	-0,041	9,807	-0,091	4,903	-0,150
0,032	-29,420	0,003	-4,903	-0,090	4,903	-0,198	14,710	-0,326
0,032	44,130	0,003	14,710	-0,090	14,710	-0,198	9,807	-0,326
0,032	-4,903	0,003	-14,710	-0,083	-9,807	-0,183	-4,903	-0,301
0,076	19,613	0,067	0,000	0,013	9,807	-0,045	4,903	-0,110
0,076	-19,613	0,145	-4,903	0,028	0,000	-0,097	9,807	-0,238
0,076	39,227	0,145	14,710	0,028	9,807	-0,097	9,807	-0,238
0,076	-4,903	0,133	-9,807	0,026	0,000	-0,089	0,000	-0,220
0,120	24,517	0,132	0,000	0,067	9,807	0,002	9,807	-0,070
0,120	-29,420	0,286	-9,807	0,146	4,903	0,004	9,807	-0,151
0,120	39,227	0,286	24,517	0,146	4,903	0,004	0,000	-0,151
0,120	-4,903	0,264	-14,710	0,135	0,000	0,003	0,000	-0,139
0,164	29,420	0,197	0,000	0,122	9,807	0,048	4,903	-0,029
0,164	-24,517	0,427	-14,710	0,264	0,000	0,105	9,807	-0,063
0,164	39,227	0,427	19,613	0,264	0,000	0,105	9,807	-0,063
0,164	-4,903	0,395	-9,807	0,244	9,807	0,096	0,000	-0,059
0,208	29,420	0,262	9,807	0,176	9,807	0,095	14,710	0,011
0,208	-39,227	0,569	-14,710	0,382	0,000	0,205	9,807	0,024
0,208	49,034	0,569	9,807	0,382	4,903	0,205	-4,903	0,024
0,208	-14,710	0,525	0,000	0,353	0,000	0,189	0,000	0,022

Tabela B.55: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *downer* (Equação 2.12c para f_p). Ensaio C.

<i>downer</i>								
<i>v</i> (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	19,613	-0,049	-4,903	-0,087	9,807	-0,135	4,903	-0,193
0,000	-19,613	-0,107	-4,903	-0,188	14,710	-0,292	19,613	-0,419
0,000	44,130	-0,107	19,613	-0,188	9,807	-0,292	9,807	-0,419
0,000	-4,903	-0,098	-14,710	-0,174	-4,903	-0,269	-4,903	-0,387
0,032	29,420	-0,002	4,903	-0,045	9,807	-0,094	4,903	-0,153
0,032	-29,420	-0,004	-4,903	-0,097	4,903	-0,205	14,710	-0,333
0,032	44,130	-0,004	14,710	-0,097	14,710	-0,205	9,807	-0,333
0,032	-4,903	-0,004	-14,710	-0,089	-9,807	-0,189	-4,903	-0,307
0,076	19,613	0,059	0,000	0,006	9,807	-0,052	4,903	-0,117
0,076	-19,613	0,128	-4,903	0,012	0,000	-0,113	9,807	-0,255
0,076	39,227	0,128	14,710	0,012	9,807	-0,113	9,807	-0,255
0,076	-4,903	0,118	-9,807	0,011	0,000	-0,105	0,000	-0,235
0,120	24,517	0,120	0,000	0,056	9,807	-0,010	9,807	-0,082
0,120	-29,420	0,260	-9,807	0,120	4,903	-0,022	9,807	-0,177
0,120	39,227	0,260	24,517	0,120	4,903	-0,022	0,000	-0,177
0,120	-4,903	0,240	-14,710	0,111	0,000	-0,021	0,000	-0,163
0,164	29,420	0,181	0,000	0,106	9,807	0,032	4,903	-0,046
0,164	-24,517	0,392	-14,710	0,229	0,000	0,069	9,807	-0,099
0,164	39,227	0,392	19,613	0,229	0,000	0,069	9,807	-0,099
0,164	-4,903	0,362	-9,807	0,211	9,807	0,064	0,000	-0,091
0,208	29,420	0,242	9,807	0,156	9,807	0,074	14,710	-0,010
0,208	-39,227	0,524	-14,710	0,337	0,000	0,160	9,807	-0,021
0,208	49,034	0,524	9,807	0,337	4,903	0,160	-4,903	-0,021
0,208	-14,710	0,484	0,000	0,311	0,000	0,148	0,000	-0,019

Tabela B.56: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *downer* (Equação 2.12d para f_p). Ensaio C.

<i>downer</i>								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	19,613	-0,049	-4,903	-0,087	9,807	-0,135	4,903	-0,193
0,000	-19,613	-0,107	-4,903	-0,188	14,710	-0,292	19,613	-0,419
0,000	44,130	-0,107	19,613	-0,188	9,807	-0,292	9,807	-0,419
0,000	-4,903	-0,098	-14,710	-0,174	-4,903	-0,269	-4,903	-0,387
0,032	29,420	0,003	4,903	-0,040	9,807	-0,089	4,903	-0,148
0,032	-29,420	0,007	-4,903	-0,086	4,903	-0,194	14,710	-0,322
0,032	44,130	0,007	14,710	-0,086	14,710	-0,194	9,807	-0,322
0,032	-4,903	0,006	-14,710	-0,079	-9,807	-0,179	-4,903	-0,297
0,076	19,613	0,071	0,000	0,018	9,807	-0,040	4,903	-0,105
0,076	-19,613	0,154	-4,903	0,038	0,000	-0,087	9,807	-0,228
0,076	39,227	0,154	14,710	0,038	9,807	-0,087	9,807	-0,228
0,076	-4,903	0,142	-9,807	0,035	0,000	-0,080	0,000	-0,211
0,120	24,517	0,139	0,000	0,075	9,807	0,009	9,807	-0,063
0,120	-29,420	0,301	-9,807	0,162	4,903	0,019	9,807	-0,135
0,120	39,227	0,301	24,517	0,162	4,903	0,019	0,000	-0,135
0,120	-4,903	0,278	-14,710	0,149	0,000	0,018	0,000	-0,125
0,164	29,420	0,207	0,000	0,132	9,807	0,058	4,903	-0,019
0,164	-24,517	0,449	-14,710	0,286	0,000	0,126	9,807	-0,042
0,164	39,227	0,449	19,613	0,286	0,000	0,126	9,807	-0,042
0,164	-4,903	0,414	-9,807	0,264	9,807	0,116	0,000	-0,039
0,208	29,420	0,275	9,807	0,189	9,807	0,107	14,710	0,023
0,208	-39,227	0,596	-14,710	0,409	0,000	0,232	9,807	0,051
0,208	49,034	0,596	9,807	0,409	4,903	0,232	-4,903	0,051
0,208	-14,710	0,550	0,000	0,377	0,000	0,214	0,000	0,047

Tabela B.57: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *downer* (Equação 2.12e para f_p). Ensaio C.

v (m/s)	<i>downer</i>							
	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	19,613	-0,049	-4,903	-0,087	9,807	-0,135	4,903	-0,193
0,000	-19,613	-0,107	-4,903	-0,188	14,710	-0,292	19,613	-0,419
0,000	44,130	-0,107	19,613	-0,188	9,807	-0,292	9,807	-0,419
0,000	-4,903	-0,098	-14,710	-0,174	-4,903	-0,269	-4,903	-0,387
0,032	29,420	0,001	4,903	-0,042	9,807	-0,092	4,903	-0,150
0,032	-29,420	0,002	-4,903	-0,090	4,903	-0,198	14,710	-0,326
0,032	44,130	0,002	14,710	-0,090	14,710	-0,198	9,807	-0,326
0,032	-4,903	0,002	-14,710	-0,084	-9,807	-0,183	-4,903	-0,301
0,076	19,613	0,065	0,000	0,012	9,807	-0,045	4,903	-0,110
0,076	-19,613	0,142	-4,903	0,027	0,000	-0,098	9,807	-0,239
0,076	39,227	0,142	14,710	0,027	9,807	-0,098	9,807	-0,239
0,076	-4,903	0,131	-9,807	0,025	0,000	-0,090	0,000	-0,220
0,120	24,517	0,130	0,000	0,066	9,807	0,001	9,807	-0,070
0,120	-29,420	0,282	-9,807	0,143	4,903	0,002	9,807	-0,152
0,120	39,227	0,282	24,517	0,143	4,903	0,002	0,000	-0,152
0,120	-4,903	0,260	-14,710	0,132	0,000	0,002	0,000	-0,140
0,164	29,420	0,195	0,000	0,120	9,807	0,047	4,903	-0,030
0,164	-24,517	0,422	-14,710	0,261	0,000	0,102	9,807	-0,064
0,164	39,227	0,422	19,613	0,261	0,000	0,102	9,807	-0,064
0,164	-4,903	0,389	-9,807	0,241	9,807	0,094	0,000	-0,059
0,208	29,420	0,259	9,807	0,174	9,807	0,093	14,710	0,010
0,208	-39,227	0,561	-14,710	0,377	0,000	0,202	9,807	0,023
0,208	49,034	0,561	9,807	0,377	4,903	0,202	-4,903	0,023
0,208	-14,710	0,518	0,000	0,348	0,000	0,187	0,000	0,021

Tabela B.58: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *downer* (Equação 2.12f para f_p). Ensaio C.

<i>downer</i>								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	19,613	-0,049	-4,903	-0,087	9,807	-0,135	4,903	-0,193
0,000	-19,613	-0,107	-4,903	-0,188	14,710	-0,292	19,613	-0,419
0,000	44,130	-0,107	19,613	-0,188	9,807	-0,292	9,807	-0,419
0,000	-4,903	-0,098	-14,710	-0,174	-4,903	-0,269	-4,903	-0,387
0,032	29,420	0,006	4,903	-0,037	9,807	-0,087	4,903	-0,146
0,032	-29,420	0,012	-4,903	-0,081	4,903	-0,189	14,710	-0,317
0,032	44,130	0,012	14,710	-0,081	14,710	-0,189	9,807	-0,317
0,032	-4,903	0,011	-14,710	-0,074	-9,807	-0,174	-4,903	-0,292
0,076	19,613	0,077	0,000	0,023	9,807	-0,035	4,903	-0,100
0,076	-19,613	0,167	-4,903	0,051	0,000	-0,075	9,807	-0,216
0,076	39,227	0,167	14,710	0,051	9,807	-0,075	9,807	-0,216
0,076	-4,903	0,154	-9,807	0,047	0,000	-0,069	0,000	-0,199
0,120	24,517	0,148	0,000	0,084	9,807	0,018	9,807	-0,054
0,120	-29,420	0,321	-9,807	0,181	4,903	0,038	9,807	-0,116
0,120	39,227	0,321	24,517	0,181	4,903	0,038	0,000	-0,116
0,120	-4,903	0,296	-14,710	0,167	0,000	0,036	0,000	-0,107
0,164	29,420	0,219	0,000	0,144	9,807	0,070	4,903	-0,007
0,164	-24,517	0,475	-14,710	0,312	0,000	0,152	9,807	-0,016
0,164	39,227	0,475	19,613	0,312	0,000	0,152	9,807	-0,016
0,164	-4,903	0,439	-9,807	0,288	9,807	0,141	0,000	-0,014
0,208	29,420	0,290	9,807	0,204	9,807	0,123	14,710	0,039
0,208	-39,227	0,629	-14,710	0,443	0,000	0,266	9,807	0,084
0,208	49,034	0,629	9,807	0,443	4,903	0,266	-4,903	0,084
0,208	-14,710	0,581	0,000	0,409	0,000	0,245	0,000	0,078

Tabela B.59: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *downer* (Equação 2.12g para f_p). Ensaio C.

v (m/s)	<i>downer</i>							
	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	19,613	-0,049	-4,903	-0,087	9,807	-0,135	4,903	-0,193
0,000	-19,613	-0,107	-4,903	-0,188	14,710	-0,292	19,613	-0,419
0,000	44,130	-0,107	19,613	-0,188	9,807	-0,292	9,807	-0,419
0,000	-4,903	-0,098	-14,710	-0,174	-4,903	-0,269	-4,903	-0,387
0,032	29,420	0,000	4,903	-0,044	9,807	-0,094	4,903	-0,154
0,032	-29,420	-0,001	-4,903	-0,095	4,903	-0,204	14,710	-0,333
0,032	44,130	-0,001	14,710	-0,095	14,710	-0,204	9,807	-0,333
0,032	-4,903	-0,001	-14,710	-0,087	-9,807	-0,188	-4,903	-0,307
0,076	19,613	0,063	0,000	0,008	9,807	-0,051	4,903	-0,118
0,076	-19,613	0,136	-4,903	0,017	0,000	-0,111	9,807	-0,255
0,076	39,227	0,136	14,710	0,017	9,807	-0,111	9,807	-0,255
0,076	-4,903	0,125	-9,807	0,016	0,000	-0,103	0,000	-0,235
0,120	24,517	0,125	0,000	0,059	9,807	-0,009	9,807	-0,082
0,120	-29,420	0,272	-9,807	0,128	4,903	-0,019	9,807	-0,177
0,120	39,227	0,272	24,517	0,128	4,903	-0,019	0,000	-0,177
0,120	-4,903	0,251	-14,710	0,118	0,000	-0,017	0,000	-0,164
0,164	29,420	0,189	0,000	0,110	9,807	0,034	4,903	-0,046
0,164	-24,517	0,409	-14,710	0,239	0,000	0,074	9,807	-0,099
0,164	39,227	0,409	19,613	0,239	0,000	0,074	9,807	-0,099
0,164	-4,903	0,377	-9,807	0,221	9,807	0,068	0,000	-0,092
0,208	29,420	0,251	9,807	0,162	9,807	0,077	14,710	-0,010
0,208	-39,227	0,545	-14,710	0,350	0,000	0,166	9,807	-0,022
0,208	49,034	0,545	9,807	0,350	4,903	0,166	-4,903	-0,022
0,208	-14,710	0,503	0,000	0,323	0,000	0,153	0,000	-0,020

Tabela B.60: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em "U" (Equação 2.12a para f_p). Ensaio C.

Curva em "U"								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-45,34	-14,71	-80,16	-34,32	-124,25	-39,23	-178,76
0,032	-9,81	-44,16	-14,71	-78,51	-39,23	-121,96	-44,13	-175,64
0,076	-14,71	-43,55	-19,61	-78,03	-39,23	-121,58	-34,32	-175,34
0,120	-9,81	-42,93	-9,81	-77,54	-39,23	-121,20	-39,23	-175,05
0,164	-9,81	-42,32	-29,42	-77,06	-39,23	-120,82	-39,23	-174,75
0,208	-14,71	-41,70	-29,42	-76,58	-29,42	-120,44	-39,23	-174,45

Tabela B.61: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em "U" (Equação 2.12b para f_p). Ensaio C.

Curva em "U"								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-45,34	-14,71	-80,16	-34,32	-124,25	-39,23	-178,76
0,032	-9,81	-45,78	-14,71	-80,12	-39,23	-123,55	-44,13	-177,22
0,076	-14,71	-47,43	-19,61	-81,87	-39,23	-125,39	-34,32	-179,12
0,120	-9,81	-49,07	-9,81	-83,62	-39,23	-127,22	-39,23	-181,02
0,164	-9,81	-50,71	-29,42	-85,38	-39,23	-129,06	-39,23	-182,92
0,208	-14,71	-52,35	-29,42	-87,13	-29,42	-130,89	-39,23	-184,81

Tabela B.62: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12c para f_p). Ensaio C.

Curva em “U”								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ³ s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-45,34	-14,71	-80,16	-34,32	-124,25	-39,23	-178,76
0,032	-9,81	-47,04	-14,71	-81,37	-39,23	-124,81	-44,13	-178,48
0,076	-14,71	-50,44	-19,61	-84,88	-39,23	-128,41	-34,32	-182,13
0,120	-9,81	-53,83	-9,81	-88,38	-39,23	-131,98	-39,23	-185,77
0,164	-9,81	-57,23	-29,42	-91,89	-39,23	-135,58	-39,23	-189,43
0,208	-14,71	-60,61	-29,42	-95,39	-29,42	-139,15	-39,23	-193,07

Tabela B.63: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12d para f_p). Ensaio C.

Curva em “U”								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ³ s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-45,34	-14,71	-80,16	-34,32	-124,25	-39,23	-178,76
0,032	-9,81	-45,03	-14,71	-79,36	-39,23	-122,80	-44,13	-176,46
0,076	-14,71	-45,62	-19,61	-80,06	-39,23	-123,58	-34,32	-177,31
0,120	-9,81	-46,21	-9,81	-80,76	-39,23	-124,36	-39,23	-178,15
0,164	-9,81	-46,80	-29,42	-81,46	-39,23	-125,15	-39,23	-179,00
0,208	-14,71	-47,38	-29,42	-82,16	-29,42	-125,93	-39,23	-179,85

Tabela B.64: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em "U" (Equação 2.12e para f_p). Ensaio C.

Curva em "U"								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-45,34	-14,71	-80,16	-34,32	-124,25	-39,23	-178,76
0,032	-9,81	-45,99	-14,71	-80,25	-39,23	-123,63	-44,13	-177,25
0,076	-14,71	-47,92	-19,61	-82,20	-39,23	-125,58	-34,32	-179,19
0,120	-9,81	-49,83	-9,81	-84,13	-39,23	-127,52	-39,23	-181,13
0,164	-9,81	-51,76	-29,42	-86,08	-39,23	-129,47	-39,23	-183,07
0,208	-14,71	-53,68	-29,42	-88,01	-29,42	-131,41	-39,23	-185,01

Tabela B.65: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em "U" (Equação 2.12f para f_p). Ensaio C.

Curva em "U"								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-45,34	-14,71	-80,16	-34,32	-124,25	-39,23	-178,76
0,032	-9,81	-44,08	-14,71	-78,41	-39,23	-121,85	-44,13	-175,52
0,076	-14,71	-43,35	-19,61	-77,80	-39,23	-121,32	-34,32	-175,05
0,120	-9,81	-42,63	-9,81	-77,18	-39,23	-120,78	-39,23	-174,58
0,164	-9,81	-41,90	-29,42	-76,57	-39,23	-120,25	-39,23	-174,10
0,208	-14,71	-41,17	-29,42	-75,95	-29,42	-119,72	-39,23	-173,64

Tabela B.66: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12g para f_p). Ensaio C.

Curva em “U”								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-45,34	-14,71	-80,16	-34,32	-124,25	-39,23	-178,76
0,032	-9,81	-46,46	-14,71	-81,01	-39,23	-124,65	-44,13	-178,50
0,076	-14,71	-49,04	-19,61	-84,01	-39,23	-128,01	-34,32	-182,20
0,120	-9,81	-51,62	-9,81	-86,99	-39,23	-131,36	-39,23	-185,87
0,164	-9,81	-54,20	-29,42	-89,99	-39,23	-134,72	-39,23	-189,57
0,208	-14,71	-56,77	-29,42	-92,98	-29,42	-138,07	-39,23	-193,25

Tabela B.67: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.16 para f_p). Ensaio C.

Curva em “U”								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-45,34	-14,71	-80,16	-34,32	-124,25	-39,23	-178,76
0,032	-9,81	-3677,90	-14,71	-3507,45	-39,23	-3470,44	-44,13	-3512,26
0,076	-14,71	-4976,44	-19,61	-4732,96	-39,23	-4667,31	-34,32	-4704,98
0,120	-9,81	-5832,04	-9,81	-5540,52	-39,23	-5456,05	-39,23	-5491,03
0,164	-9,81	-6503,26	-29,42	-6174,11	-39,23	-6074,92	-39,23	-6107,81
0,208	-14,71	-7062,61	-29,42	-6702,15	-29,42	-6590,72	-39,23	-6621,89

Tabela B.68: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *riser* (Equação 2.12a para f_p). Ensaio C.

<i>riser</i>								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-44,130	-0,860	-53,937	-1,521	-58,840	-2,359	-73,550	-3,394
0,000	24,517	-0,860	34,323	-1,521	39,227	-2,359	49,034	-3,394
0,000	-29,420	-0,860	-29,420	-1,521	-49,034	-2,359	-49,034	-3,394
0,000	39,227	-0,181	39,227	-0,320	44,130	-0,497	49,034	-0,714
0,032	-58,840	-1,248	-53,937	-1,768	-53,937	-2,539	-63,744	-3,537
0,032	39,227	-1,248	34,323	-1,768	39,227	-2,539	44,130	-3,537
0,032	-44,130	-1,248	-39,227	-1,768	-44,130	-2,539	-39,227	-3,537
0,032	44,130	-0,263	49,034	-0,372	44,130	-0,535	34,323	-0,745
0,076	-58,840	-1,790	-63,744	-2,112	-58,840	-2,792	-63,744	-3,737
0,076	34,323	-1,790	39,227	-2,112	39,227	-2,792	39,227	-3,737
0,076	-34,323	-1,790	-34,323	-2,112	-39,227	-2,792	-39,227	-3,737
0,076	34,323	-0,377	44,130	-0,445	44,130	-0,588	34,323	-0,787
0,120	-58,840	-2,328	-63,744	-2,454	-53,937	-3,043	-53,937	-3,936
0,120	34,323	-2,328	44,130	-2,454	39,227	-3,043	34,323	-3,936
0,120	-34,323	-2,328	-44,130	-2,454	-39,227	-3,043	-29,420	-3,936
0,120	44,130	-0,490	49,034	-0,517	39,227	-0,641	34,323	-0,829
0,164	-49,034	-2,869	-58,840	-2,798	-49,034	-3,295	-49,034	-4,136
0,164	19,613	-2,869	39,227	-2,798	39,227	-3,295	29,420	-4,136
0,164	-14,710	-2,869	-29,420	-2,798	-44,130	-3,295	-24,517	-4,136
0,164	39,227	-0,604	34,323	-0,589	39,227	-0,694	24,517	-0,871
0,208	-44,130	-3,408	-58,840	-3,140	-39,227	-3,547	-58,840	-4,335
0,208	24,517	-3,408	29,420	-3,140	29,420	-3,547	19,613	-4,335
0,208	-34,323	-3,408	-19,613	-3,140	-34,323	-3,547	-14,710	-4,335
0,208	34,323	-0,717	29,420	-0,661	29,420	-0,747	29,420	-0,913

Tabela B.69: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *riser* (Equação 2.12b para f_p). Ensaio C.

v (m/s)	<i>riser</i>							
	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-44,130	-0,860	-53,937	-1,521	-58,840	-2,359	-73,550	-3,394
0,000	24,517	-0,860	34,323	-1,521	39,227	-2,359	49,034	-3,394
0,000	-29,420	-0,860	-29,420	-1,521	-49,034	-2,359	-49,034	-3,394
0,000	39,227	-0,181	39,227	-0,320	44,130	-0,497	49,034	-0,714
0,032	-58,840	-1,268	-53,937	-1,787	-53,937	-2,558	-63,744	-3,556
0,032	39,227	-1,268	34,323	-1,787	39,227	-2,558	44,130	-3,556
0,032	-44,130	-1,268	-39,227	-1,787	-44,130	-2,558	-39,227	-3,556
0,032	44,130	-0,267	49,034	-0,376	44,130	-0,539	34,323	-0,749
0,076	-58,840	-1,837	-63,744	-2,158	-58,840	-2,837	-63,744	-3,782
0,076	34,323	-1,837	39,227	-2,158	39,227	-2,837	39,227	-3,782
0,076	-34,323	-1,837	-34,323	-2,158	-39,227	-2,837	-39,227	-3,782
0,076	34,323	-0,387	44,130	-0,454	44,130	-0,597	34,323	-0,796
0,120	-58,840	-2,403	-63,744	-2,527	-53,937	-3,115	-53,937	-4,007
0,120	34,323	-2,403	44,130	-2,527	39,227	-3,115	34,323	-4,007
0,120	-34,323	-2,403	-44,130	-2,527	-39,227	-3,115	-29,420	-4,007
0,120	44,130	-0,506	49,034	-0,532	39,227	-0,656	34,323	-0,843
0,164	-49,034	-2,971	-58,840	-2,898	-49,034	-3,393	-49,034	-4,232
0,164	19,613	-2,971	39,227	-2,898	39,227	-3,393	29,420	-4,232
0,164	-14,710	-2,971	-29,420	-2,898	-44,130	-3,393	-24,517	-4,232
0,164	39,227	-0,625	34,323	-0,610	39,227	-0,714	24,517	-0,891
0,208	-44,130	-3,536	-58,840	-3,267	-39,227	-3,671	-58,840	-4,457
0,208	24,517	-3,536	29,420	-3,267	29,420	-3,671	19,613	-4,457
0,208	-34,323	-3,536	-19,613	-3,267	-34,323	-3,671	-14,710	-4,457
0,208	34,323	-0,745	29,420	-0,688	29,420	-0,773	29,420	-0,938

Tabela B.70: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *riser* (Equação 2.12c para f_p). Ensaio C.

