

---

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO  
ENGENHARIA DE PROCESSOS**

**ANÁLISE DA FLUIDODINÂMICA DE LEITO DE JORRO DURANTE  
O RECOBRIMENTO DE PARTÍCULAS**

**Autora: Melissa Gurgel Adeodato**

**Orientadora: Profª. Drª. Sandra Cristina dos Santos Rocha**

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

Campinas-SP

Maio/2003

**UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE**

UNIDADE:	BC
Nº CHAMADA	UNICAMP
	Ad35a
V	EX
TOMBO BC/	54715
PROC.	29703
C <input type="checkbox"/>	D <input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	22/10/03
Nº CND.	

BIBID. 296578

CM00186325-4

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

Ad35a

Adeodato, Melissa Gurgel

Análise da fluidodinâmica de leito de jorro durante o recobrimento de partículas / Melissa Gurgel Adeodato.-- Campinas, SP: [s.n.], 2003.

Orientador: Sandra Cristina dos Santos Rocha.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Processo de leito de jorro. 2. Dinâmica dos fluidos. 3. Revestimentos. I. Rocha, Sandra Cristina dos Santos. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Esta versão corresponde à redação final da Dissertação de Mestrado defendida pela Engenheira Química Melissa Gurgel Adeodato e aprovada pela banca examinadora em 27 de Maio de 2003.



---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Sandra Cristina dos Santos Rocha

096678211

Dissertação de Mestrado defendida por Melissa Gurgel Adeodato e aprovada em 27 de maio de 2003 pela banca examinadora constituída pelos Professores Doutores:



---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Sandra Cristina dos Santos Rocha  
Orientadora



---

Prof.<sup>o</sup> Dr.<sup>o</sup> Antônio Carlos Euz Lisbôa  
Departamento de Termofluidodinâmica  
Faculdade de Engenharia Química - UNICAMP



---

Prof.<sup>o</sup> Dr.<sup>o</sup> Luiz Alexandre Pedro de Freitas  
Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Ribeirão Preto - USP

Aos meus pais, Fernando e Márcia,  
aos meus tios, Meuris e Laerte,  
e ao meu noivo Fernando.

---

## AGRADECIMENTOS

Foram muitas as pessoas que, de uma forma ou de outra, colaboraram para que este trabalho fosse concluído. Espero que me lembre de todas elas. A vocês, toda a minha gratidão:

- Primeiramente à Deus, pela vida.
- À Profª Sandra Cristina dos Santos Rocha, pela orientação profissional, por ter acreditado em mim e sempre me incentivado.
- Aos meus queridos pais, Fernando e Márcia, por tudo. Obrigada por todo o amor que vocês me dedicaram, por todas as preocupações que eu lhes fiz passar e por todos os sonhos que vocês me ajudaram a realizar.
- Ao meu noivo Fernando, por todo o amor, a compreensão e o carinho nos momentos difíceis.
- Às minhas irmãs, Larissa e Vanessa, e à toda minha família.
- Aos meus tios, Meuris e Laerte, meus pais de Campinas, por todo o apoio e dedicação, sobretudo nos primeiros meses da minha estada em Campinas.
- Aos meus colegas do LFS, Michael, Marta, Virgínia, Osvaldo, Gaúcho, Josy, Mário e Roberto, pela amizade.
- À Prof.ª Marisa Beppu, pela oportunidade do PED.
- Ao Michael Luzio, pela ajuda inestimável durante os experimentos, fonte de alegria e juventude do LFS.
- À Marta Donida, pelo companheirismo.
- Ao Osvaldo Soares, sempre disposto a ajudar a quem quer que seja e a qualquer hora.
- Ao senhor Levi Ismael Madeira, por toda a sua ajuda na parte experimental, além de seus conselhos e sugestões sempre bem vindos.
- À FAPESP, pelo apoio financeiro.

A todos que sempre estiveram ao meu lado, MUITO OBRIGADA!!!

---

## ÍNDICE

<b>RESUMO.....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>ii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>iii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xvii</b>
<b>NOMENCLATURA.....</b>	<b>xviii</b>
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Leito de jorro.....</b>	<b>3</b>
2.1.1. Considerações Gerais.....	3
2.1.2. Condições Necessárias para o Jorro.....	5