<i>riser</i>								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
G_s (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-44,130	-0,860	-53,937	-1,521	-58,840	-2,359	-73,550	-3,394
0,000	24,517	-0,860	34,323	-1,521	39,227	-2,359	49,034	-3,394
0,000	-29,420	-0,860	-29,420	-1,521	-49,034	-2,359	-49,034	-3,394
0,000	39,227	-0,181	39,227	-0,320	44,130	-0,497	49,034	-0,714
0,032	-58,840	-1,283	-53,937	-1,802	-53,937	-2,573	-63,744	-3,571
0,032	39,227	-1,283	34,323	-1,802	39,227	-2,573	44,130	-3,571
0,032	-44,130	-1,283	-39,227	-1,802	-44,130	-2,573	-39,227	-3,571
0,032	44,130	-0,270	49,034	-0,379	44,130	-0,542	34,323	-0,752
0,076	-58,840	-1,872	-63,744	-2,194	-58,840	-2,873	-63,744	-3,817
0,076	34,323	-1,872	39,227	-2,194	39,227	-2,873	39,227	-3,817
0,076	-34,323	-1,872	-34,323	-2,194	-39,227	-2,873	-39,227	-3,817
0,076	34,323	-0,394	44,130	-0,462	44,130	-0,605	34,323	-0,804
0,120	-58,840	-2,459	-63,744	-2,583	-53,937	-3,171	-53,937	-4,063
0,120	34,323	-2,459	44,130	-2,583	39,227	-3,171	34,323	-4,063
0,120	-34,323	-2,459	-44,130	-2,583	-39,227	-3,171	-29,420	-4,063
0,120	44,130	-0,518	49,034	-0,544	39,227	-0,668	34,323	-0,855
0,164	-49,034	-3,048	-58,840	-2,975	-49,034	-3,471	-49,034	-4,310
0,164	19,613	-3,048	39,227	-2,975	39,227	-3,471	29,420	-4,310
0,164	-14,710	-3,048	-29,420	-2,975	-44,130	-3,471	-24,517	-4,310
0,164	39,227	-0,642	34,323	-0,626	39,227	-0,731	24,517	-0,907
0,208	-44,130	-3,635	-58,840	-3,365	-39,227	-3,769	-58,840	-4,556
0,208	24,517	-3,635	29,420	-3,365	29,420	-3,769	19,613	-4,556
0,208	-34,323	-3,635	-19,613	-3,365	-34,323	-3,769	-14,710	-4,556
0,208	34,323	-0,765	29,420	-0,708	29,420	-0,793	29,420	-0,959

Tabela B.71: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *riser* (Equação 2.12d para f_p). Ensaio C.

v (m/s)	<i>riser</i>							
	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-44,130	-0,860	-53,937	-1,521	-58,840	-2,359	-73,550	-3,394
0,000	24,517	-0,860	34,323	-1,521	39,227	-2,359	49,034	-3,394
0,000	-29,420	-0,860	-29,420	-1,521	-49,034	-2,359	-49,034	-3,394
0,000	39,227	-0,181	39,227	-0,320	44,130	-0,497	49,034	-0,714
0,032	-58,840	-1,259	-53,937	-1,778	-53,937	-2,549	-63,744	-3,547
0,032	39,227	-1,259	34,323	-1,778	39,227	-2,549	44,130	-3,547
0,032	-44,130	-1,259	-39,227	-1,778	-44,130	-2,549	-39,227	-3,547
0,032	44,130	-0,265	49,034	-0,374	44,130	-0,537	34,323	-0,747
0,076	-58,840	-1,815	-63,744	-2,136	-58,840	-2,816	-63,744	-3,760
0,076	34,323	-1,815	39,227	-2,136	39,227	-2,816	39,227	-3,760
0,076	-34,323	-1,815	-34,323	-2,136	-39,227	-2,816	-39,227	-3,760
0,076	34,323	-0,382	44,130	-0,450	44,130	-0,593	34,323	-0,792
0,120	-58,840	-2,369	-63,744	-2,493	-53,937	-3,081	-53,937	-3,973
0,120	34,323	-2,369	44,130	-2,493	39,227	-3,081	34,323	-3,973
0,120	-34,323	-2,369	-44,130	-2,493	-39,227	-3,081	-29,420	-3,973
0,120	44,130	-0,499	49,034	-0,525	39,227	-0,649	34,323	-0,836
0,164	-49,034	-2,924	-58,840	-2,851	-49,034	-3,347	-49,034	-4,186
0,164	19,613	-2,924	39,227	-2,851	39,227	-3,347	29,420	-4,186
0,164	-14,710	-2,924	-29,420	-2,851	-44,130	-3,347	-24,517	-4,186
0,164	39,227	-0,616	34,323	-0,600	39,227	-0,705	24,517	-0,881
0,208	-44,130	-3,477	-58,840	-3,207	-39,227	-3,612	-58,840	-4,398
0,208	24,517	-3,477	29,420	-3,207	29,420	-3,612	19,613	-4,398
0,208	-34,323	-3,477	-19,613	-3,207	-34,323	-3,612	-14,710	-4,398
0,208	34,323	-0,732	29,420	-0,675	29,420	-0,760	29,420	-0,926

Tabela B.72: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *riser* (Equação 2.12e para f_p). Ensaio C.

<i>riser</i>								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
G_s (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-44,130	-0,860	-53,937	-1,521	-58,840	-2,359	-73,550	-3,394
0,000	24,517	-0,860	34,323	-1,521	39,227	-2,359	49,034	-3,394
0,000	-29,420	-0,860	-29,420	-1,521	-49,034	-2,359	-49,034	-3,394
0,000	39,227	-0,181	39,227	-0,320	44,130	-0,497	49,034	-0,714
0,032	-58,840	-1,273	-53,937	-1,789	-53,937	-2,559	-63,744	-3,555
0,032	39,227	-1,273	34,323	-1,789	39,227	-2,559	44,130	-3,555
0,032	-44,130	-1,273	-39,227	-1,789	-44,130	-2,559	-39,227	-3,555
0,032	44,130	-0,268	49,034	-0,377	44,130	-0,539	34,323	-0,749
0,076	-58,840	-1,848	-63,744	-2,164	-58,840	-2,839	-63,744	-3,781
0,076	34,323	-1,848	39,227	-2,164	39,227	-2,839	39,227	-3,781
0,076	-34,323	-1,848	-34,323	-2,164	-39,227	-2,839	-39,227	-3,781
0,076	34,323	-0,389	44,130	-0,456	44,130	-0,598	34,323	-0,796
0,120	-58,840	-2,421	-63,744	-2,536	-53,937	-3,118	-53,937	-4,006
0,120	34,323	-2,421	44,130	-2,536	39,227	-3,118	34,323	-4,006
0,120	-34,323	-2,421	-44,130	-2,536	-39,227	-3,118	-29,420	-4,006
0,120	44,130	-0,510	49,034	-0,534	39,227	-0,656	34,323	-0,843
0,164	-49,034	-2,996	-58,840	-2,910	-49,034	-3,398	-49,034	-4,232
0,164	19,613	-2,996	39,227	-2,910	39,227	-3,398	29,420	-4,232
0,164	-14,710	-2,996	-29,420	-2,910	-44,130	-3,398	-24,517	-4,232
0,164	39,227	-0,631	34,323	-0,613	39,227	-0,715	24,517	-0,891
0,208	-44,130	-3,568	-58,840	-3,283	-39,227	-3,677	-58,840	-4,457
0,208	24,517	-3,568	29,420	-3,283	29,420	-3,677	19,613	-4,457
0,208	-34,323	-3,568	-19,613	-3,283	-34,323	-3,677	-14,710	-4,457
0,208	34,323	-0,751	29,420	-0,691	29,420	-0,774	29,420	-0,938

Tabela B.73: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *riser* (Equação 2.12f para f_p). Ensaio C.

<i>riser</i>								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-44,130	-0,860	-53,937	-1,521	-58,840	-2,359	-73,550	-3,394
0,000	24,517	-0,860	34,323	-1,521	39,227	-2,359	49,034	-3,394
0,000	-29,420	-0,860	-29,420	-1,521	-49,034	-2,359	-49,034	-3,394
0,000	39,227	-0,181	39,227	-0,320	44,130	-0,497	49,034	-0,714
0,032	-58,840	-1,248	-53,937	-1,767	-53,937	-2,538	-63,744	-3,535
0,032	39,227	-1,248	34,323	-1,767	39,227	-2,538	44,130	-3,535
0,032	-44,130	-1,248	-39,227	-1,767	-44,130	-2,538	-39,227	-3,535
0,032	44,130	-0,263	49,034	-0,372	44,130	-0,534	34,323	-0,744
0,076	-58,840	-1,788	-63,744	-2,109	-58,840	-2,789	-63,744	-3,733
0,076	34,323	-1,788	39,227	-2,109	39,227	-2,789	39,227	-3,733
0,076	-34,323	-1,788	-34,323	-2,109	-39,227	-2,789	-39,227	-3,733
0,076	34,323	-0,376	44,130	-0,444	44,130	-0,587	34,323	-0,786
0,120	-58,840	-2,326	-63,744	-2,450	-53,937	-3,038	-53,937	-3,930
0,120	34,323	-2,326	44,130	-2,450	39,227	-3,038	34,323	-3,930
0,120	-34,323	-2,326	-44,130	-2,450	-39,227	-3,038	-29,420	-3,930
0,120	44,130	-0,490	49,034	-0,516	39,227	-0,640	34,323	-0,827
0,164	-49,034	-2,866	-58,840	-2,793	-49,034	-3,289	-49,034	-4,128
0,164	19,613	-2,866	39,227	-2,793	39,227	-3,289	29,420	-4,128
0,164	-14,710	-2,866	-29,420	-2,793	-44,130	-3,289	-24,517	-4,128
0,164	39,227	-0,603	34,323	-0,588	39,227	-0,692	24,517	-0,869
0,208	-44,130	-3,404	-58,840	-3,134	-39,227	-3,538	-58,840	-4,325
0,208	24,517	-3,404	29,420	-3,134	29,420	-3,538	19,613	-4,325
0,208	-34,323	-3,404	-19,613	-3,134	-34,323	-3,538	-14,710	-4,325
0,208	34,323	-0,717	29,420	-0,660	29,420	-0,745	29,420	-0,910

Tabela B.74: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *riser* (Equação 2.12g para f_p). Ensaio C.

v (m/s)	<i>riser</i>							
	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-44,130	-0,860	-53,937	-1,521	-58,840	-2,359	-73,550	-3,394
0,000	24,517	-0,860	34,323	-1,521	39,227	-2,359	49,034	-3,394
0,000	-29,420	-0,860	-29,420	-1,521	-49,034	-2,359	-49,034	-3,394
0,000	39,227	-0,181	39,227	-0,320	44,130	-0,497	49,034	-0,714
0,032	-58,840	-1,270	-53,937	-1,795	-53,937	-2,571	-63,744	-3,573
0,032	39,227	-1,270	34,323	-1,795	39,227	-2,571	44,130	-3,573
0,032	-44,130	-1,270	-39,227	-1,795	-44,130	-2,571	-39,227	-3,573
0,032	44,130	-0,267	49,034	-0,378	44,130	-0,541	34,323	-0,752
0,076	-58,840	-1,841	-63,744	-2,177	-58,840	-2,868	-63,744	-3,823
0,076	34,323	-1,841	39,227	-2,177	39,227	-2,868	39,227	-3,823
0,076	-34,323	-1,841	-34,323	-2,177	-39,227	-2,868	-39,227	-3,823
0,076	34,323	-0,388	44,130	-0,458	44,130	-0,604	34,323	-0,805
0,120	-58,840	-2,409	-63,744	-2,557	-53,937	-3,164	-53,937	-4,072
0,120	34,323	-2,409	44,130	-2,557	39,227	-3,164	34,323	-4,072
0,120	-34,323	-2,409	-44,130	-2,557	-39,227	-3,164	-29,420	-4,072
0,120	44,130	-0,507	49,034	-0,538	39,227	-0,666	34,323	-0,857
0,164	-49,034	-2,980	-58,840	-2,938	-49,034	-3,460	-49,034	-4,322
0,164	19,613	-2,980	39,227	-2,938	39,227	-3,460	29,420	-4,322
0,164	-14,710	-2,980	-29,420	-2,938	-44,130	-3,460	-24,517	-4,322
0,164	39,227	-0,627	34,323	-0,619	39,227	-0,728	24,517	-0,910
0,208	-44,130	-3,548	-58,840	-3,318	-39,227	-3,756	-58,840	-4,571
0,208	24,517	-3,548	29,420	-3,318	29,420	-3,756	19,613	-4,571
0,208	-34,323	-3,548	-19,613	-3,318	-34,323	-3,756	-14,710	-4,571
0,208	34,323	-0,747	29,420	-0,699	29,420	-0,791	29,420	-0,962

Tabela B.75: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do ciclone (Equação 2.27 com constantes de Briggs (1946)). Ensaio C.

Ciclone								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-102,970	-90,540	-186,327	-160,423	-245,168	-249,002	-431,495	-358,563
0,032	-112,777	-90,390	-181,424	-160,193	-240,264	-248,681	-426,591	-358,141
0,076	-107,874	-90,308	-171,617	-160,067	-240,264	-248,505	-421,688	-357,910
0,120	-107,874	-90,249	-171,617	-159,975	-240,264	-248,378	-411,881	-357,743
0,164	-107,874	-90,199	-166,714	-159,900	-245,168	-248,273	-406,978	-357,604
0,208	-112,777	-90,157	-161,811	-159,834	-235,361	-248,181	-402,075	-357,483

Tabela B.76: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do ciclone (Equação 2.27 com constantes de Casal (1988)). Ensaio C.

Ciclone								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-102,970	-90,540	-186,327	-160,423	-245,168	-249,002	-431,495	-358,563
0,032	-112,777	-63,506	-181,424	-113,850	-240,264	-178,258	-426,591	-258,542
0,076	-107,874	-61,131	-171,617	-109,707	-240,264	-171,905	-421,688	-249,490
0,120	-107,874	-59,846	-171,617	-107,460	-240,264	-168,455	-411,881	-244,570
0,164	-107,874	-58,948	-166,714	-105,890	-245,168	-166,043	-406,978	-241,126
0,208	-112,777	-58,261	-161,811	-104,686	-235,361	-164,193	-402,075	-238,484

Tabela B.77: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do ciclone (Equação 2.27 com constantes de Comas (1991)). Ensaio C.

Ciclone								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-102,970	-90,540	-186,327	-160,423	-245,168	-249,002	-431,495	-358,563
0,032	-112,777	-90,325	-181,424	-160,111	-240,264	-248,585	-426,591	-358,033
0,076	-107,874	-90,149	-171,617	-159,854	-240,264	-248,241	-421,688	-357,596
0,120	-107,874	-90,005	-171,617	-159,644	-240,264	-247,959	-411,881	-357,238
0,164	-107,874	-89,877	-166,714	-159,456	-245,168	-247,708	-406,978	-356,919
0,208	-112,777	-89,759	-161,811	-159,285	-235,361	-247,479	-402,075	-356,628

Tabela B.78: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do ciclone (Equação 2.27 com constantes de Sheid e Massarani (1992)). Ensaio C.

Ciclone								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-102,970	-90,540	-186,327	-160,423	-245,168	-249,002	-431,495	-358,563
0,032	-112,777	-90,539	-181,424	-160,423	-240,264	-249,001	-426,591	-358,562
0,076	-107,874	-90,539	-171,617	-160,422	-240,264	-249,001	-421,688	-358,561
0,120	-107,874	-90,539	-171,617	-160,422	-240,264	-249,000	-411,881	-358,560
0,164	-107,874	-90,538	-166,714	-160,421	-245,168	-249,000	-406,978	-358,560
0,208	-112,777	-90,538	-161,811	-160,421	-235,361	-248,999	-402,075	-358,559

Tabela B.79: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 4.15 para f_p). Ensaio A.

Curva em “U”												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-18,11	-14,71	-32,08	-9,81	-71,43	-4,90	-125,91	-9,81	-197,79	-9,81	-282,74
0,032	0,00	-25,35	-4,90	-38,41	-9,81	-76,89	-4,90	-130,96	-4,90	-202,60	-9,81	-287,38
0,076	-4,90	-33,25	-4,90	-45,35	-4,90	-82,90	-4,90	-136,52	-4,90	-207,92	-14,71	-292,53
0,120	-4,90	-40,39	-9,81	-51,63	0,00	-88,36	-14,71	-141,59	-4,90	-212,76	-14,71	-297,22
0,164	-4,90	-47,16	-14,71	-57,58	4,90	-93,54	-9,81	-146,40	-9,81	-217,37	-9,81	-301,68
0,208	-4,90	-53,62	-9,81	-63,28	0,00	-98,50	-14,71	-151,02	-9,81	-221,78	-9,81	-305,96

Tabela B.80: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 4.15 para f_p). Ensaio B.

Curva em “U”												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	39,23	-8,71	63,74	-15,33	78,45	-34,46	137,29	-61,34	240,26	-95,12	318,72	-136,86
0,032	34,32	-10,16	63,74	-16,41	83,36	-35,27	137,29	-62,05	250,07	-95,77	308,91	-137,49
0,076	24,52	-11,79	63,74	-17,69	78,45	-36,28	137,29	-62,96	240,26	-96,64	313,81	-138,33
0,120	24,52	-13,31	58,84	-18,89	73,55	-37,24	137,29	-63,85	245,17	-97,49	323,62	-139,17
0,164	34,32	-14,76	63,74	-20,05	78,45	-38,20	137,29	-64,74	245,17	-98,34	323,62	-140,00
0,208	24,52	-16,16	63,74	-21,18	83,36	-39,14	127,49	-65,61	245,17	-99,18	313,81	-140,83

Tabela B.81: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 4.15 para f_p). Ensaio C.

Curva em “U”								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-45,34	-14,71	-80,16	-34,32	-124,25	-39,23	-178,76
0,032	-9,81	-49,89	-14,71	-83,50	-39,23	-126,51	-44,13	-179,89
0,076	-14,71	-55,69	-19,61	-88,62	-39,23	-131,24	-34,32	-184,38
0,120	-9,81	-60,94	-9,81	-93,28	-39,23	-135,55	-39,23	-188,48
0,164	-9,81	-65,94	-29,42	-97,71	-39,23	-139,66	-39,23	-192,38
0,208	-14,71	-70,71	-29,42	-101,96	-29,42	-143,60	-39,23	-196,14

Apêndice C: Valores Calculados – comprimento da região de aceleração

Tabela C.1: Resultados calculados do comprimento da região de aceleração para a seção do *downer*. Ensaio A.

<i>downer</i>						
v (m/s)	0,394	0,526	0,789	1,052	1,315	1,578
Gs (kg/m ² s)	L _{ac} (m)	L _{ac} (m)	L _{ac} (m)	L _{ac} (m)	L _{ac} (m)	L _{ac} (m)
0,000	-	-	-	-	-	-
0,032	0,0771	0,0917	0,1122	0,1295	0,1450	0,1604
0,076	0,0770	0,0917	0,1122	0,1294	0,1450	0,1604
0,120	0,0770	0,0917	0,1122	0,1294	0,1450	0,1604
0,164	0,0770	0,0917	0,1121	0,1294	0,1450	0,1603
0,208	0,0770	0,0917	0,1121	0,1294	0,1450	0,1603

Tabela C.2: Resultados calculados do comprimento da região de aceleração para a seção do *riser*. Ensaio A.

<i>riser</i>						
v (m/s)	0,394	0,526	0,789	1,052	1,315	1,578
Gs (kg/m ² s)	L _{ac} (m)	L _{ac} (m)	L _{ac} (m)	L _{ac} (m)	L _{ac} (m)	L _{ac} (m)
0,000	-	-	-	-	-	-
0,032	0,0922	0,0725	0,0809	0,0931	0,1051	0,1143
0,076	0,0914	0,0724	0,0808	0,0931	0,1051	0,1142
0,120	0,0907	0,0723	0,0808	0,0931	0,1051	0,1142
0,164	0,0900	0,0722	0,0808	0,0931	0,1051	0,1142
0,208	0,0893	0,0721	0,0808	0,0931	0,1051	0,1142

Tabela C.3: Resultados calculados do comprimento da região de aceleração para a seção do *downer*. Ensaio B.

<i>downer</i>						
v (m/s)	0,394	0,526	0,789	1,052	1,315	1,578
Gs (kg/m ² /s)	L _{ac} (m)	L _{ac} (m)	L _{ac} (m)	L _{ac} (m)	L _{ac} (m)	L _{ac} (m)
0,000	-	-	-	-	-	-
0,032	0,0942	0,0930	0,0936	0,0942	0,0930	0,0930
0,076	0,0941	0,0929	0,0935	0,0941	0,0929	0,0929
0,120	0,0941	0,0928	0,0935	0,0941	0,0928	0,0928
0,164	0,0940	0,0928	0,0934	0,0940	0,0928	0,0928
0,208	0,0939	0,0927	0,0933	0,0939	0,0927	0,0927

Tabela C.4: Resultados calculados do comprimento da região de aceleração para a seção do *riser*. Ensaio B.

<i>riser</i>						
v (m/s)	0,394	0,526	0,789	1,052	1,315	1,578
Gs (kg/m ² /s)	L _{ac} (m)	L _{ac} (m)	L _{ac} (m)	L _{ac} (m)	L _{ac} (m)	L _{ac} (m)
0,000	-	-	-	-	-	-
0,032	0,0570	0,0212	-0,0260	-0,0982	-0,2081	-0,3931
0,076	0,0564	0,0212	-0,0260	-0,0983	-0,2082	-0,3929
0,120	0,0558	0,0211	-0,0260	-0,0983	-0,2082	-0,3928
0,164	0,0552	0,0210	-0,0260	-0,0983	-0,2082	-0,3926
0,208	0,0546	0,0210	-0,0260	-0,0983	-0,2083	-0,3925

Tabela C.5: Resultados calculados do comprimento da região de aceleração para a seção do *downer*. Ensaio C.

<i>downer</i>				
v (m/s)	0,789	1,052	1,315	1,578
Gs (kg/m ³ s)	L _{ac} (m)	L _{ac} (m)	L _{ac} (m)	L _{ac} (m)
0,000	-	-	-	-
0,032	0,0776	0,0917	0,1025	0,1122
0,076	0,0776	0,0917	0,1025	0,1121
0,120	0,0776	0,0917	0,1025	0,1121
0,164	0,0776	0,0917	0,1025	0,1121
0,208	0,0776	0,0917	0,1025	0,1121

Tabela C.6: Resultados calculados do comprimento da região de aceleração para a seção do *riser*. Ensaio C.

<i>riser</i>				
v (m/s)	0,789	1,052	1,315	1,578
Gs (kg/m ³ s)	L _{ac} (m)	L _{ac} (m)	L _{ac} (m)	L _{ac} (m)
0,000	-	-	-	-
0,032	0,0355	0,0210	0,0146	0,0069
0,076	0,0355	0,0210	0,0146	0,0069
0,120	0,0355	0,0210	0,0146	0,0069
0,164	0,0355	0,0210	0,0145	0,0069
0,208	0,0354	0,0210	0,0145	0,0069

Apêndice D: Valores Experimentais e Calculados – diferença de pressão

Tabela D.1: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *downer* na região de aceleração ΔP_1 (Equação 2.12c para f_p).

Ensaio A.

<i>downer</i>												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,903	-	-4,903	-	-4,903	-	-4,903	-	0,000	-	0,000	-
0,032	0,000	-0,310	-4,903	-0,664	-4,903	-1,589	-9,807	-2,800	0,000	-4,356	-4,903	-6,171
0,076	-4,903	-0,216	-4,903	-0,658	-9,807	-1,729	-4,903	-3,043	-4,903	-4,680	0,000	-6,555
0,120	0,000	-0,122	0,000	-0,652	-4,903	-1,868	-4,903	-3,285	-4,903	-5,002	0,000	-6,937
0,164	-4,903	-0,028	-4,903	-0,646	-4,903	-2,008	-4,903	-3,529	-4,903	-5,326	0,000	-7,321
0,208	-4,903	0,066	-9,807	-0,640	-4,903	-2,147	-9,807	-3,771	-4,903	-5,648	0,000	-7,703

Tabela D.2: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *riser* na região de aceleração ΔP_6 (Equação 2.12g para f_p).

Ensaio A.

<i>riser</i>												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-14,710	-	-4,903	-	-4,903	-	-9,807	-	-4,903	-	-4,903	-
0,032	-9,807	-4,483	-4,903	-0,815	-4,903	1,032	-4,903	2,492	-4,903	4,164	-4,903	6,059
0,076	-9,807	-11,178	-4,903	-2,882	-9,807	0,394	-4,903	2,305	-9,807	4,219	-4,903	6,288
0,120	-4,903	-17,746	-14,710	-4,936	-4,903	-0,240	-4,903	2,120	-9,807	4,274	-4,903	6,515
0,164	-14,710	-24,249	-9,807	-6,995	-4,903	-0,877	-4,903	1,934	-4,903	4,330	0,000	6,744
0,208	-9,807	-30,634	-4,903	-9,040	-4,903	-1,510	0,000	1,749	-4,903	4,386	0,000	6,972

Tabela D.3: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *downer* na região de aceleração ΔP_1 (Equação 2.12c para f_p).

Ensaio B.

<i>downer</i>												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ³ s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	0,000	-	0,000	-	-4,903	-	-4,903	-	-4,903	-	0,000	-
0,032	0,000	0,772	0,000	-0,775	0,000	0,773	-4,903	0,772	-4,903	0,775	9,807	0,775
0,076	-4,903	1,849	-4,903	1,857	-4,903	1,853	-4,903	1,849	-4,903	1,857	0,000	1,857
0,120	-4,903	2,923	0,000	2,934	-4,903	2,928	-4,903	2,923	-4,903	2,934	-4,903	2,934
0,164	0,000	4,001	0,000	4,017	-9,807	4,009	-4,903	4,001	-4,903	4,017	0,000	4,017
0,208	0,000	5,075	-4,903	5,095	-4,903	5,085	-14,710	5,075	0,000	5,095	0,000	5,095

Tabela D.4: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *riser* na região de aceleração ΔP_6 (Equação 2.12g para f_p).

Ensaio B.

<i>riser</i>												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ³ s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,903	-	-4,903	-	-4,903	-	-4,903	-	-4,903	-	-9,807	-
0,032	0,000	-4,266	-9,807	-0,583	-9,807	0,279	0,000	2,013	-9,807	3,665	-9,807	5,575
0,076	0,000	-10,660	0,000	-2,305	0,000	-1,388	0,000	1,159	0,000	3,099	-9,807	5,181
0,120	-4,903	-16,940	-4,903	-4,014	-4,903	-3,046	-9,807	0,309	-4,903	2,536	-4,903	4,788
0,164	0,000	-23,163	0,000	-5,723	0,000	-4,711	-4,903	-0,545	-9,807	1,970	0,000	4,394
0,208	-4,903	-29,279	-4,903	-7,417	-4,903	-6,366	-4,903	-1,394	-4,903	1,406	-4,903	4,001

Tabela D.5: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *downer* na região de aceleração ΔP_1 (Equação 2.12c para f_p).

Ensaio C.

<i>downer</i>								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	19,613	-	-4,903	-	9,807	-	4,903	-
0,032	29,420	-0,312	4,903	-0,667	9,807	-1,092	4,903	-1,595
0,076	19,613	-0,217	0,000	-0,662	9,807	-1,166	4,903	-1,735
0,120	24,517	-0,122	0,000	-0,656	9,807	-1,239	9,807	-1,875
0,164	29,420	-0,027	0,000	-0,651	9,807	-1,313	4,903	-2,015
0,208	29,420	0,068	9,807	-0,646	9,807	-1,386	14,710	-2,155

Tabela D.6: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção do *riser* na região de aceleração ΔP_6 (Equação 2.12g para f_p).

Ensaio C.

<i>riser</i>								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-44,130	-	-53,937	-	-58,840	-	-73,550	-
0,032	-58,840	1,274	-53,937	3,371	-53,937	6,016	-63,744	11,461
0,076	-58,840	0,946	-63,744	4,352	-58,840	8,640	-63,744	19,163
0,120	-58,840	0,622	-63,744	5,331	-53,937	11,257	-53,937	26,851
0,164	-49,034	0,297	-58,840	6,318	-49,034	13,890	-49,034	34,592
0,208	-44,130	-0,024	-58,840	7,302	-39,227	16,516	-58,840	42,321

Apêndice E: Valores Experimentais e Calculados – diferença de pressão

Tabela E.1: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12a para f_p). Ensaio A.

Curva em “U”												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-6,04	-14,71	-10,69	-9,81	-23,81	-4,90	-41,97	-9,81	-65,93	-9,81	-94,25
0,032	0,00	-5,89	-4,90	-10,58	-9,81	-23,74	-4,90	-41,93	-4,90	-65,91	-9,81	-94,25
0,076	-4,90	-5,68	-4,90	-10,41	-4,90	-23,64	-4,90	-41,87	-4,90	-65,89	-14,71	-94,26
0,120	-4,90	-5,48	-9,81	-10,25	0,00	-23,54	-14,71	-41,82	-4,90	-65,87	-14,71	-94,26
0,164	-4,90	-5,27	-14,71	-10,09	4,90	-23,44	-9,81	-41,76	-9,81	-65,85	-9,81	-94,27
0,208	-4,90	-5,07	-9,81	-9,93	0,00	-23,34	-14,71	-41,71	-9,81	-65,83	-9,81	-94,28

Tabela E.2: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12b para f_p). Ensaio A.

Curva em “U”												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-6,04	-14,71	-10,69	-9,81	-23,81	-4,90	-41,97	-9,81	-65,93	-9,81	-94,25
0,032	0,00	-6,43	-4,90	-11,11	-9,81	-24,26	-4,90	-42,45	-4,90	-66,42	-9,81	-94,75
0,076	-4,90	-6,98	-4,90	-11,70	-4,90	-24,90	-4,90	-43,11	-4,90	-67,10	-14,71	-95,45
0,120	-4,90	-7,52	-9,81	-12,28	0,00	-25,53	-14,71	-43,77	-4,90	-67,79	-14,71	-96,14
0,164	-4,90	-8,07	-14,71	-12,86	4,90	-26,16	-9,81	-44,43	-9,81	-68,47	-9,81	-96,84
0,208	-4,90	-8,62	-9,81	-13,45	0,00	-26,79	-14,71	-45,10	-9,81	-69,15	-9,81	-97,54

Tabela E.3: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12c para f_p). Ensaio A.

Curva em “U”												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-6,04	-14,71	-10,69	-9,81	-23,81	-4,90	-41,97	-9,81	-65,93	-9,81	-94,25
0,032	0,00	-6,85	-4,90	-11,53	-9,81	-24,68	-4,90	-42,87	-4,90	-66,84	-9,81	-95,17
0,076	-4,90	-7,98	-4,90	-12,70	-4,90	-25,90	-4,90	-44,11	-4,90	-68,11	-14,71	-96,45
0,120	-4,90	-9,11	-9,81	-13,87	0,00	-27,11	-14,71	-45,36	-4,90	-69,37	-14,71	-97,73
0,164	-4,90	-10,24	-14,71	-15,04	4,90	-28,33	-9,81	-46,61	-9,81	-70,64	-9,81	-99,01
0,208	-4,90	-11,37	-9,81	-16,20	0,00	-29,55	-14,71	-47,85	-9,81	-71,91	-9,81	-100,29

Tabela E.4: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12d para f_p). Ensaio A.

Curva em “U”												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-6,04	-14,71	-10,69	-9,81	-23,81	-4,90	-41,97	-9,81	-65,93	-9,81	-94,25
0,032	0,00	-6,18	-4,90	-10,86	-9,81	-24,01	-4,90	-42,19	-4,90	-66,17	-9,81	-94,50
0,076	-4,90	-6,37	-4,90	-11,09	-4,90	-24,29	-4,90	-42,51	-4,90	-66,50	-14,71	-94,84
0,120	-4,90	-6,57	-9,81	-11,33	0,00	-24,57	-14,71	-42,82	-4,90	-66,83	-14,71	-95,19
0,164	-4,90	-6,76	-14,71	-11,56	4,90	-24,86	-9,81	-43,13	-9,81	-67,16	-9,81	-95,54
0,208	-4,90	-6,96	-9,81	-11,79	0,00	-25,14	-14,71	-43,44	-9,81	-67,50	-9,81	-95,88

Tabela E.5: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12e para f_p). Ensaio A.

Curva em “U”												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
G_s (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-6,04	-14,71	-10,69	-9,81	-23,81	-4,90	-41,97	-9,81	-65,93	-9,81	-94,25
0,032	0,00	-6,50	-4,90	-11,16	-9,81	-24,27	-4,90	-42,43	-4,90	-66,38	-9,81	-94,69
0,076	-4,90	-7,14	-4,90	-11,80	-4,90	-24,92	-4,90	-43,07	-4,90	-67,02	-14,71	-95,32
0,120	-4,90	-7,78	-9,81	-12,45	0,00	-25,57	-14,71	-43,71	-4,90	-67,65	-14,71	-95,94
0,164	-4,90	-8,42	-14,71	-13,10	4,90	-26,21	-9,81	-44,35	-9,81	-68,28	-9,81	-96,56
0,208	-4,90	-9,06	-9,81	-13,74	0,00	-26,86	-14,71	-44,99	-9,81	-68,91	-9,81	-97,19

Tabela E.6: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12f para f_p). Ensaio A.

Curva em “U”												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
G_s (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-6,04	-14,71	-10,69	-9,81	-23,81	-4,90	-41,97	-9,81	-65,93	-9,81	-94,25
0,032	0,00	-5,86	-4,90	-10,54	-9,81	-23,70	-4,90	-41,88	-4,90	-65,85	-9,81	-94,18
0,076	-4,90	-5,62	-4,90	-10,34	-4,90	-23,54	-4,90	-41,75	-4,90	-65,75	-14,71	-94,09
0,120	-4,90	-5,38	-9,81	-10,13	0,00	-23,38	-14,71	-41,62	-4,90	-65,64	-14,71	-94,00
0,164	-4,90	-5,13	-14,71	-9,93	4,90	-23,22	-9,81	-41,50	-9,81	-65,53	-9,81	-93,90
0,208	-4,90	-4,89	-9,81	-9,72	0,00	-23,07	-14,71	-41,37	-9,81	-65,43	-9,81	-93,81

Tabela E.7: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12g para f_p). Ensaio A.

Curva em “U”												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-6,04	-14,71	-10,69	-9,81	-23,81	-4,90	-41,97	-9,81	-65,93	-9,81	-94,25
0,032	0,00	-6,65	-4,90	-11,41	-9,81	-24,69	-4,90	-42,99	-4,90	-67,07	-9,81	-95,50
0,076	-4,90	-7,51	-4,90	-12,41	-4,90	-25,92	-4,90	-44,41	-4,90	-68,67	-14,71	-97,25
0,120	-4,90	-8,37	-9,81	-13,40	0,00	-27,15	-14,71	-45,83	-4,90	-70,26	-14,71	-98,99
0,164	-4,90	-9,23	-14,71	-14,40	4,90	-28,38	-9,81	-47,26	-9,81	-71,85	-9,81	-100,74
0,208	-4,90	-10,08	-9,81	-15,40	0,00	-29,60	-14,71	-48,67	-9,81	-73,44	-9,81	-102,48

Tabela E.8: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 4.15 para f_p). Ensaio A.

Curva em “U”												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-6,04	-14,71	-10,69	-9,81	-23,81	-4,90	-41,97	-9,81	-65,93	-9,81	-94,25
0,032	0,00	-8,45	-4,90	-12,80	-9,81	-25,63	-4,90	-43,65	-4,90	-67,53	-9,81	-95,79
0,076	-4,90	-11,08	-4,90	-15,12	-4,90	-27,63	-4,90	-45,51	-4,90	-69,31	-14,71	-97,51
0,120	-4,90	-13,46	-9,81	-17,21	0,00	-29,45	-14,71	-47,20	-4,90	-70,92	-14,71	-99,07
0,164	-4,90	-15,72	-14,71	-19,19	4,90	-31,18	-9,81	-48,80	-9,81	-72,46	-9,81	-100,56
0,208	-4,90	-17,87	-9,81	-21,09	0,00	-32,83	-14,71	-50,34	-9,81	-73,93	-9,81	-101,99

Tabela E.9: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em "U" (Equação 2.12a para f_p). Ensaio B.

Curva em "U"												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	39,23	-2,90	63,74	-5,11	78,45	-11,49	137,29	-20,45	240,26	-31,71	318,72	-45,62
0,032	34,32	-2,53	63,74	-4,73	83,36	-11,11	137,29	-20,07	250,07	-31,33	308,91	-45,25
0,076	24,52	-2,01	63,74	-4,21	78,45	-10,59	137,29	-19,55	240,26	-30,81	313,81	-44,72
0,120	24,52	-1,49	58,84	-3,69	73,55	-10,07	137,29	-19,04	245,17	-30,29	323,62	-44,20
0,164	34,32	-0,97	63,74	-3,16	78,45	-9,55	137,29	-18,51	245,17	-29,77	323,62	-43,68
0,208	24,52	-0,45	63,74	-2,64	83,36	-9,03	127,49	-17,99	245,17	-29,24	313,81	-43,16

Tabela E.10: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em "U" (Equação 2.12b para f_p). Ensaio B.

Curva em "U"												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	39,23	-2,90	63,74	-5,11	78,45	-11,49	137,29	-20,45	240,26	-31,71	318,72	-45,62
0,032	34,32	-3,09	63,74	-5,29	83,36	-11,67	137,29	-20,63	250,07	-31,89	308,91	-45,80
0,076	24,52	-3,34	63,74	-5,54	78,45	-11,92	137,29	-20,88	240,26	-32,14	313,81	-46,05
0,120	24,52	-3,59	58,84	-5,79	73,55	-12,17	137,29	-21,14	245,17	-32,39	323,62	-46,31
0,164	34,32	-3,84	63,74	-6,04	78,45	-12,42	137,29	-21,39	245,17	-32,64	323,62	-46,56
0,208	24,52	-4,09	63,74	-6,29	83,36	-12,67	127,49	-21,64	245,17	-32,89	313,81	-46,81

Tabela E.11: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12c para f_p). Ensaio B.

Curva em “U”												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	39,23	-2,90	63,74	-5,11	78,45	-11,49	137,29	-20,45	240,26	-31,71	318,72	-45,62
0,032	34,32	-3,50	63,74	-5,71	83,36	-12,09	137,29	-21,05	250,07	-32,31	308,91	-46,22
0,076	24,52	-4,34	63,74	-6,54	78,45	-12,92	137,29	-21,89	240,26	-33,14	313,81	-47,06
0,120	24,52	-5,18	58,84	-7,37	73,55	-13,76	137,29	-22,72	245,17	-33,98	323,62	-47,89
0,164	34,32	-6,01	63,74	-8,21	78,45	-14,59	137,29	-23,56	245,17	-34,81	323,62	-48,73
0,208	24,52	-6,85	63,74	-9,04	83,36	-15,43	127,49	-24,39	245,17	-35,64	313,81	-49,56

Tabela E.12: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12d para f_p). Ensaio B.

Curva em “U”												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	39,23	-2,90	63,74	-5,11	78,45	-11,49	137,29	-20,45	240,26	-31,71	318,72	-45,62
0,032	34,32	-2,83	63,74	-5,04	83,36	-11,42	137,29	-20,38	250,07	-31,63	308,91	-45,55
0,076	24,52	-2,73	63,74	-4,94	78,45	-11,32	137,29	-20,28	240,26	-31,53	313,81	-45,45
0,120	24,52	-2,64	58,84	-4,83	73,55	-11,22	137,29	-20,18	245,17	-31,44	323,62	-45,35
0,164	34,32	-2,54	63,74	-4,73	78,45	-11,12	137,29	-20,08	245,17	-31,34	323,62	-45,25
0,208	24,52	-2,44	63,74	-4,63	83,36	-11,02	127,49	-19,99	245,17	-31,24	313,81	-45,15

Tabela E.13: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em "U" (Equação 2.12e para f_p). Ensaio B.

Curva em "U"												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	39,23	-2,90	63,74	-5,11	78,45	-11,49	137,29	-20,45	240,26	-31,71	318,72	-45,62
0,032	34,32	-3,27	63,74	-5,48	83,36	-11,86	137,29	-20,82	250,07	-32,08	308,91	-45,99
0,076	24,52	-3,79	63,74	-5,99	78,45	-12,37	137,29	-21,34	240,26	-32,59	313,81	-46,51
0,120	24,52	-4,30	58,84	-6,51	73,55	-12,89	137,29	-21,85	245,17	-33,11	323,62	-47,02
0,164	34,32	-4,82	63,74	-7,02	78,45	-13,40	137,29	-22,37	245,17	-33,62	323,62	-47,54
0,208	24,52	-5,33	63,74	-7,53	83,36	-13,92	127,49	-22,88	245,17	-34,14	313,81	-48,05

Tabela E.14: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em "U" (Equação 2.12f para f_p). Ensaio B.

Curva em "U"												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	39,23	-2,90	63,74	-5,11	78,45	-11,49	137,29	-20,45	240,26	-31,71	318,72	-45,62
0,032	34,32	-2,52	63,74	-4,72	83,36	-11,10	137,29	-20,06	250,07	-31,32	308,91	-45,23
0,076	24,52	-1,98	63,74	-4,18	78,45	-10,56	137,29	-19,52	240,26	-30,78	313,81	-44,70
0,120	24,52	-1,44	58,84	-3,64	73,55	-10,02	137,29	-18,99	245,17	-30,24	323,62	-44,16
0,164	34,32	-0,90	63,74	-3,10	78,45	-9,48	137,29	-18,45	245,17	-29,70	323,62	-43,62
0,208	24,52	-0,37	63,74	-2,56	83,36	-8,95	127,49	-17,91	245,17	-29,17	313,81	-43,08

Tabela E.15: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12g para f_p). Ensaio B.

Curva em “U”												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	39,23	-2,90	63,74	-5,11	78,45	-11,49	137,29	-20,45	240,26	-31,71	318,72	-45,62
0,032	34,32	-3,04	63,74	-5,24	83,36	-11,62	137,29	-20,58	250,07	-31,84	308,91	-45,75
0,076	24,52	-3,22	63,74	-5,42	78,45	-11,80	137,29	-20,77	240,26	-32,02	313,81	-45,94
0,120	24,52	-3,41	58,84	-5,60	73,55	-11,99	137,29	-20,96	245,17	-32,20	323,62	-46,12
0,164	34,32	-3,59	63,74	-5,79	78,45	-12,17	137,29	-21,14	245,17	-32,39	323,62	-46,30
0,208	24,52	-3,78	63,74	-5,97	83,36	-12,35	127,49	-21,33	245,17	-32,57	313,81	-46,49

Tabela E.16: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 4.15 para f_p). Ensaio B.

Curva em “U”												
v (m/s)	0,394		0,526		0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	39,23	-2,90	63,74	-5,11	78,45	-11,49	137,29	-20,45	240,26	-31,71	318,72	-45,62
0,032	34,32	-3,39	63,74	-5,47	83,36	-11,76	137,29	-20,68	250,07	-31,92	308,91	-45,83
0,076	24,52	-3,93	63,74	-5,90	78,45	-12,09	137,29	-20,99	240,26	-32,21	313,81	-46,11
0,120	24,52	-4,44	58,84	-6,30	73,55	-12,41	137,29	-21,28	245,17	-32,50	323,62	-46,39
0,164	34,32	-4,92	63,74	-6,68	78,45	-12,73	137,29	-21,58	245,17	-32,78	323,62	-46,67
0,208	24,52	-5,39	63,74	-7,06	83,36	-13,05	127,49	-21,87	245,17	-33,06	313,81	-46,94

Tabela E.17: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em "U" (Equação 2.12a para f_p). Ensaio C.

Curva em "U"								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-15,11	-14,71	-26,72	-34,32	-41,42	-39,23	-59,59
0,032	-9,81	-14,72	-14,71	-26,17	-39,23	-40,65	-44,13	-58,55
0,076	-14,71	-14,52	-19,61	-26,01	-39,23	-40,53	-34,32	-58,45
0,120	-9,81	-14,31	-9,81	-25,85	-39,23	-40,40	-39,23	-58,35
0,164	-9,81	-14,11	-29,42	-25,69	-39,23	-40,27	-39,23	-58,25
0,208	-14,71	-13,90	-29,42	-25,53	-29,42	-40,15	-39,23	-58,15

Tabela E.18: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em "U" (Equação 2.12b para f_p). Ensaio C.

Curva em "U"								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-15,11	-14,71	-26,72	-34,32	-41,42	-39,23	-59,59
0,032	-9,81	-15,26	-14,71	-26,71	-39,23	-41,18	-44,13	-59,07
0,076	-14,71	-15,81	-19,61	-27,29	-39,23	-41,80	-34,32	-59,71
0,120	-9,81	-16,36	-9,81	-27,87	-39,23	-42,41	-39,23	-60,34
0,164	-9,81	-16,90	-29,42	-28,46	-39,23	-43,02	-39,23	-60,97
0,208	-14,71	-17,45	-29,42	-29,04	-29,42	-43,63	-39,23	-61,60

Tabela E.19: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12c para f_p). Ensaio C.

Curva em “U”								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-15,11	-14,71	-26,72	-34,32	-41,42	-39,23	-59,59
0,032	-9,81	-15,68	-14,71	-27,12	-39,23	-41,60	-44,13	-59,49
0,076	-14,71	-16,81	-19,61	-28,29	-39,23	-42,80	-34,32	-60,71
0,120	-9,81	-17,94	-9,81	-29,46	-39,23	-43,99	-39,23	-61,92
0,164	-9,81	-19,08	-29,42	-30,63	-39,23	-45,19	-39,23	-63,14
0,208	-14,71	-20,20	-29,42	-31,80	-29,42	-46,38	-39,23	-64,36

Tabela E.20: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12d para f_p). Ensaio C.

Curva em “U”								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-15,11	-14,71	-26,72	-34,32	-41,42	-39,23	-59,59
0,032	-9,81	-15,01	-14,71	-26,45	-39,23	-40,93	-44,13	-58,82
0,076	-14,71	-15,21	-19,61	-26,69	-39,23	-41,19	-34,32	-59,10
0,120	-9,81	-15,40	-9,81	-26,92	-39,23	-41,45	-39,23	-59,38
0,164	-9,81	-15,60	-29,42	-27,15	-39,23	-41,72	-39,23	-59,67
0,208	-14,71	-15,79	-29,42	-27,39	-29,42	-41,98	-39,23	-59,95

Tabela E.21: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em "U" (Equação 2.12e para f_p). Ensaio C.

Curva em "U"								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-15,11	-14,71	-26,72	-34,32	-41,42	-39,23	-59,59
0,032	-9,81	-15,33	-14,71	-26,75	-39,23	-41,21	-44,13	-59,08
0,076	-14,71	-15,97	-19,61	-27,40	-39,23	-41,86	-34,32	-59,73
0,120	-9,81	-16,61	-9,81	-28,04	-39,23	-42,51	-39,23	-60,38
0,164	-9,81	-17,25	-29,42	-28,69	-39,23	-43,16	-39,23	-61,02
0,208	-14,71	-17,89	-29,42	-29,34	-29,42	-43,80	-39,23	-61,67

Tabela E.22: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em "U" (Equação 2.12f para f_p). Ensaio C.

Curva em "U"								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-15,11	-14,71	-26,72	-34,32	-41,42	-39,23	-59,59
0,032	-9,81	-14,69	-14,71	-26,14	-39,23	-40,62	-44,13	-58,51
0,076	-14,71	-14,45	-19,61	-25,93	-39,23	-40,44	-34,32	-58,35
0,120	-9,81	-14,21	-9,81	-25,73	-39,23	-40,26	-39,23	-58,19
0,164	-9,81	-13,97	-29,42	-25,52	-39,23	-40,08	-39,23	-58,03
0,208	-14,71	-13,72	-29,42	-25,32	-29,42	-39,91	-39,23	-57,88

Tabela E.23: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 2.12g para f_p). Ensaio C.

Curva em “U”								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-15,11	-14,71	-26,72	-34,32	-41,42	-39,23	-59,59
0,032	-9,81	-15,49	-14,71	-27,00	-39,23	-41,55	-44,13	-59,50
0,076	-14,71	-16,35	-19,61	-28,00	-39,23	-42,67	-34,32	-60,73
0,120	-9,81	-17,21	-9,81	-29,00	-39,23	-43,79	-39,23	-61,96
0,164	-9,81	-18,07	-29,42	-30,00	-39,23	-44,91	-39,23	-63,19
0,208	-14,71	-18,92	-29,42	-30,99	-29,42	-46,02	-39,23	-64,42

Tabela E.24: Comparação entre os resultados experimentais e calculados de diferença de pressão para a seção da curva em “U” (Equação 4.15 para f_p). Ensaio C.

Curva em “U”								
v (m/s)	0,789		1,052		1,315		1,578	
Gs (kg/m ² s)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)	ΔP_{exp} (mmH ₂ O)	ΔP_{cal} (mmH ₂ O)
0,000	-4,90	-15,11	-14,71	-26,72	-34,32	-41,42	-39,23	-59,59
0,032	-9,81	-16,63	-14,71	-27,83	-39,23	-42,17	-44,13	-59,96
0,076	-14,71	-18,56	-19,61	-29,54	-39,23	-43,75	-34,32	-61,46
0,120	-9,81	-20,31	-9,81	-31,09	-39,23	-45,18	-39,23	-62,83
0,164	-9,81	-21,98	-29,42	-32,57	-39,23	-46,55	-39,23	-64,13
0,208	-14,71	-23,57	-29,42	-33,99	-29,42	-47,87	-39,23	-65,38

Anexo A: Dados da Caracterização Física do Catalisador de FCC

AccuPyc 1330 V2.02
Serial Number: 2399
Density and Volume Report

Sample ID: 01
Sample Weight: 6.6915 g
Temperature: 25.5 C
Number of Purges: 30
Cell Volume: 11.9428 cm3

Started: 12/12/06 14:28:17
Completed: 12/12/06 15:03:28
Equilibration Rate: 0.0050 psig/min
Expansion Volume: 9.1809 cm3

Run#	Volume cm3	Deviation cm3	Density g/cm3	Deviation g/cm3	Elapsed Time (h:m:s)
1	2.6918	0.0019	2.4859	-0.0018	0:16:11
2	2.6907	0.0008	2.4869	-0.0008	0:18:17
3	2.6908	0.0009	2.4868	-0.0009	0:20:24
4	2.6906	0.0007	2.4870	-0.0007	0:22:31
5	2.6901	0.0003	2.4874	-0.0003	0:24:39
6	2.6890	-0.0008	2.4885	0.0008	0:26:44
7	2.6881	-0.0018	2.4893	0.0016	0:28:51
8	2.6890	-0.0008	2.4884	0.0007	0:30:54
9	2.6894	-0.0005	2.4881	0.0005	0:33:01
10	2.6890	-0.0009	2.4885	0.0008	0:35:02

Average Volume: 2.6898 cm3
Average Density: 2.4877 g/cm3

Standard Deviation: 0.0011 cm3
Standard Deviation: 0.0010 g/cm3

Micromeritics Instrument Corp

WIN9400 Series
V2.00

Unit 725

Port 2/1

Page 1

Sample: Catalisador FCC
Operator: Celso
Submitter: Mario (Prof. Cremasco)
File: C:\WIN9420\DATA\000-553.SMP

LP Analysis Time: 19/12/06 19:19:26 Sample Weight: 0.9304 g
HP Analysis Time: 20/12/06 11:02:11 Correction Type: None
Report Time: 20/12/06 11:10:08 Show Neg. Int: No

Summary Report

Penetrometer: #s/n - (10) 5 Bulb, 1.131 Stem, Powder

Pen. Constant:	21.630 $\mu\text{L/pF}$	Adv. Contact Angle:	130.000 degrees
Pen. Weight:	64.2596 g	Rec. Contact Angle:	130.000 degrees
Stem Volume:	1.1310 mL	Hg Surface Tension:	485.000 dynes/cm
Max. Head Pressure:	4.4500 psia	Hg Density:	13.5335 g/mL
Pen. Volume:	5.7985 mL	Sample Weight:	0.9304 g
		Assembly Weight:	129.6991 g

Low Pressure:

Evacuation Pressure: 50.000 μmHg
Evacuation Time: 60 mins
Mercury Filling Pressure: 2.10 psia
Equilibration Time: 30 secs
Maximum Intrusion Volume: 100.000 mL/g

High Pressure:

Equilibration Time: 30 secs
Maximum Intrusion Volume: 100.000 mL/g

No Blank Correction

Intrusion Data Summary

Total Intrusion Volume =	0.6438 mL/g
Total Pore Area =	26.651 m^2/g
Median Pore Diameter (Volume) =	18.0879 μm
Median Pore Diameter (Area) =	0.0117 μm
Average Pore Diameter (4V/A) =	0.0966 μm
Bulk Density =	0.9017 g/mL
Apparent (skeletal) Density =	2.1493 g/mL
Porosity =	58.0483 %
Stem Volume Used =	53 %

Micromeritics Instrument Corp

WIN9400 Series
V2.00

Unit 725

Port 2/1

Page 2

Sample: Catalisador FCC
 Operator: Celso
 Submitter: Mario (Prof. Cremasco)
 File: C:\WIN9420\DATA\000-553.SMP

LP Analysis Time: 19/12/06 19:19:26
 HP Analysis Time: 20/12/06 11:02:11
 Report Time: 20/12/06 11:10:08

Sample Weight: 0.9304 g
 Correction Type: None
 Show Neg. Int: No

Tabular Report

Pressure (psia)	Mean Diameter (μ m)	Cumulative Pore Volume (mL/g)	Incremental Pore Volume (mL/g)	Cumulative Pore Area (m ² /g)	Incremental Pore Area (m ² /g)
2.10	86.1510	0.0000	0.0000	0.000	0.000
3.09	72.3593	0.0053	0.0053	0.000	0.000
4.09	51.3917	0.0110	0.0057	0.001	0.000
5.10	39.8557	0.0184	0.0074	0.001	0.001
6.09	32.6064	0.0525	0.0341	0.006	0.004
7.56	26.8230	0.1471	0.0945	0.020	0.014
8.56	22.5296	0.2360	0.0889	0.036	0.016
10.54	19.1414	0.3498	0.1138	0.059	0.024
13.04	15.5129	0.4035	0.0537	0.073	0.014
16.00	12.5869	0.4261	0.0226	0.080	0.007
19.98	10.1756	0.4387	0.0126	0.085	0.005
24.97	8.1475	0.4445	0.0059	0.089	0.003
29.96	6.6401	0.4494	0.0048	0.091	0.003
61.46	4.4895	0.4494	0.0000	0.091	0.000
75.78	2.6648	0.4494	0.0000	0.091	0.000
90.98	2.1916	0.4494	0.0000	0.091	0.000
162.76	1.5540	0.4579	0.0085	0.113	0.022
181.50	1.0539	0.4599	0.0021	0.121	0.008
219.15	0.9109	0.4645	0.0046	0.141	0.020
270.14	0.7474	0.4710	0.0065	0.176	0.035
331.30	0.6077	0.4783	0.0073	0.224	0.048
458.69	0.4701	0.4915	0.0132	0.336	0.112
525.38	0.3693	0.4971	0.0057	0.397	0.061
661.55	0.3088	0.5070	0.0099	0.525	0.128
815.96	0.2475	0.5156	0.0086	0.664	0.139
1011.32	0.2002	0.5240	0.0084	0.832	0.168
1237.61	0.1625	0.5317	0.0077	1.020	0.189
2813.86	0.1052	0.5383	0.0066	1.271	0.251
2918.70	0.0631	0.5404	0.0021	1.404	0.133
3587.09	0.0562	0.5517	0.0113	2.210	0.806
4483.45	0.0454	0.5629	0.0112	3.201	0.991
5579.63	0.0364	0.5732	0.0103	4.328	1.128
6872.99	0.0294	0.5832	0.0100	5.697	1.369
8569.69	0.0237	0.5926	0.0094	7.282	1.585
10608.73	0.0191	0.6013	0.0087	9.114	1.832
13141.96	0.0154	0.6099	0.0085	11.329	2.215
16404.06	0.0124	0.6187	0.0089	14.188	2.859
19941.72	0.0100	0.6266	0.0079	17.324	3.135
24880.97	0.0082	0.6356	0.0090	21.722	4.398
29910.89	0.0067	0.6438	0.0082	26.651	4.929
27286.03	0.0063	0.6449	0.0011	27.350	0.699

Micromeritics Instrument Corp

WIN9400 Series
V2.00

Unit 725

Port 2/1

Page 3

Sample: Catalisador FCC
Operator: Celso
Submitter: Mario (Prof. Cremasco)
File: C:\WIN9420\DATA\000-553.SMP

LP Analysis Time: 19/12/06 19:19:26
HP Analysis Time: 20/12/06 11:02:11
Report Time: 20/12/06 11:10:08

Sample Weight: 0.9304 g
Correction Type: None
Show Neg. Int: No

Tabular Report

Pressure (psia)	Mean Diameter (μ m)	Cumulative Pore Volume (mL/g)	Incremental Pore Volume (mL/g)	Cumulative Pore Area (m ² /g)	Incremental Pore Area (m ² /g)
20880.79	0.0076	0.6407	-0.0042	25.139	-2.211
15966.71	0.0100	0.6368	-0.0039	23.596	-1.543
12444.89	0.0129	0.6336	-0.0032	22.594	-1.002
9609.61	0.0167	0.6304	-0.0032	21.836	-0.758
7296.69	0.0218	0.6271	-0.0034	21.219	-0.617
5721.97	0.0282	0.6235	-0.0036	20.707	-0.512
4316.47	0.0368	0.6186	-0.0049	20.176	-0.531
3310.95	0.0483	0.6112	-0.0073	19.567	-0.609
1451.15	0.0896	0.6082	-0.0030	19.434	-0.134
1147.41	0.1411	0.6045	-0.0037	19.328	-0.106
890.57	0.1804	0.6015	-0.0030	19.261	-0.066
702.58	0.2303	0.5988	-0.0027	19.214	-0.047
495.68	0.3112	0.5954	-0.0034	19.171	-0.043
399.05	0.4091	0.5933	-0.0022	19.150	-0.021
291.55	0.5368	0.5908	-0.0024	19.132	-0.018
234.23	0.6963	0.5870	-0.0039	19.110	-0.022
182.68	0.8811	0.5851	-0.0019	19.101	-0.009
143.94	1.1233	0.5836	-0.0015	19.096	-0.005
109.86	1.4514	0.5821	-0.0015	19.092	-0.004
84.81	1.8894	0.5810	-0.0010	19.089	-0.002
64.29	2.4730	0.5800	-0.0011	19.088	-0.002
43.60	3.4808	0.5786	-0.0014	19.086	-0.002
28.34	5.2646	0.5777	-0.0009	19.085	-0.001

Sample: Catalisador FCC
Operator: Celso
Submitter: Mario (Prof. Cremasco)
File: C:\WIN9420\DATA\000-553.SMP

LP Analysis Time: 19/12/06 19:19:26

Sample Weight: 0.9304 g

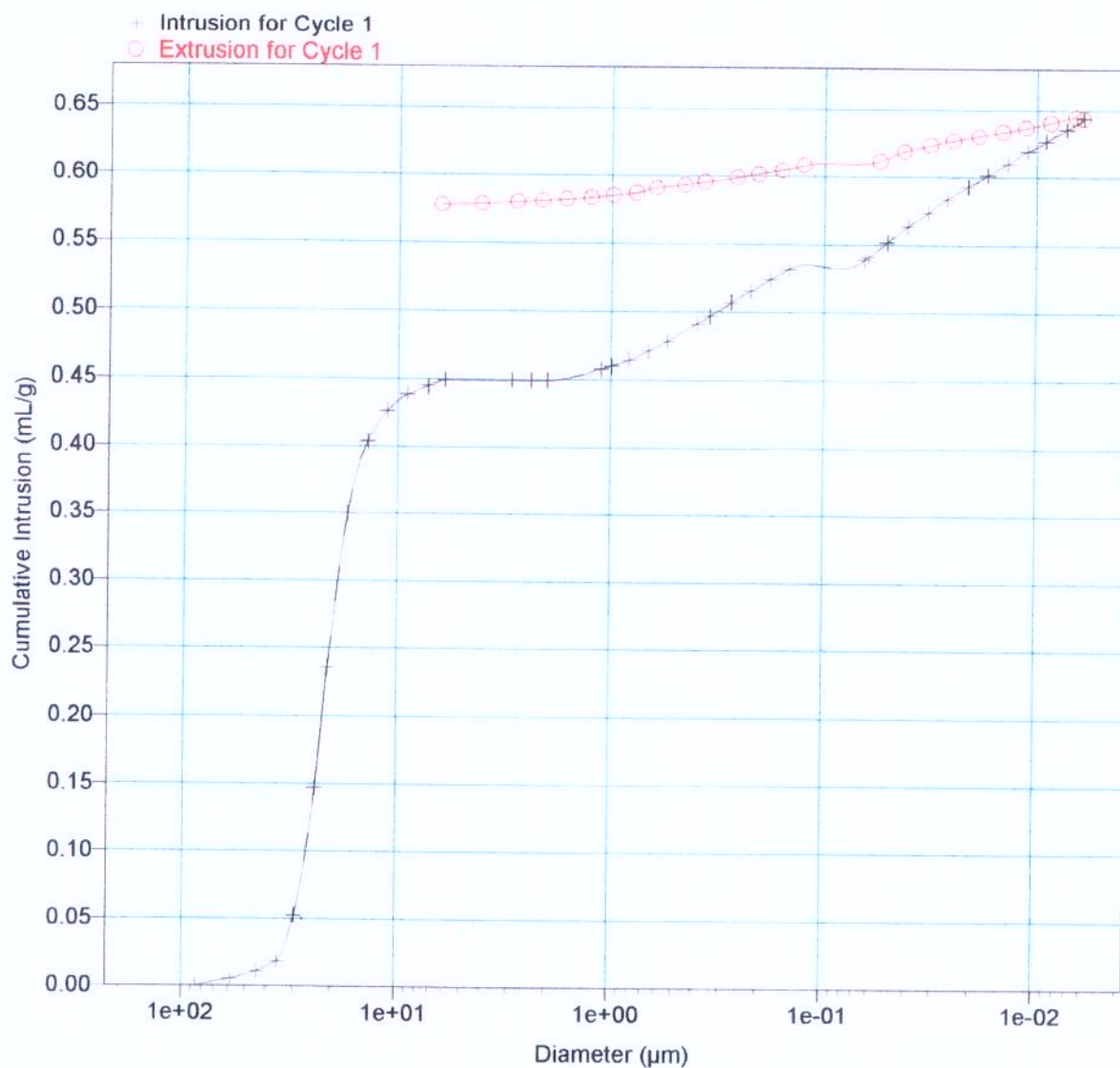
HP Analysis Time: 20/12/06 11:02:11

Correction Type: None

Report Time: 20/12/06 11:10:08

Show Neg. Int: No

Cumulative Intrusion vs Diameter

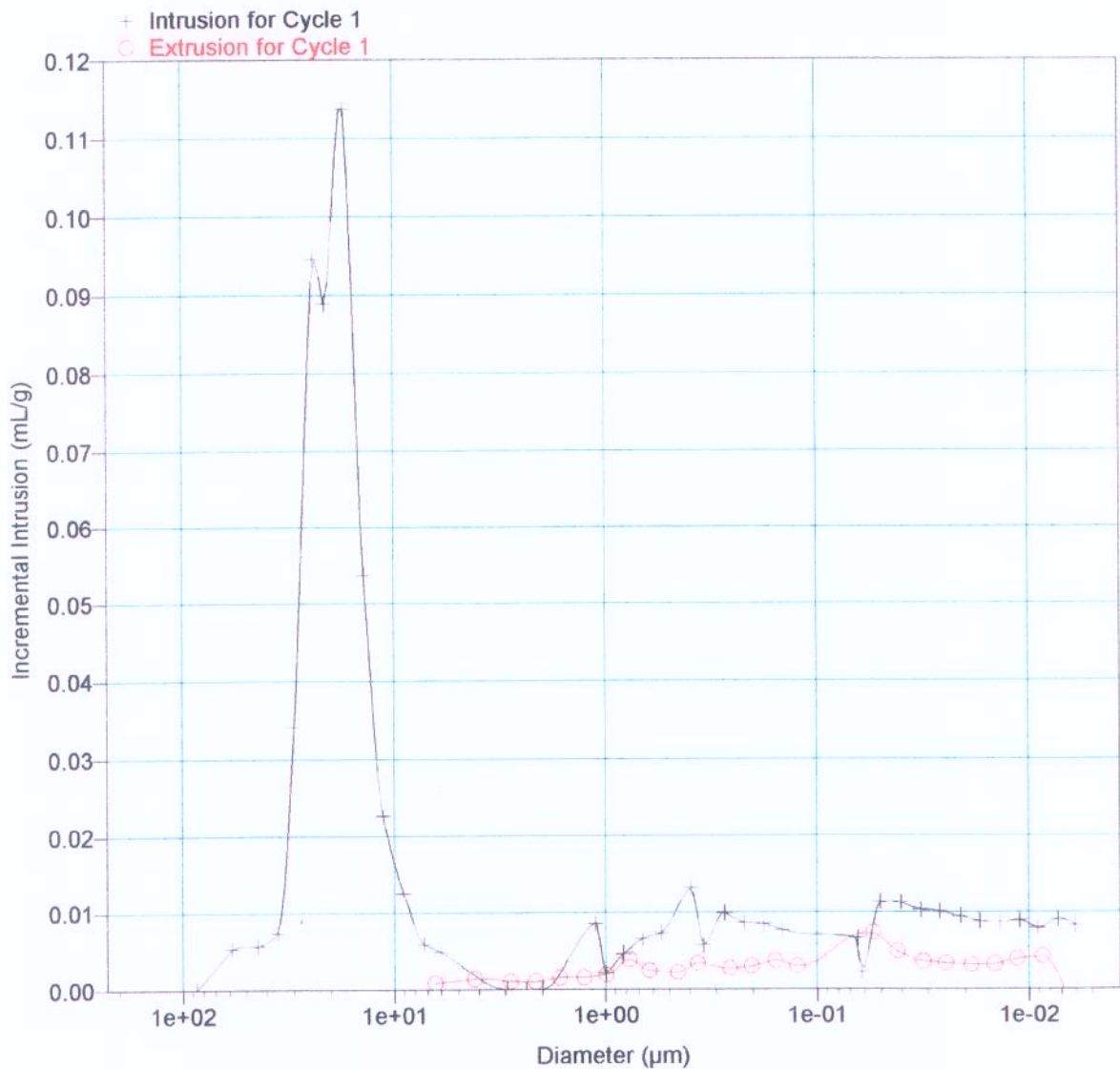


Sample: Catalisador FCC
Operator: Celso
Submitter: Mario (Prof. Cremasco)
File: C:\WIN9420\DATA\000-553.SMP

LP Analysis Time: 19/12/06 19:19:26
HP Analysis Time: 20/12/06 11:02:11
Report Time: 20/12/06 11:10:08

Sample Weight: 0.9304 g
Correction Type: None
Show Neg. Int: No

Incremental Intrusion vs Diameter

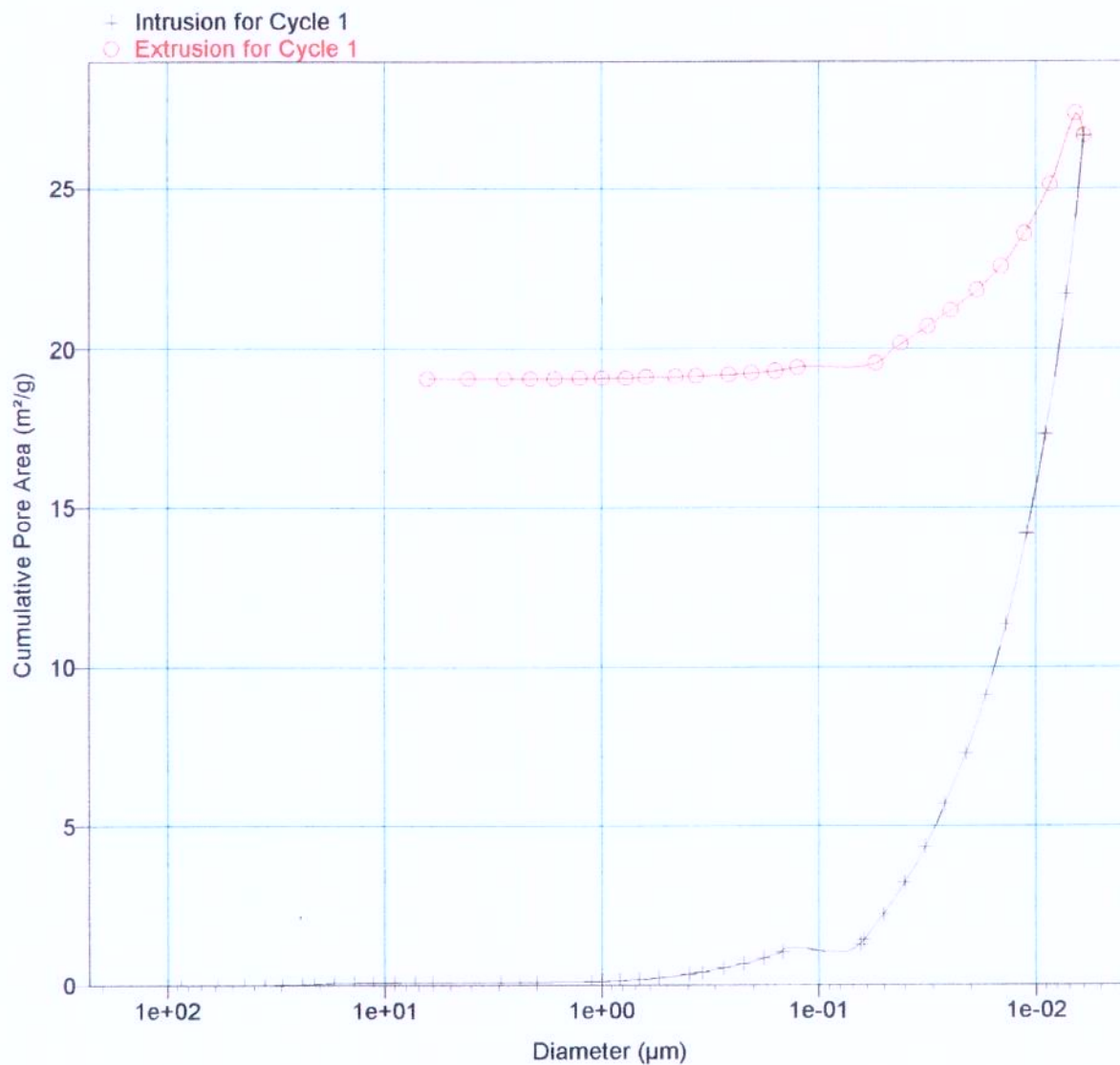


Sample: Catalisador FCC
Operator: Celso
Submitter: Mario (Prof. Cremasco)
File: C:\WIN9420\DATA\000-553.SMP

LP Analysis Time: 19/12/06 19:19:26
HP Analysis Time: 20/12/06 11:02:11
Report Time: 20/12/06 11:10:08

Sample Weight: 0.9304 g
Correction Type: None
Show Neg. Int: No

Cumulative Pore Area vs Diameter



Sample: Catalisador FCC
Operator: Celso
Submitter: Mario (Prof. Cremasco)
File: C:\WIN9420\DATA\000-553.SMP

LP Analysis Time: 19/12/06 19:19:26

Sample Weight: 0.9304 g

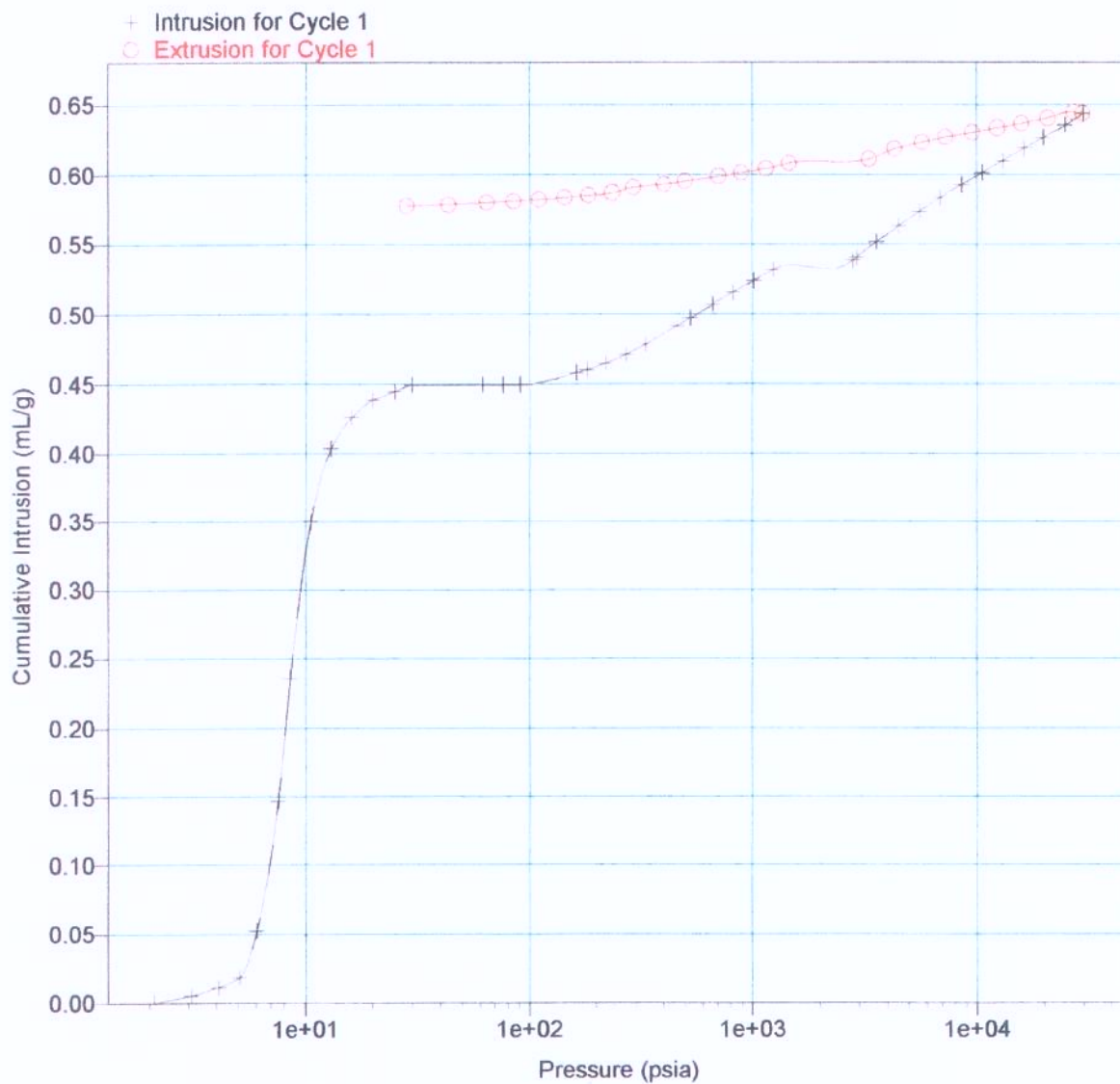
HP Analysis Time: 20/12/06 11:02:11

Correction Type: None

Report Time: 20/12/06 11:10:08

Show Neg. Int: No

Cumulative Intrusion vs Pressure

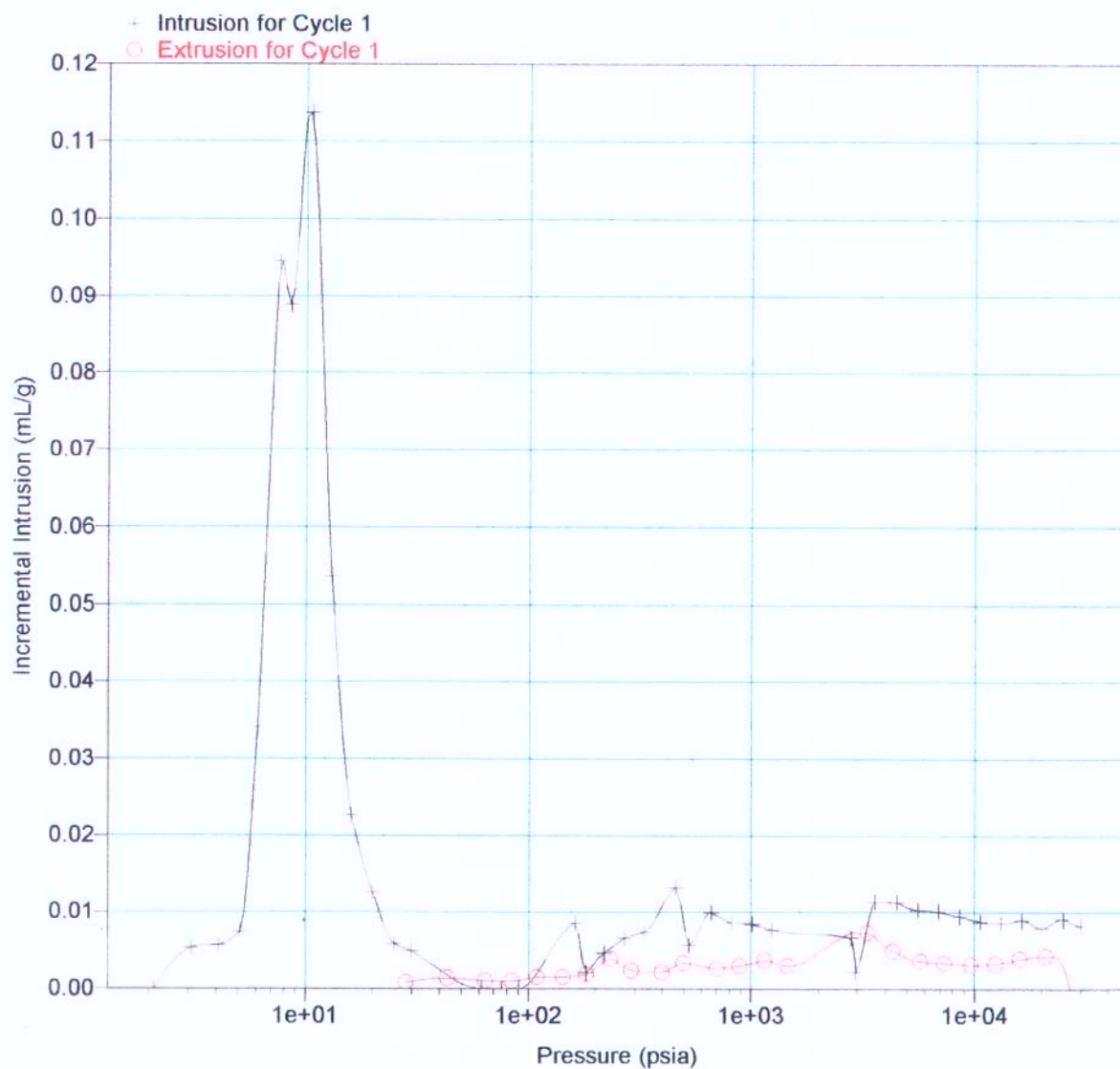


Sample: Catalisador FCC
Operator: Celso
Submitter: Mario (Prof. Cremasco)
File: C:\WIN9420\DATA\000-553.SMP

LP Analysis Time: 19/12/06 19:19:26
HP Analysis Time: 20/12/06 11:02:11
Report Time: 20/12/06 11:10:08

Sample Weight: 0.9304 g
Correction Type: None
Show Neg. Int: No

Incremental Intrusion vs Pressure



DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

(Mastersizer)

DADOS EXPERIMENTAIS

Descrição das amostras: Catalisador particulado fino e seco.

Número de amostras: 1

Preparação da amostra: A amostra foi analisada em triplicata após 5 minutos de estabilização da cuba analítica e com o auxílio de ultrassom para facilitar a dispersão. Foi usada água deionizada como dispersante. Para cada replicata foram realizadas pelo 5 leituras.

Equipamento empregado:

Analizador de Tamanho de Partículas por Difração à Laser Mastersizer S, modelo S-MAM 5005 da marca Malvern.

Faixa de Análise: 0,05 a 900 microns.

Unidade: Suspensão de amostra.

Condições ambientais:

T_{laboratório}: $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$

Química analista: **Sra. Andréa Arruda Martins Shimojo**

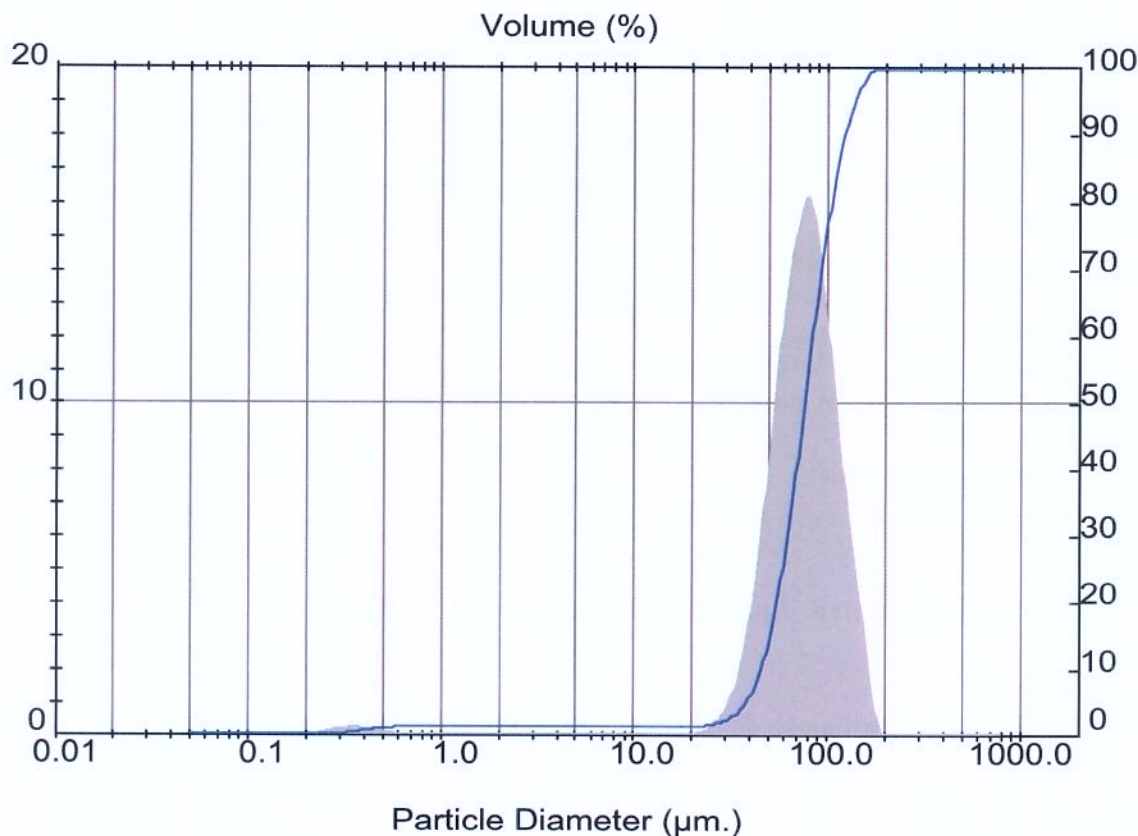
OBJETIVO

Verificação da distribuição de tamanho de partículas em amostra de catalisador.

Replicata 1
Leitura 1

RESULTADOS

Amostra de Catalisador



Result: Analysis Table

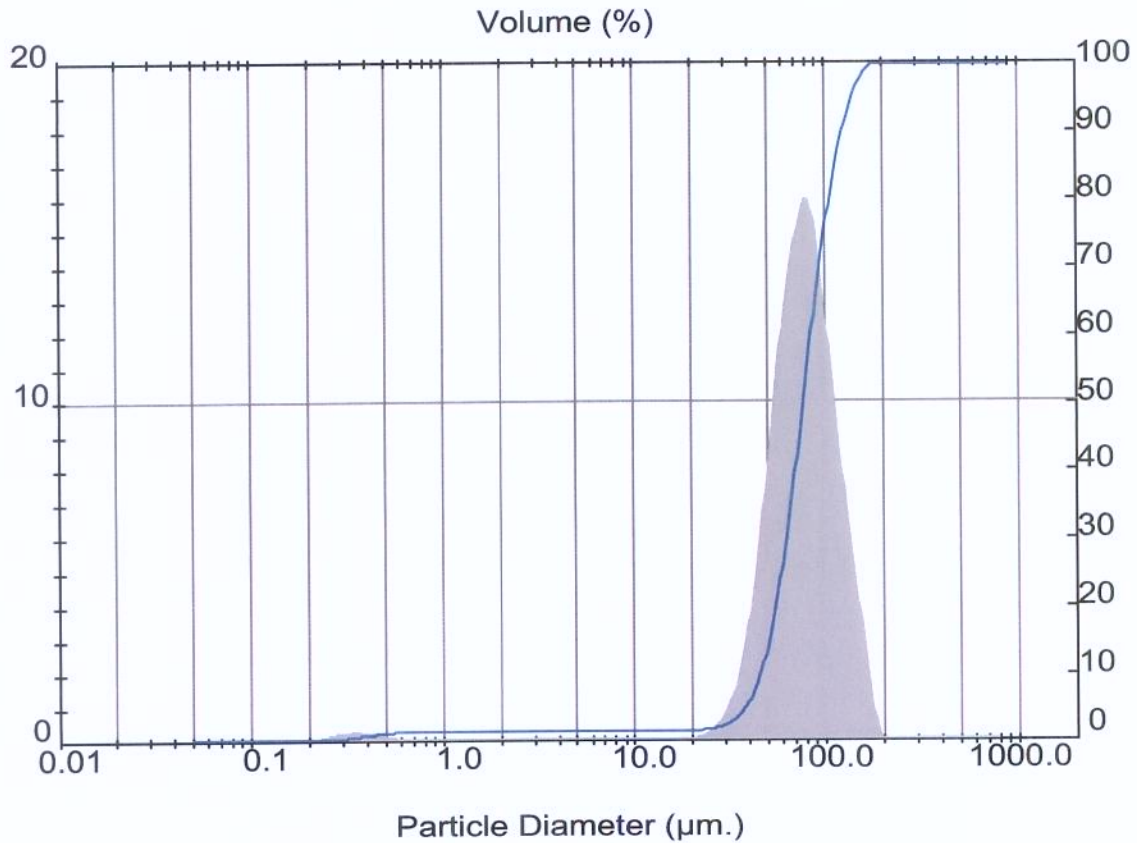
ID: 11/11/2006 - rep1	Run No: 1	Measured: 11/9/06 15:12
File: 111106	Rec. No: 1	Analysed: 11/9/06 15:12
Path: C:\USUARIOS\MARIO\		Source: Analysed

Range: 300RF mm	Beam: 2.40 mm	Sampler: MS14	Obs': 11.0 %
Presentation: 3OHD	Analysis: Polydisperse		Residual: 0.705 %
Modifications: None			

Conc. = 0.0589 %Vol	Density = 1.120 g/cm ³	S.S.A. = 0.3092 m ² /g
Distribution: Volume	D[4, 3] = 80.16 µm	D[3, 2] = 17.33 µm
D(v, 0.1) = 45.49 µm	D(v, 0.5) = 76.44 µm	D(v, 0.9) = 122.68 µm
Span = 1.010E+00	Uniformity = 3.189E-01	

Size (µm)	Volume Under%	Size (µm)	Volume Under%	Size (µm)	Volume Under%	Size (µm)	Volume Under%
0.05	0.00	0.67	1.47	9.00	1.50	120.67	89.16
0.06	0.00	0.78	1.49	10.48	1.50	140.58	95.55
0.07	0.00	0.91	1.50	12.21	1.50	163.77	99.16
0.08	0.00	1.06	1.50	14.22	1.50	190.80	100.00
0.09	0.00	1.24	1.50	16.57	1.50	222.28	100.00
0.11	0.00	1.44	1.50	19.31	1.54	258.95	100.00
0.13	0.00	1.68	1.50	22.49	1.63	301.68	100.00
0.15	0.00	1.95	1.50	26.20	1.89	351.46	100.00
0.17	0.01	2.28	1.50	30.53	2.51	409.45	100.00
0.20	0.04	2.65	1.50	35.56	3.92	477.01	100.00
0.23	0.11	3.09	1.50	41.43	6.90	555.71	100.00
0.27	0.26	3.60	1.50	48.27	12.57	647.41	100.00
0.31	0.50	4.19	1.50	56.23	21.78	754.23	100.00
0.36	0.78	4.88	1.50	65.51	34.59	878.67	100.00
0.42	1.05	5.69	1.50	76.32	49.82		
0.49	1.26	6.63	1.50	88.91	65.90		
0.58	1.40	7.72	1.50	103.58	79.32		

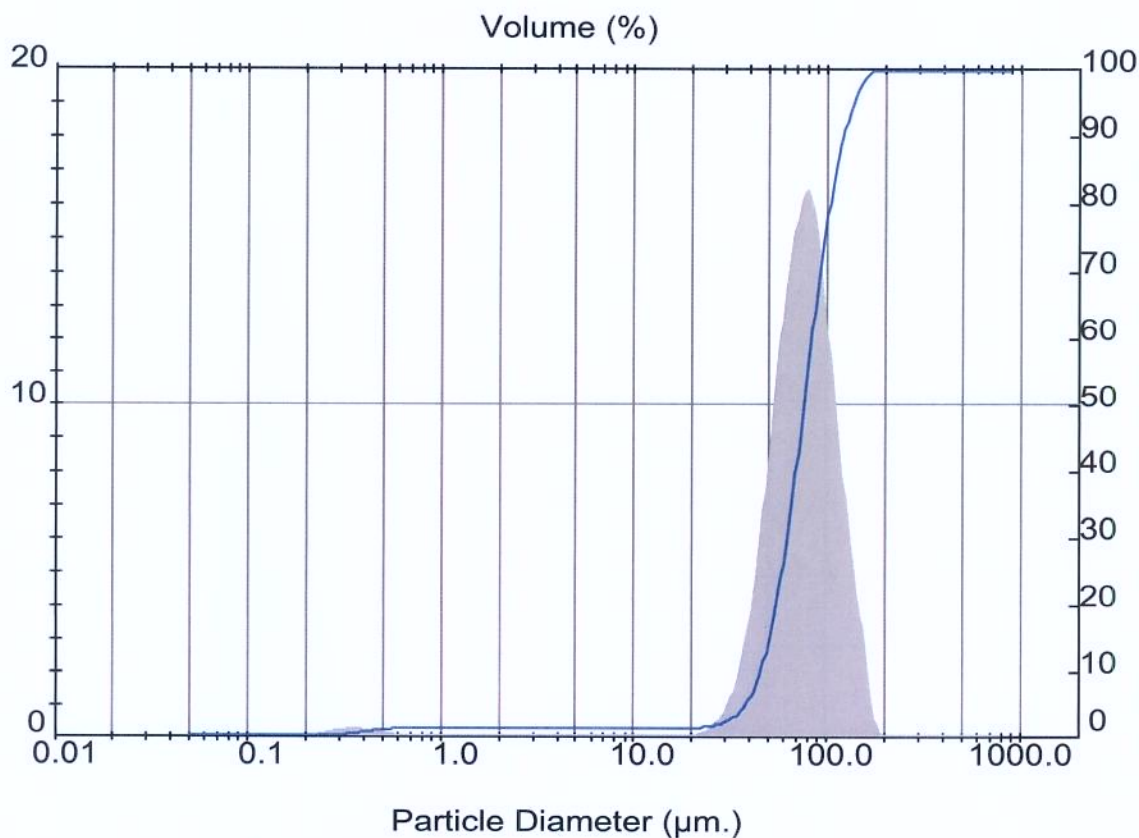
Leitura 2



Result: Analysis Table

ID: 11/11/2006 - rep1		Run No: 2	Measured: 11/9/06 15:12				
File: 111106		Rec. No: 2	Analysed: 11/9/06 15:12				
Path: C:\USUARIOS\MARIO\			Source: Analysed				
Range: 300RF mm		Beam: 2.40 mm	Sampler: MS14	Obs': 10.6 %			
Presentation: 3OHD		Analysis: Polydisperse		Residual: 0.730 %			
Modifications: None							
Conc. = 0.0563 %Vol		Density = 1.120 g/cm^3	S.S.A. = 0.3138 m^2/g				
Distribution: Volume		D[4, 3] = 80.32 um	D[3, 2] = 17.07 um				
D(v, 0.1) = 45.23 um		D(v, 0.5) = 76.48 um	D(v, 0.9) = 123.44 um				
Span = 1.023E+00		Uniformity = 3.227E-01					
Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%
0.05	0.00	0.67	1.48	9.00	1.52	120.67	88.84
0.06	0.00	0.78	1.50	10.48	1.52	140.58	95.32
0.07	0.00	0.91	1.51	12.21	1.52	163.77	99.04
0.08	0.00	1.06	1.52	14.22	1.52	190.80	100.00
0.09	0.00	1.24	1.52	16.57	1.52	222.28	100.00
0.11	0.00	1.44	1.52	19.31	1.56	258.95	100.00
0.13	0.00	1.68	1.52	22.49	1.65	301.68	100.00
0.15	0.00	1.95	1.52	26.20	1.92	351.46	100.00
0.17	0.01	2.28	1.52	30.53	2.57	409.45	100.00
0.20	0.04	2.65	1.52	35.56	4.02	477.01	100.00
0.23	0.12	3.09	1.52	41.43	7.08	555.71	100.00
0.27	0.28	3.60	1.52	48.27	12.81	647.41	100.00
0.31	0.52	4.19	1.52	56.23	22.01	754.23	100.00
0.36	0.80	4.88	1.52	65.51	34.72	878.67	100.00
0.42	1.07	5.69	1.52	76.32	49.77		
0.49	1.28	6.63	1.52	88.91	65.65		
0.58	1.42	7.72	1.52	103.58	78.98		

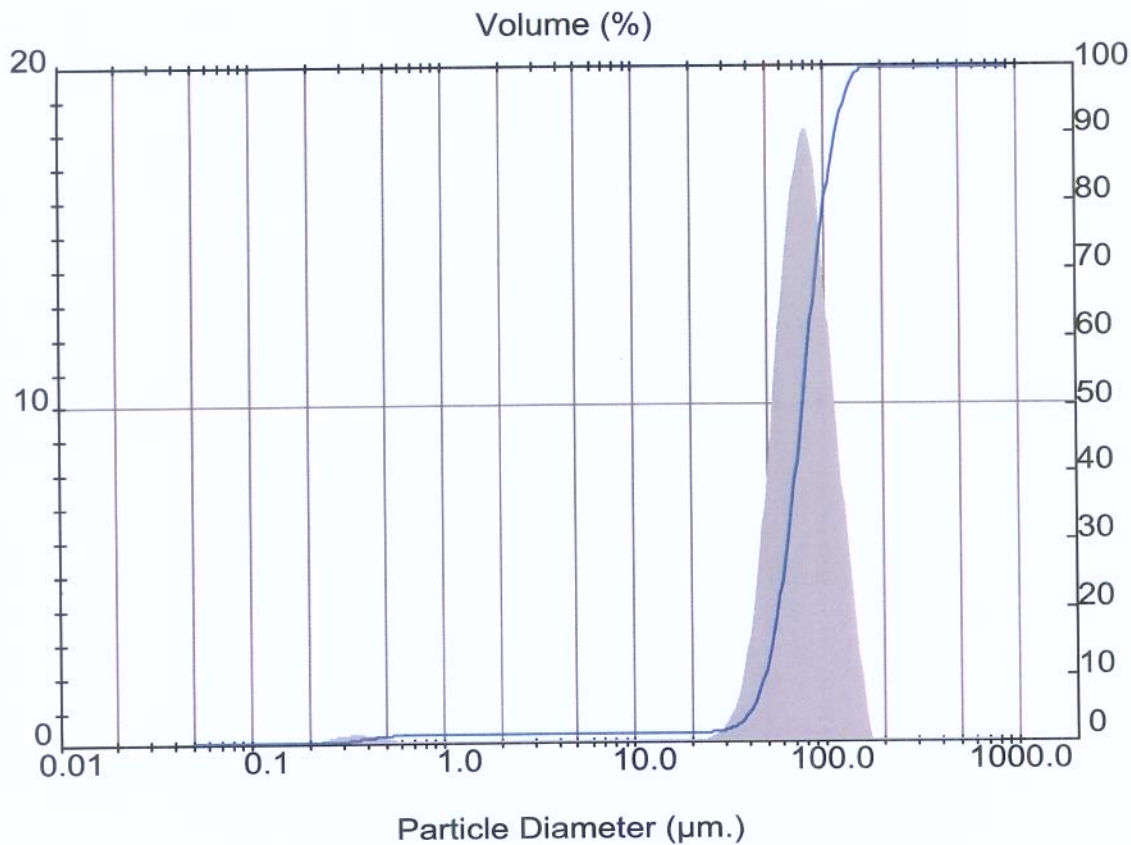
Leitura 3



Result: Analysis Table

ID: 11/11/2006 - rep1		Run No: 3		Measured: 11/9/06 15:13	
File: 111106		Rec. No: 3		Analysed: 11/9/06 15:13	
Path: C:\USUARIOS\MARIO\				Source: Analysed	
Range: 300RF mm		Beam: 2.40 mm		Sampler: MS14	
Presentation: 3OHD		Analysis: Polydisperse		Obs': 10.8 %	
Modifications: None				Residual: 0.693 %	
Conc. = 0.0568 %Vol		Density = 1.120 g/cm^3		S.S.A = 0.3127 m^2/g	
Distribution: Volume		D[4, 3] = 79.37 um		D[3, 2] = 17.13 um	
D(v, 0.1) = 45.37 um		D(v, 0.5) = 75.87 um		D(v, 0.9) = 120.85 um	
Span = 9.949E-01		Uniformity = 3.146E-01			
Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%
0.05	0.00	0.67	1.49	9.00	1.52
0.06	0.00	0.78	1.51	10.48	1.52
0.07	0.00	0.91	1.52	12.21	1.52
0.08	0.00	1.06	1.52	14.22	1.52
0.09	0.00	1.24	1.52	16.57	1.52
0.11	0.00	1.44	1.52	19.31	1.56
0.13	0.00	1.68	1.52	22.49	1.65
0.15	0.00	1.95	1.52	26.20	1.90
0.17	0.01	2.28	1.52	30.53	2.53
0.20	0.04	2.65	1.52	35.56	3.95
0.23	0.11	3.09	1.52	41.43	6.97
0.27	0.26	3.60	1.52	48.27	12.71
0.31	0.50	4.19	1.52	56.23	22.06
0.36	0.78	4.88	1.52	65.51	35.12
0.42	1.06	5.69	1.52	76.32	50.62
0.49	1.28	6.63	1.52	88.91	66.90
0.58	1.42	7.72	1.52	103.58	80.30

Leitura 4

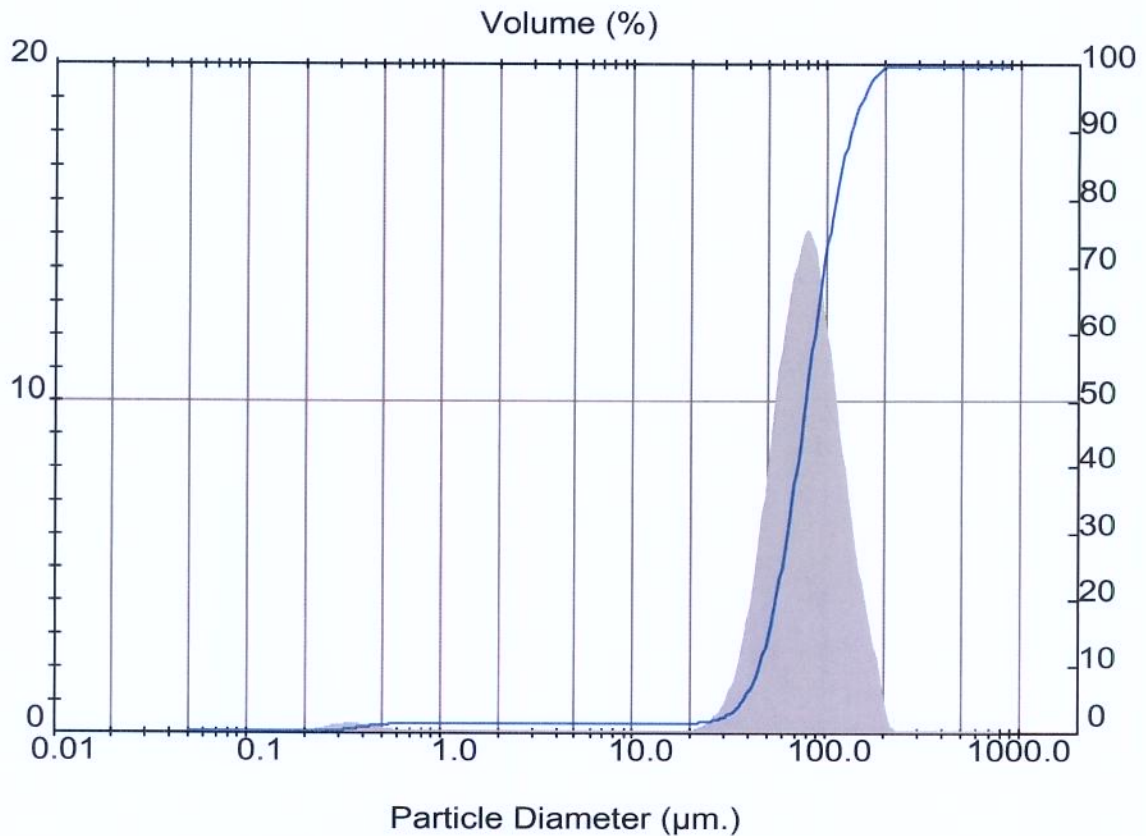


Result: Analysis Table

ID: 11/11/2006 - rep1	Run No: 4	Measured: 11/9/06 15:13
File: 111106	Rec. No: 4	Analysed: 11/9/06 15:13
Path: C:\USUARIOS\MARIO\		Source: Analysed
Range: 300RF mm	Beam: 2.40 mm	Sampler: MS14
Presentation: 3OHD	Analysis: Polydisperse	Obs': 10.6 %
Modifications: None		Residual: 0.747 %
Conc. = 0.0561 %Vol	Density = 1.120 g/cm ³	S.S.A. = 0.3148 m ² /g
Distribution: Volume	D[4, 3] = 78.60 µm	D[3, 2] = 17.02 µm
D(v, 0.1) = 47.66 µm	D(v, 0.5) = 76.17 µm	D(v, 0.9) = 115.66 µm
Span = 8.927E-01	Uniformity = 2.842E-01	

Size (µm)	Volume Under%	Size (µm)	Volume Under%	Size (µm)	Volume Under%	Size (µm)	Volume Under%
0.05	0.00	0.67	1.51	9.00	1.54	120.67	92.28
0.06	0.00	0.78	1.53	10.48	1.54	140.58	97.94
0.07	0.00	0.91	1.54	12.21	1.54	163.77	100.00
0.08	0.00	1.06	1.54	14.22	1.54	190.80	100.00
0.09	0.00	1.24	1.54	16.57	1.54	222.28	100.00
0.11	0.00	1.44	1.54	19.31	1.55	258.95	100.00
0.13	0.00	1.68	1.54	22.49	1.59	301.68	100.00
0.15	0.00	1.95	1.54	26.20	1.71	351.46	100.00
0.17	0.01	2.28	1.54	30.53	2.08	409.45	100.00
0.20	0.04	2.65	1.54	35.56	3.04	477.01	100.00
0.23	0.12	3.09	1.54	41.43	5.41	555.71	100.00
0.27	0.27	3.60	1.54	48.27	10.55	647.41	100.00
0.31	0.51	4.19	1.54	56.23	19.72	754.23	100.00
0.36	0.80	4.88	1.54	65.51	33.39	878.67	100.00
0.42	1.07	5.69	1.54	76.32	50.23		
0.49	1.30	6.63	1.54	88.91	68.19		
0.58	1.44	7.72	1.54	103.58	82.55		

Leitura 5



Result: Analysis Table

ID: 11/11/2006 - rep1		Run No: 5		Measured: 11/9/06 15:15	
File: 111106		Rec. No: 5		Analysed: 11/9/06 15:15	
Path: C:\USUARIOS\MARIO\				Source: Analysed	

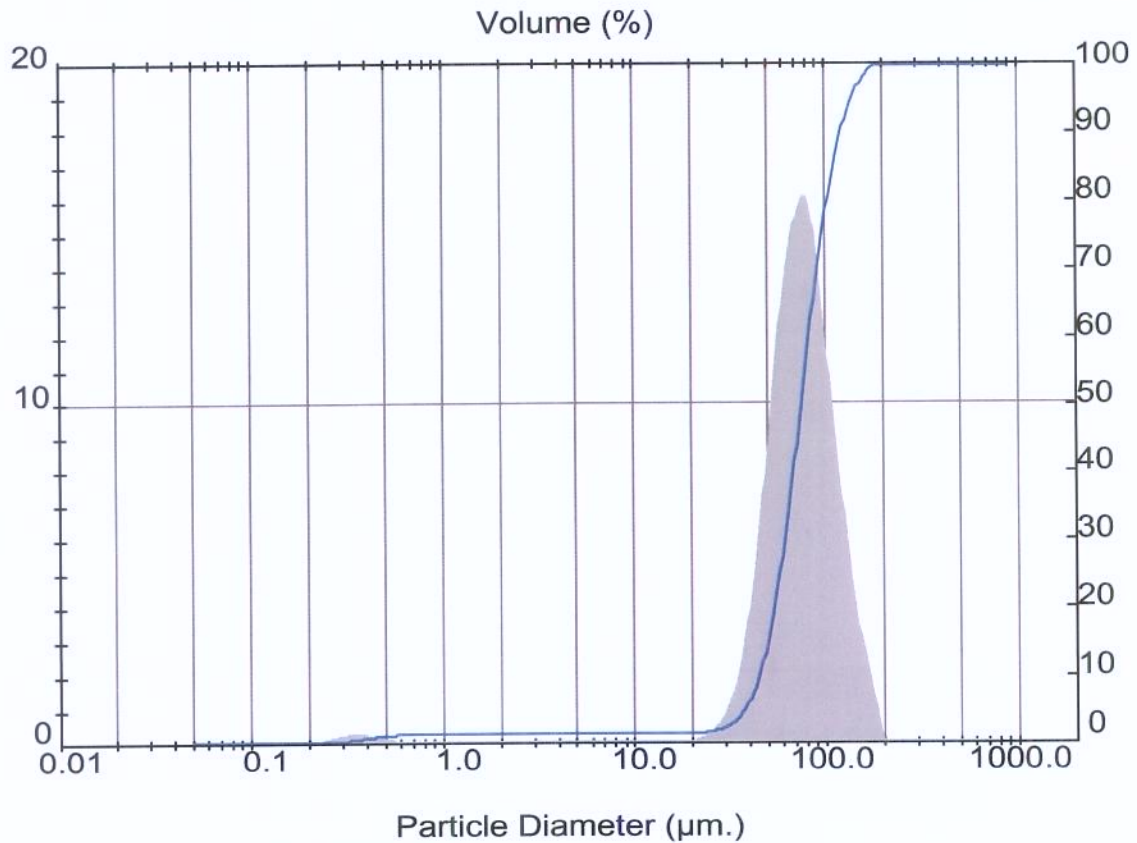
Range: 300RF mm		Beam: 2.40 mm		Sampler: MS14		Obs': 13.2 %	
Presentation: 30HD		Analysis: Polydisperse				Residual: 0.725 %	
Modifications: None							

Conc. = 0.0712 %Vol		Density = 1.120 g/cm^3		S.S.A. = 0.3196 m^2/g	
Distribution: Volume		D[4, 3] = 83.92 um		D[3, 2] = 16.76 um	
D(v, 0.1) = 45.33 um		D(v, 0.5) = 78.43 um		D(v, 0.9) = 132.83 um	
Span = 1.116E+00		Uniformity = 3.505E-01			

Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%
0.05	0.00	0.67	1.52	9.00	1.56	120.67	85.25
0.06	0.00	0.78	1.54	10.48	1.56	140.58	92.29
0.07	0.00	0.91	1.55	12.21	1.56	163.77	96.78
0.08	0.00	1.06	1.56	14.22	1.56	190.80	99.35
0.09	0.00	1.24	1.56	16.57	1.56	222.28	100.00
0.11	0.00	1.44	1.56	19.31	1.60	258.95	100.00
0.13	0.00	1.68	1.56	22.49	1.70	301.68	100.00
0.15	0.00	1.95	1.56	26.20	1.98	351.46	100.00
0.17	0.01	2.28	1.56	30.53	2.64	409.45	100.00
0.20	0.05	2.65	1.56	35.56	4.11	477.01	100.00
0.23	0.13	3.09	1.56	41.43	7.10	555.71	100.00
0.27	0.30	3.60	1.56	48.27	12.61	647.41	100.00
0.31	0.54	4.19	1.56	56.23	21.32	754.23	100.00
0.36	0.83	4.88	1.56	65.51	33.22	878.67	100.00
0.42	1.10	5.69	1.56	76.32	47.30		
0.49	1.31	6.63	1.56	88.91	62.32		
0.58	1.45	7.72	1.56	103.58	75.26		

Replicata 2

Leitura 1



Result: Analysis Table

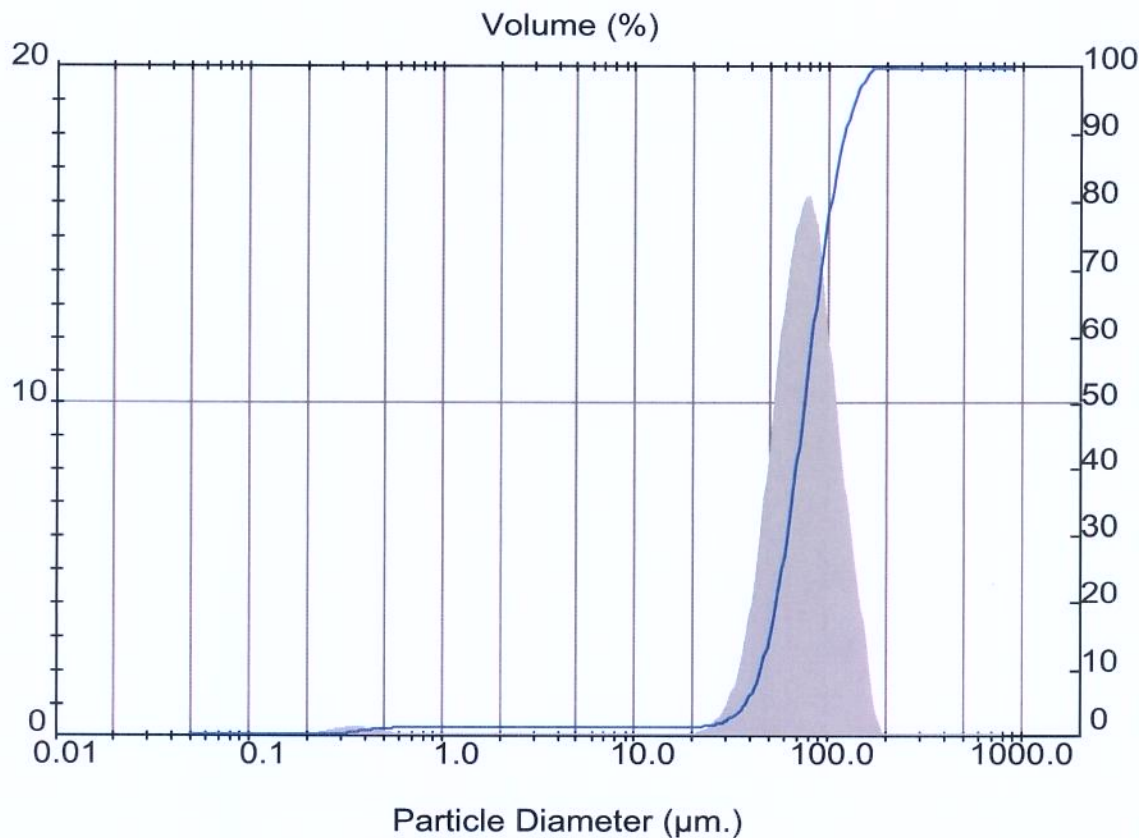
ID: 11/11/2006 - rep2	Run No: 1	Measured: 11/9/06 15:30
File: 111106	Rec. No: 11	Analysed: 11/9/06 15:30
Path: C:\USUARIOS\MARIO\		Source: Analysed

Range: 300RF mm	Beam: 2.40 mm	Sampler: MS14	Obs': 12.2 %
Presentation: 3OHD	Analysis: Polydisperse		Residual: 0.504 %
Modifications: None			

Conc. = 0.0651 %Vol	Density = 1.120 g/cm ³	S.S.A. = 0.3068 m ² /g
Distribution: Volume	D[4, 3] = 79.14 µm	D[3, 2] = 17.46 µm
D(v, 0.1) = 44.87 µm	D(v, 0.5) = 74.85 µm	D(v, 0.9) = 121.61 µm
Span = 1.025E+00	Uniformity = 3.251E-01	

Size (µm)	Volume Under%	Size (µm)	Volume Under%	Size (µm)	Volume Under%	Size (µm)	Volume Under%
0.05	0.00	0.67	1.47	9.00	1.49	120.67	89.64
0.06	0.00	0.78	1.48	10.48	1.49	140.58	95.38
0.07	0.00	0.91	1.49	12.21	1.49	163.77	98.54
0.08	0.00	1.06	1.49	14.22	1.49	190.80	100.00
0.09	0.00	1.24	1.49	16.57	1.49	222.28	100.00
0.11	0.00	1.44	1.49	19.31	1.53	258.95	100.00
0.13	0.00	1.68	1.49	22.49	1.64	301.68	100.00
0.15	0.00	1.95	1.49	26.20	1.92	351.46	100.00
0.17	0.01	2.28	1.49	30.53	2.60	409.45	100.00
0.20	0.03	2.65	1.49	35.56	4.10	477.01	100.00
0.23	0.09	3.09	1.49	41.43	7.27	555.71	100.00
0.27	0.24	3.60	1.49	48.27	13.31	647.41	100.00
0.31	0.47	4.19	1.49	56.23	23.08	754.23	100.00
0.36	0.76	4.88	1.49	65.51	36.50	878.67	100.00
0.42	1.05	5.69	1.49	76.32	52.04		
0.49	1.27	6.63	1.49	88.91	67.89		
0.58	1.41	7.72	1.49	103.58	80.60		

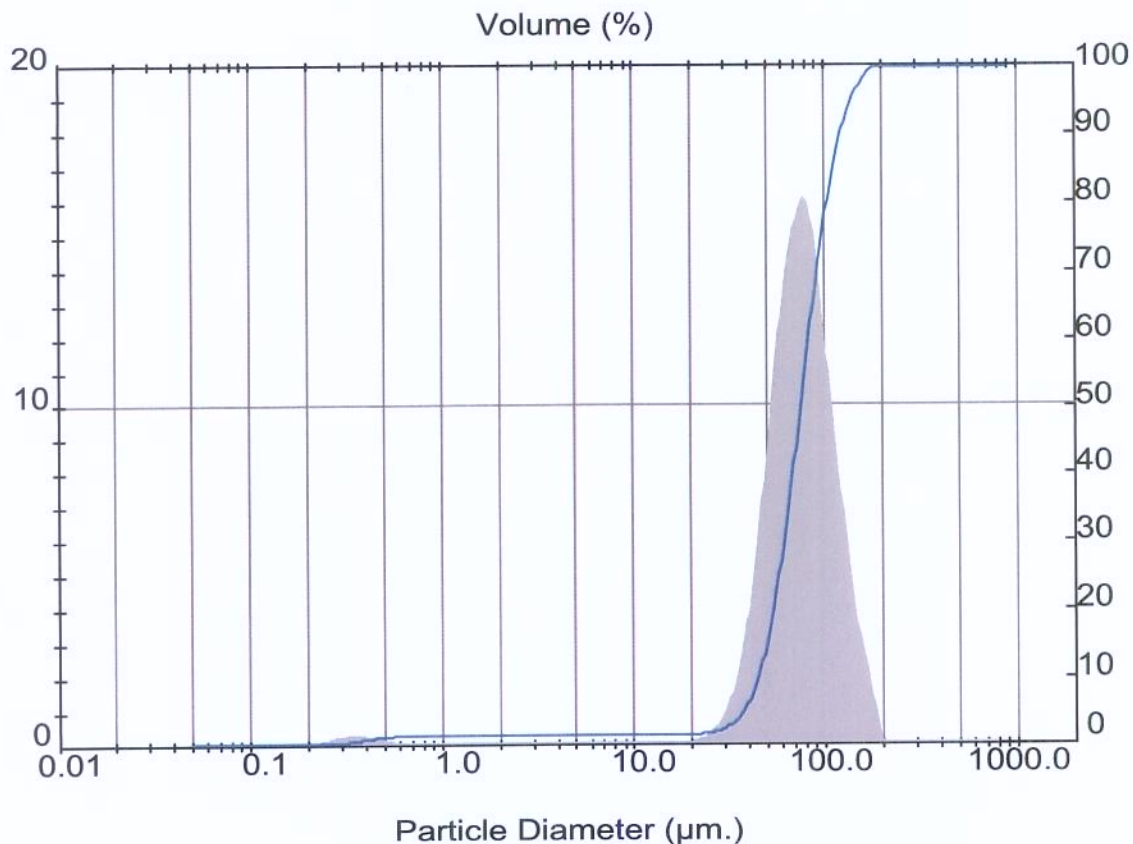
Leitura 2



Result: Analysis Table

ID: 11/11/2006 - rep2		Run No: 2		Measured: 11/9/06 15:30			
File: 111106		Rec. No: 12		Analysed: 11/9/06 15:30			
Path: C:\USUARIOS\MARIO\				Source: Analysed			
Range: 300RF mm		Beam: 2.40 mm		Sampler: MS14			
Presentation: 3OHD		Analysis: Polydisperse		Obs': 12.4 %			
Modifications: None				Residual: 0.581 %			
Conc. = 0.0662 %Vol		Density = 1.120 g/cm^3		S.S.A. = 0.3128 m^2/g			
Distribution: Volume		D[4, 3] = 78.93 um		D[3, 2] = 17.13 um			
D(v, 0.1) = 44.86 um		D(v, 0.5) = 75.20 um		D(v, 0.9) = 120.81 um			
Span = 1.010E+00		Uniformity = 3.190E-01					
Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%
0.05	0.00	0.67	1.49	9.00	1.51	120.67	89.94
0.06	0.00	0.78	1.50	10.48	1.51	140.58	95.97
0.07	0.00	0.91	1.51	12.21	1.51	163.77	99.32
0.08	0.00	1.06	1.51	14.22	1.51	190.80	100.00
0.09	0.00	1.24	1.51	16.57	1.51	222.28	100.00
0.11	0.00	1.44	1.51	19.31	1.55	258.95	100.00
0.13	0.00	1.68	1.51	22.49	1.66	301.68	100.00
0.15	0.00	1.95	1.51	26.20	1.95	351.46	100.00
0.17	0.01	2.28	1.51	30.53	2.64	409.45	100.00
0.20	0.03	2.65	1.51	35.56	4.16	477.01	100.00
0.23	0.11	3.09	1.51	41.43	7.32	555.71	100.00
0.27	0.26	3.60	1.51	48.27	13.26	647.41	100.00
0.31	0.50	4.19	1.51	56.23	22.83	754.23	100.00
0.36	0.80	4.88	1.51	65.51	36.07	878.67	100.00
0.42	1.08	5.69	1.51	76.32	51.55		
0.49	1.30	6.63	1.51	88.91	67.52		
0.58	1.43	7.72	1.51	103.58	80.55		

Leitura 3



Result: Analysis Table

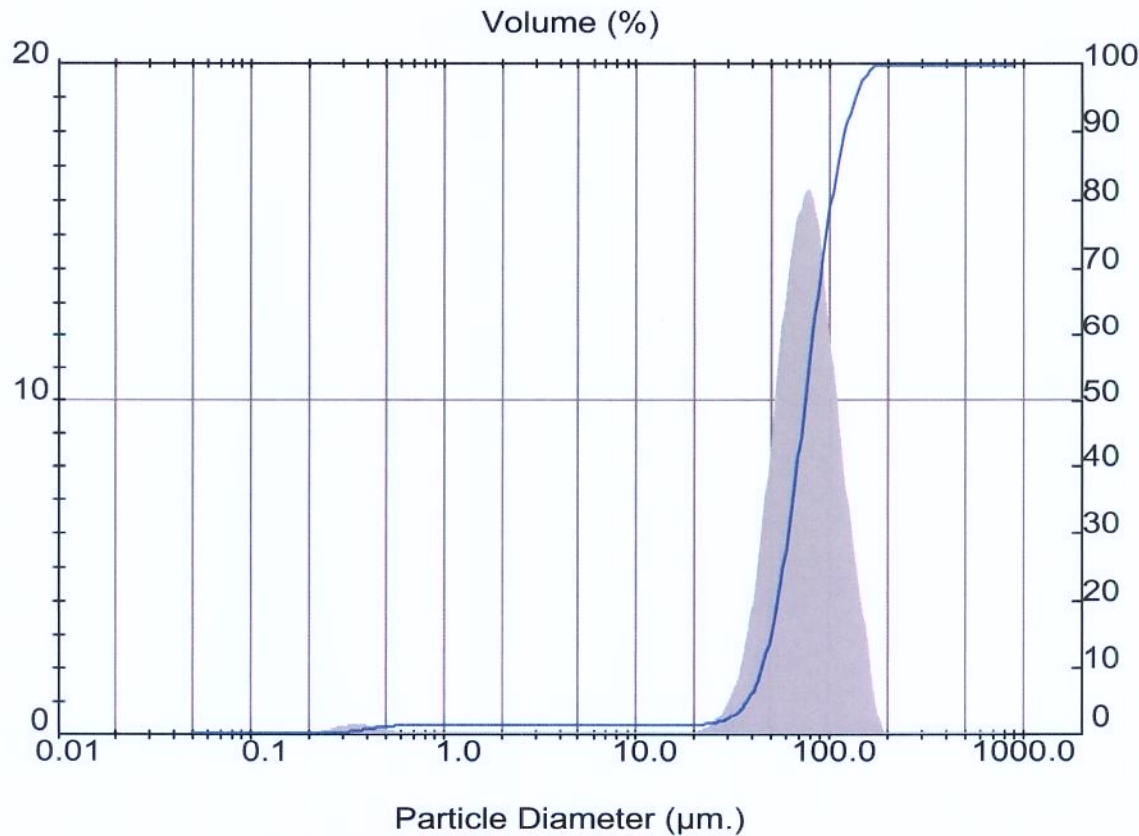
ID: 11/11/2006 - rep2	Run No: 3	Measured: 11/9/06 15:31
File: 111106	Rec. No: 13	Analysed: 11/9/06 15:31
Path: C:\USUARIOS\MARIO\		Source: Analysed

Range: 300RF mm	Beam: 2.40 mm	Sampler: MS14	Obs*: 12.1 %
Presentation: 3OHD	Analysis: Polydisperse		Residual: 0.551 %
Modifications: None			

Conc. = 0.0647 %Vol	Density = 1.120 g/cm ³	S.S.A. = 0.3094 m ² /g
Distribution: Volume	D[4, 3] = 79.42 µm	D[3, 2] = 17.31 µm
D(v, 0.1) = 44.82 µm	D(v, 0.5) = 75.18 µm	D(v, 0.9) = 122.16 µm
Span = 1.029E+00	Uniformity = 3.260E-01	

Size (µm)	Volume Under%	Size (µm)	Volume Under%	Size (µm)	Volume Under%	Size (µm)	Volume Under%
0.05	0.00	0.67	1.48	9.00	1.50	120.67	89.42
0.06	0.00	0.78	1.49	10.48	1.50	140.58	95.29
0.07	0.00	0.91	1.50	12.21	1.50	163.77	98.52
0.08	0.00	1.06	1.50	14.22	1.50	190.80	100.00
0.09	0.00	1.24	1.50	16.57	1.50	222.28	100.00
0.11	0.00	1.44	1.50	19.31	1.54	258.95	100.00
0.13	0.00	1.68	1.50	22.49	1.65	301.68	100.00
0.15	0.00	1.95	1.50	26.20	1.95	351.46	100.00
0.17	0.01	2.28	1.50	30.53	2.64	409.45	100.00
0.20	0.03	2.65	1.50	35.56	4.17	477.01	100.00
0.23	0.10	3.09	1.50	41.43	7.34	555.71	100.00
0.27	0.25	3.60	1.50	48.27	13.29	647.41	100.00
0.31	0.49	4.19	1.50	56.23	22.89	754.23	100.00
0.36	0.78	4.88	1.50	65.51	36.14	878.67	100.00
0.42	1.06	5.69	1.50	76.32	51.58		
0.49	1.28	6.63	1.50	88.91	67.41		
0.58	1.42	7.72	1.50	103.58	80.24		

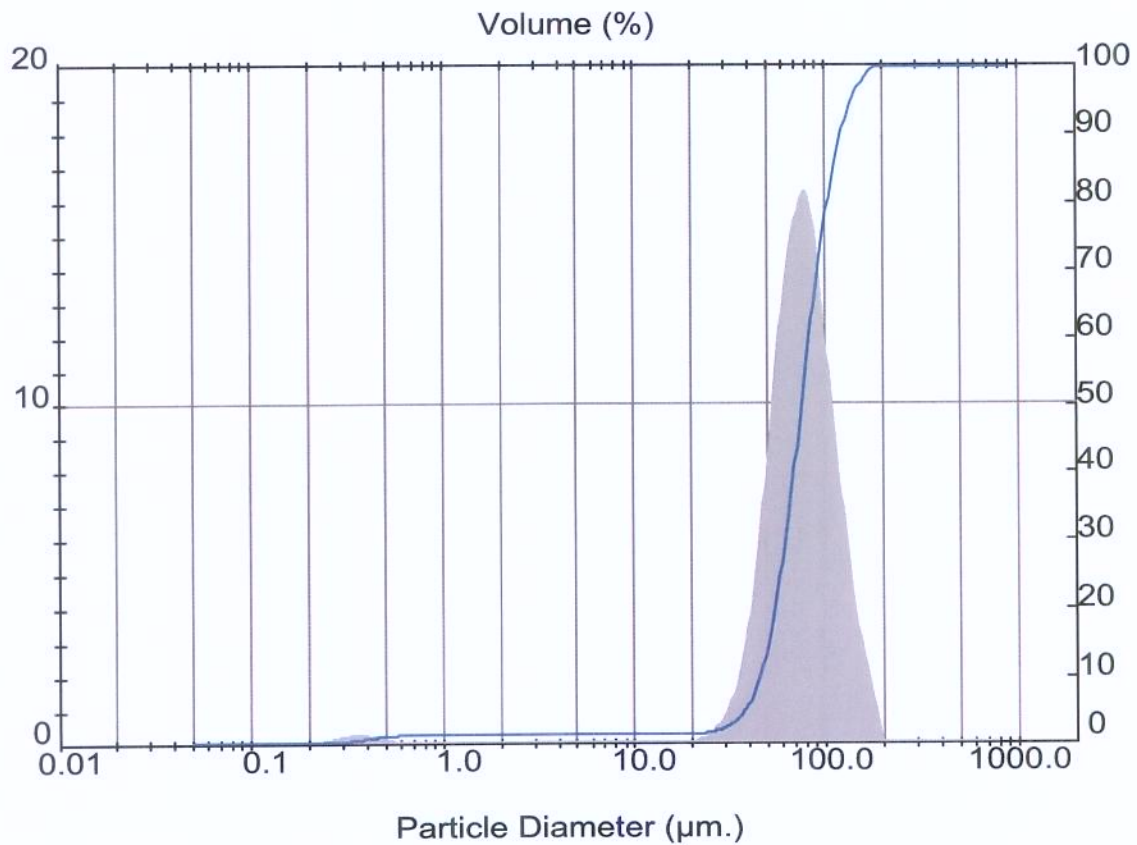
Leitura 4



Result: Analysis Table

ID: 11/11/2006 - rep2		Run No: 4		Measured: 11/9/06 15:31			
File: 111106		Rec. No: 14		Analysed: 11/9/06 15:31			
Path: C:\USUARIOS\MARIO\		Source: Analysed					
Range: 300RF mm		Beam: 2.40 mm	Sampler: MS14		Obs': 12.1 %		
Presentation: 3OHD		Analysis: Polydisperse		Residual: 0.540 %			
Modifications: None							
Conc. = 0.0641 %Vol		Density = 1.120 g/cm^3		S.S.A. = 0.3101 m^2/g			
Distribution: Volume		D[4, 3] = 78.50 um		D[3, 2] = 17.28 um			
D(v, 0.1) = 44.84 um		D(v, 0.5) = 74.73 um		D(v, 0.9) = 120.04 um			
Span = 1.006E+00		Uniformity = 3.175E-01					
Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%
0.05	0.00	0.67	1.48	9.00	1.51	120.67	90.26
0.06	0.00	0.78	1.50	10.48	1.51	140.58	96.11
0.07	0.00	0.91	1.50	12.21	1.51	163.77	99.35
0.08	0.00	1.06	1.51	14.22	1.51	190.80	100.00
0.09	0.00	1.24	1.51	16.57	1.51	222.28	100.00
0.11	0.00	1.44	1.51	19.31	1.54	258.95	100.00
0.13	0.00	1.68	1.51	22.49	1.65	301.68	100.00
0.15	0.00	1.95	1.51	26.20	1.94	351.46	100.00
0.17	0.01	2.28	1.51	30.53	2.63	409.45	100.00
0.20	0.03	2.65	1.51	35.56	4.15	477.01	100.00
0.23	0.10	3.09	1.51	41.43	7.32	555.71	100.00
0.27	0.24	3.60	1.51	48.27	13.30	647.41	100.00
0.31	0.48	4.19	1.51	56.23	23.02	754.23	100.00
0.36	0.78	4.88	1.51	65.51	36.52	878.67	100.00
0.42	1.06	5.69	1.51	76.32	52.23		
0.49	1.29	6.63	1.51	88.91	68.25		
0.58	1.42	7.72	1.51	103.58	81.11		

Leitura 5

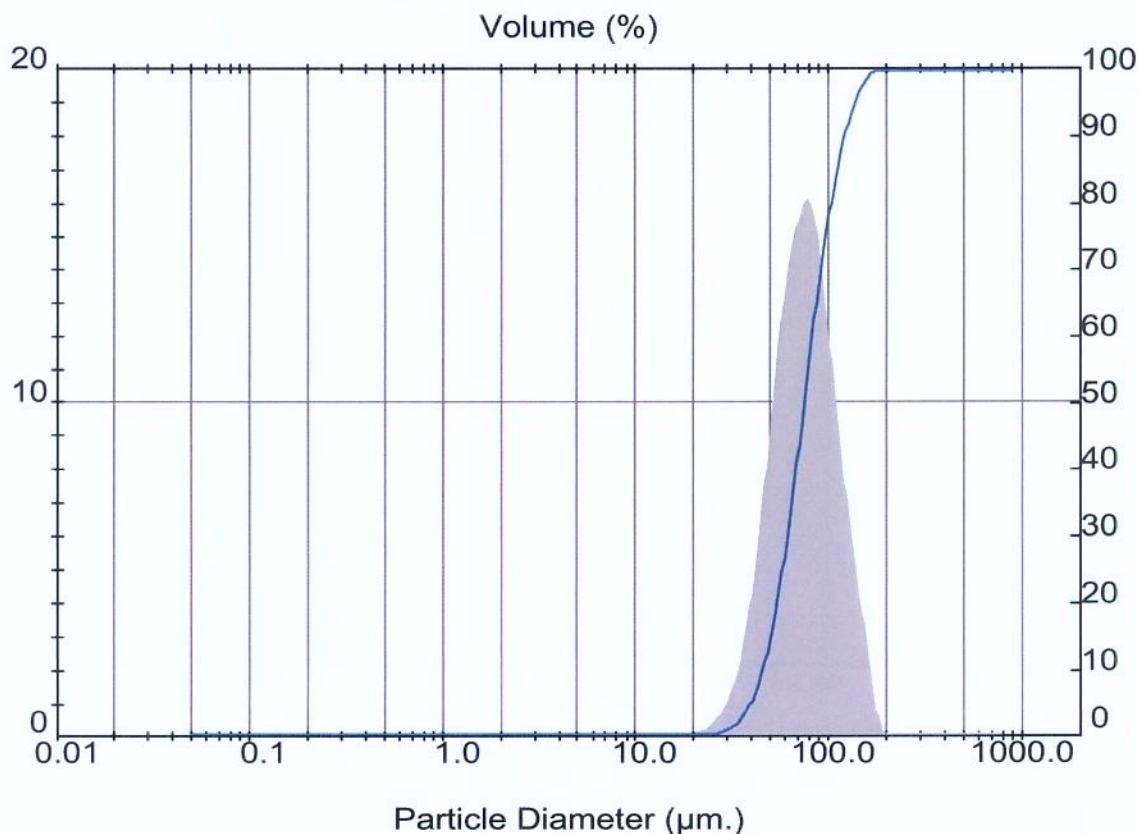


Result: Analysis Table

ID: 11/11/2006 - rep2		Run No: 5		Measured: 11/9/06 15:32			
File: 111106		Rec. No: 15		Analysed: 11/9/06 15:32			
Path: C:\USUARIOS\MARIO\				Source: Analysed			
Range: 300RF mm		Beam: 2.40 mm		Sampler: MS14			
Presentation: 3OHD		Analysis: Polydisperse		Obs': 12.1 %			
Modifications: None				Residual: 0.434 %			
Conc. = 0.0651 %Vol		Density = 1.120 g/cm^3		S.S.A. = 0.3003 m^2/g			
Distribution: Volume		D[4, 3] = 79.35 um		D[3, 2] = 17.84 um			
D(v, 0.1) = 45.18 um		D(v, 0.5) = 75.19 um		D(v, 0.9) = 121.46 um			
Span = 1.015E+00		Uniformity = 3.218E-01					
Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%
0.05	0.00	0.67	1.45	9.00	1.47	120.67	89.70
0.06	0.00	0.78	1.46	10.48	1.47	140.58	95.47
0.07	0.00	0.91	1.47	12.21	1.47	163.77	98.60
0.08	0.00	1.06	1.47	14.22	1.47	190.80	100.00
0.09	0.00	1.24	1.47	16.57	1.47	222.28	100.00
0.11	0.00	1.44	1.47	19.31	1.51	258.95	100.00
0.13	0.00	1.68	1.47	22.49	1.62	301.68	100.00
0.15	0.00	1.95	1.47	26.20	1.91	351.46	100.00
0.17	0.00	2.28	1.47	30.53	2.57	409.45	100.00
0.20	0.02	2.65	1.47	35.56	4.03	477.01	100.00
0.23	0.08	3.09	1.47	41.43	7.09	555.71	100.00
0.27	0.21	3.60	1.47	48.27	12.93	647.41	100.00
0.31	0.44	4.19	1.47	56.23	22.50	754.23	100.00
0.36	0.73	4.88	1.47	65.51	35.90	878.67	100.00
0.42	1.02	5.69	1.47	76.32	51.59		
0.49	1.25	6.63	1.47	88.91	67.65		
0.58	1.39	7.72	1.47	103.58	80.55		

Replicata 3

Leitura 1



Result: Analysis Table

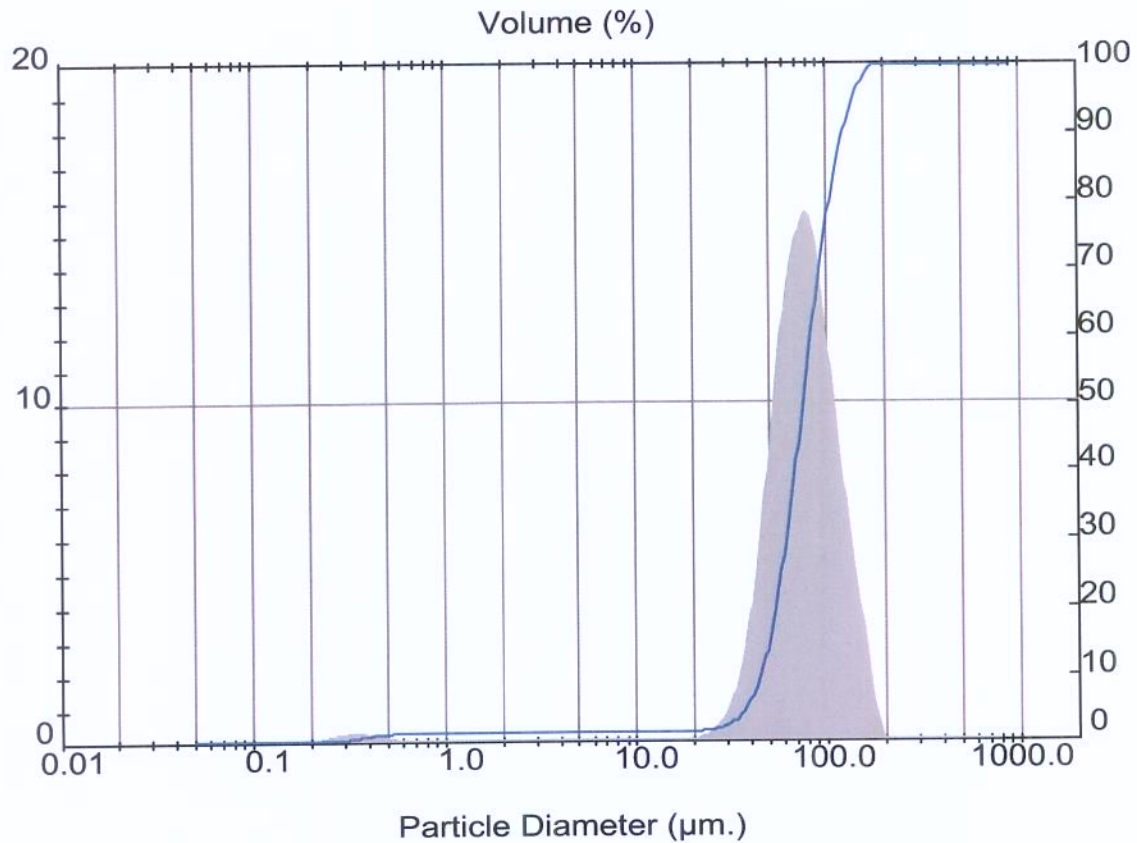
ID: 11/11/2006 - rep3	Run No: 1	Measured: 11/9/06 15:51
File: 111106	Rec. No: 21	Analysed: 11/9/06 15:51
Path: C:\USUARIOS\MARIO\		Source: Analysed

Range: 300RF mm	Beam: 2.40 mm	Sampler: MS14	Obs': 12.8 %
Presentation: 3OHD	Analysis: Polydisperse		Residual: 0.805 %
Modifications: None			

Conc. = 0.1306 %Vol	Density = 1.120 g/cm ³	S.S.A. = 0.0774 m ² /g
Distribution: Volume	D[4, 3] = 79.82 µm	D[3, 2] = 69.23 µm
D(v, 0.1) = 45.78 µm	D(v, 0.5) = 75.19 µm	D(v, 0.9) = 121.49 µm
Span = 1.007E+00	Uniformity = 3.123E-01	

Size (µm)	Volume Under%	Size (µm)	Volume Under%	Size (µm)	Volume Under%	Size (µm)	Volume Under%
0.05	0.00	0.67	0.00	9.00	0.00	120.67	89.67
0.06	0.00	0.78	0.00	10.48	0.00	140.58	95.73
0.07	0.00	0.91	0.00	12.21	0.00	163.77	99.18
0.08	0.00	1.06	0.00	14.22	0.00	190.80	100.00
0.09	0.00	1.24	0.00	16.57	0.00	222.28	100.00
0.11	0.00	1.44	0.00	19.31	0.04	258.95	100.00
0.13	0.00	1.68	0.00	22.49	0.15	301.68	100.00
0.15	0.00	1.95	0.00	26.20	0.46	351.46	100.00
0.17	0.00	2.28	0.00	30.53	1.20	409.45	100.00
0.20	0.00	2.65	0.00	35.56	2.84	477.01	100.00
0.23	0.00	3.09	0.00	41.43	6.25	555.71	100.00
0.27	0.00	3.60	0.00	48.27	12.58	647.41	100.00
0.31	0.00	4.19	0.00	56.23	22.58	754.23	100.00
0.36	0.00	4.88	0.00	65.51	36.08	878.67	100.00
0.42	0.00	5.69	0.00	76.32	51.56		
0.49	0.00	6.63	0.00	88.91	67.40		
0.58	0.00	7.72	0.00	103.58	80.32		

Leitura 2

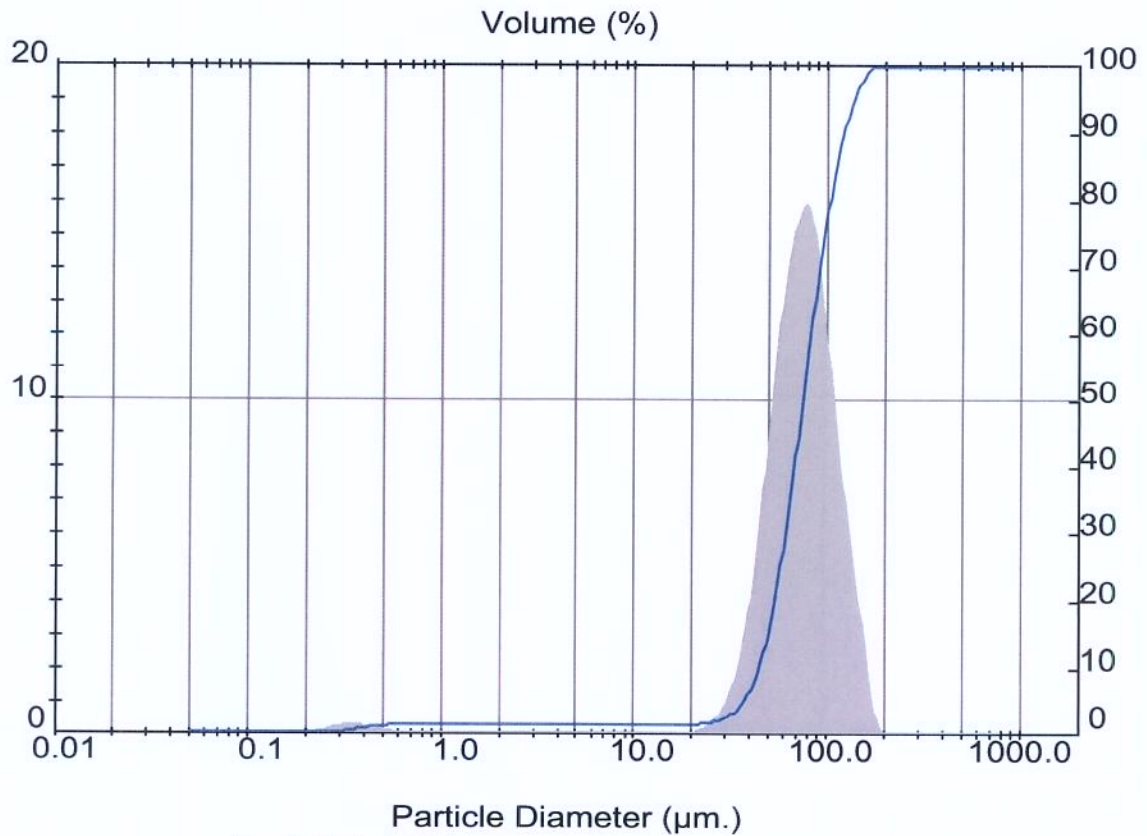


Result: Analysis Table

ID: 11/11/2006 - rep3		Run No: 2		Measured: 11/9/06 15:51	
File: 111106		Rec. No: 22		Analysed: 11/9/06 15:51	
Path: C:\USUARIOS\MARIO\				Source: Analysed	
Range: 300RF mm		Beam: 2.40 mm		Sampler: MS14	
Presentation: 3OHD		Analysis: Polydisperse		Obs': 12.7 %	
Modifications: None				Residual: 0.717 %	
Conc. = 0.0669 %Vol		Density = 1.120 g/cm^3		S.S.A. = 0.3232 m^2/g	
Distribution: Volume		D[4, 3] = 79.30 um		D[3, 2] = 16.58 um	
D(v, 0.1) = 44.49 um		D(v, 0.5) = 75.07 um		D(v, 0.9) = 122.82 um	
Span = 1.044E+00		Uniformity = 3.291E-01			

Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%
0.05	0.00	0.67	1.53	9.00	1.55	120.67	89.14
0.06	0.00	0.78	1.54	10.48	1.55	140.58	95.32
0.07	0.00	0.91	1.55	12.21	1.55	163.77	98.94
0.08	0.00	1.06	1.55	14.22	1.55	190.80	100.00
0.09	0.00	1.24	1.55	16.57	1.55	222.28	100.00
0.11	0.00	1.44	1.55	19.31	1.59	258.95	100.00
0.13	0.00	1.68	1.55	22.49	1.69	301.68	100.00
0.15	0.00	1.95	1.55	26.20	1.98	351.46	100.00
0.17	0.01	2.28	1.55	30.53	2.69	409.45	100.00
0.20	0.05	2.65	1.55	35.56	4.27	477.01	100.00
0.23	0.13	3.09	1.55	41.43	7.55	555.71	100.00
0.27	0.30	3.60	1.55	48.27	13.68	647.41	100.00
0.31	0.55	4.19	1.55	56.23	23.44	754.23	100.00
0.36	0.85	4.88	1.55	65.51	36.61	878.67	100.00
0.42	1.12	5.69	1.55	76.32	51.68		
0.49	1.33	6.63	1.55	88.91	67.13		
0.58	1.47	7.72	1.55	103.58	79.82		

Leitura 3



Result: Analysis Table

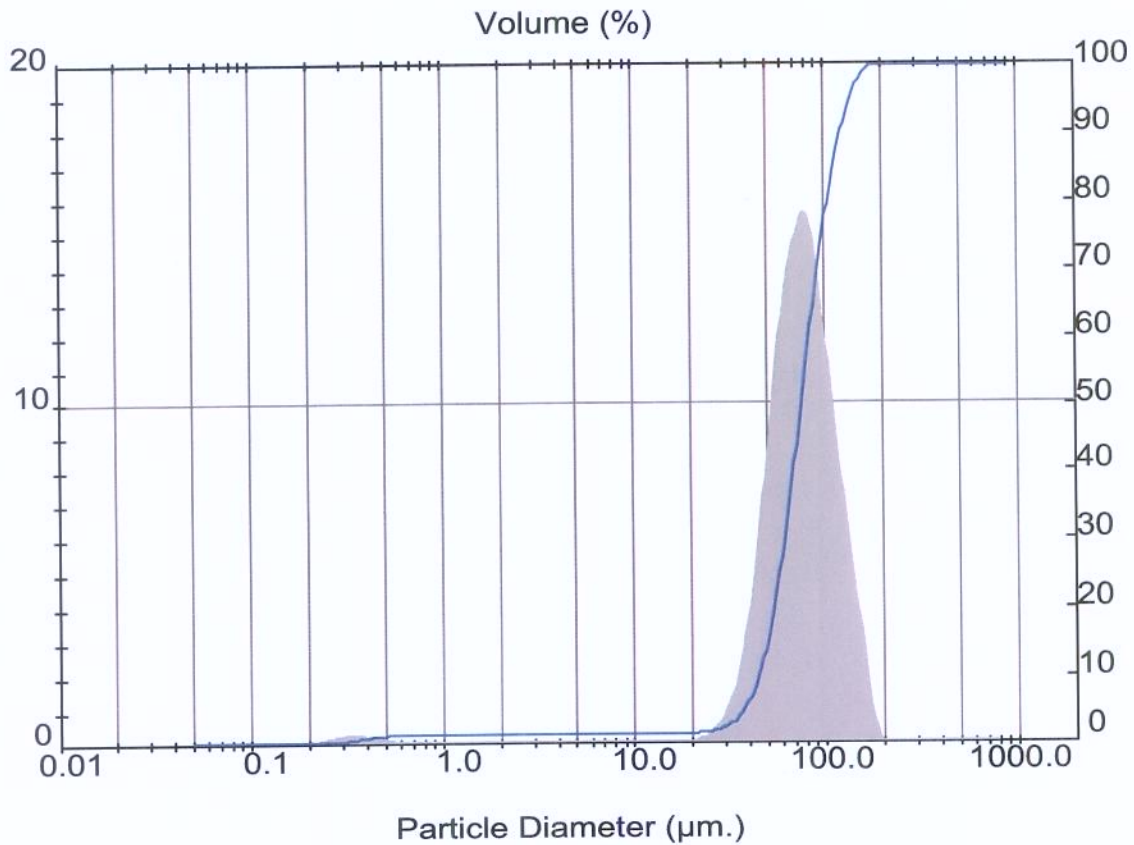
ID: 11/11/2006 - rep3		Run No: 3		Measured: 11/9/06 15:52	
File: 111106		Rec. No: 23		Analysed: 11/9/06 15:52	
Path: C:\USUARIOS\MARIO\				Source: Analysed	

Range: 300RF mm		Beam: 2.40 mm		Sampler: MS14		Obs': 12.7 %	
Presentation: 30HD		Analysis: Polydisperse				Residual: 0.695 %	
Modifications: None							

Conc. = 0.0667 %Vol		Density = 1.120 g/cm^3		S.S.A. = 0.3232 m^2/g	
Distribution: Volume		D[4, 3] = 78.63 um		D[3, 2] = 16.57 um	
D(v, 0.1) = 44.54 um		D(v, 0.5) = 74.73 um		D(v, 0.9) = 120.86 um	
Span = 1.021E+00		Uniformity = 3.226E-01			

Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%
0.05	0.00	0.67	1.53	9.00	1.56	120.67	89.93
0.06	0.00	0.78	1.55	10.48	1.56	140.58	95.92
0.07	0.00	0.91	1.56	12.21	1.56	163.77	99.28
0.08	0.00	1.06	1.56	14.22	1.56	190.80	100.00
0.09	0.00	1.24	1.56	16.57	1.56	222.28	100.00
0.11	0.00	1.44	1.56	19.31	1.59	258.95	100.00
0.13	0.00	1.68	1.56	22.49	1.70	301.68	100.00
0.15	0.00	1.95	1.56	26.20	1.99	351.46	100.00
0.17	0.01	2.28	1.56	30.53	2.68	409.45	100.00
0.20	0.04	2.65	1.56	35.56	4.24	477.01	100.00
0.23	0.12	3.09	1.56	41.43	7.51	555.71	100.00
0.27	0.29	3.60	1.56	48.27	13.64	647.41	100.00
0.31	0.54	4.19	1.56	56.23	23.48	754.23	100.00
0.36	0.84	4.88	1.56	65.51	36.84	878.67	100.00
0.42	1.12	5.69	1.56	76.32	52.19		
0.49	1.34	6.63	1.56	88.91	67.87		
0.58	1.47	7.72	1.56	103.58	80.65		

Leitura 4

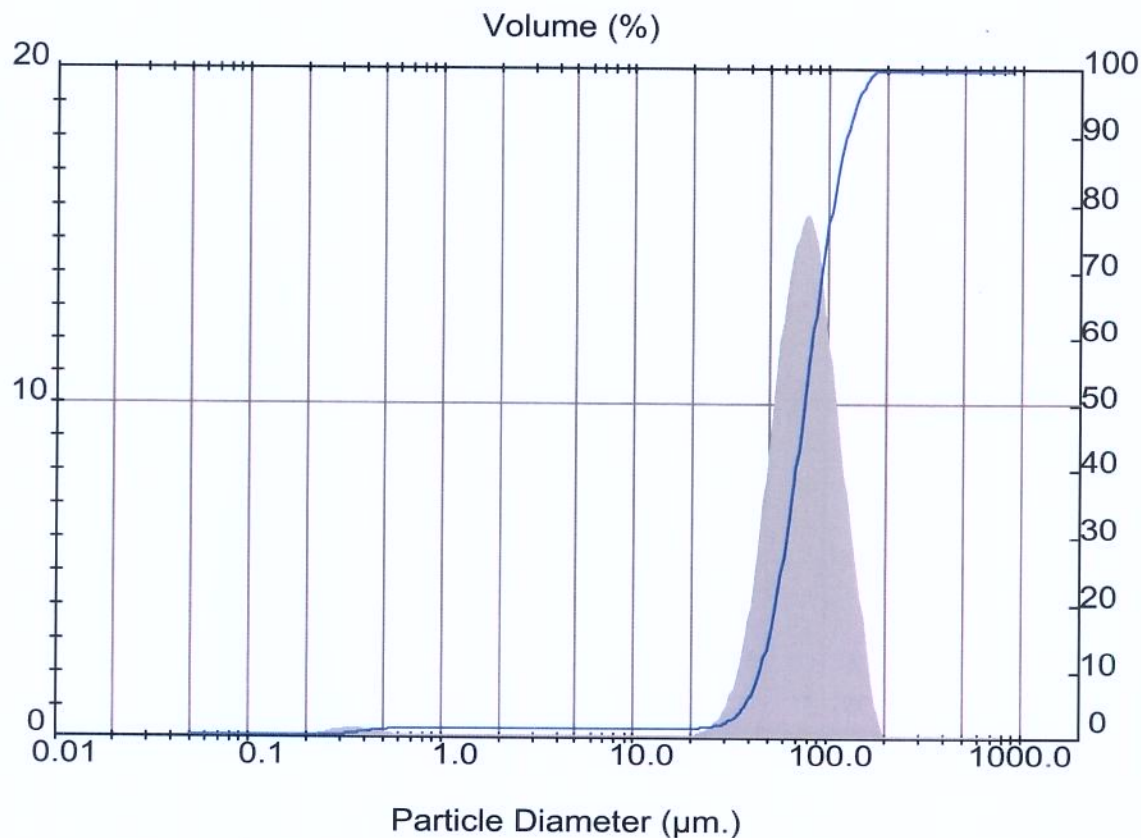


Result: Analysis Table

ID: 11/11/2006 - rep3		Run No: 4		Measured: 11/9/06 15:52	
File: 111106		Rec. No: 24		Analysed: 11/9/06 15:52	
Path: C:\USUARIOS\MARIO\				Source: Analysed	
Range: 300RF mm		Beam: 2.40 mm	Sampler: MS14		Obs': 12.7 %
Presentation: 3OHD		Analysis: Polydisperse		Residual: 0.722 %	
Modifications: None					
Conc. = 0.0666 %Vol		Density = 1.120 g/cm^3		S.S.A. = 0.3259 m^2/g	
Distribution: Volume		D[4, 3] = 79.46 um		D[3, 2] = 16.44 um	
D(v, 0.1) = 44.59 um		D(v, 0.5) = 75.45 um		D(v, 0.9) = 122.74 um	
Span = 1.036E+00		Uniformity = 3.270E-01			

Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%
0.05	0.00	0.67	1.54	9.00	1.57	120.67	89.15
0.06	0.00	0.78	1.56	10.48	1.57	140.58	95.48
0.07	0.00	0.91	1.57	12.21	1.57	163.77	99.09
0.08	0.00	1.06	1.57	14.22	1.57	190.80	100.00
0.09	0.00	1.24	1.57	16.57	1.57	222.28	100.00
0.11	0.00	1.44	1.57	19.31	1.60	258.95	100.00
0.13	0.00	1.68	1.57	22.49	1.71	301.68	100.00
0.15	0.00	1.95	1.57	26.20	2.00	351.46	100.00
0.17	0.01	2.28	1.57	30.53	2.71	409.45	100.00
0.20	0.05	2.65	1.57	35.56	4.27	477.01	100.00
0.23	0.13	3.09	1.57	41.43	7.51	555.71	100.00
0.27	0.30	3.60	1.57	48.27	13.53	647.41	100.00
0.31	0.56	4.19	1.57	56.23	23.13	754.23	100.00
0.36	0.86	4.88	1.57	65.51	36.15	878.67	100.00
0.42	1.13	5.69	1.57	76.32	51.16		
0.49	1.35	6.63	1.57	88.91	66.68		
0.58	1.48	7.72	1.57	103.58	79.58		

Leitura 5



Result: Analysis Table

ID: 11/11/2006 - rep3		Run No: 5		Measured: 11/9/06 15:53	
File: 111106		Rec. No: 25		Analysed: 11/9/06 15:53	
Path: C:\USUARIOS\MARIO\				Source: Analysed	
Range: 300RF mm		Beam: 2.40 mm		Sampler: MS14	
Presentation: 30HD		Analysis: Polydisperse		Obs': 12.6 %	
Modifications: None				Residual: 0.647 %	
Conc. = 0.0670 %Vol		Density = 1.120 g/cm^3		S.S.A = 0.3189 m^2/g	
Distribution: Volume		D[4, 3] = 79.78 um		D[3, 2] = 16.80 um	
D(v, 0.1) = 44.83 um		D(v, 0.5) = 75.66 um		D(v, 0.9) = 123.33 um	
Span = 1.037E+00		Uniformity = 3.273E-01			
Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%
0.05	0.00	0.67	1.52	9.00	1.54
0.06	0.00	0.78	1.53	10.48	1.54
0.07	0.00	0.91	1.54	12.21	1.54
0.08	0.00	1.06	1.54	14.22	1.54
0.09	0.00	1.24	1.54	16.57	1.54
0.11	0.00	1.44	1.54	19.31	1.58
0.13	0.00	1.68	1.54	22.49	1.68
0.15	0.00	1.95	1.54	26.20	1.96
0.17	0.01	2.28	1.54	30.53	2.64
0.20	0.04	2.65	1.54	35.56	4.16
0.23	0.12	3.09	1.54	41.43	7.33
0.27	0.28	3.60	1.54	48.27	13.28
0.31	0.53	4.19	1.54	56.23	22.84
0.36	0.83	4.88	1.54	65.51	35.85
0.42	1.10	5.69	1.54	76.32	50.88
0.49	1.32	6.63	1.54	88.91	66.42
0.58	1.46	7.72	1.54	103.58	79.32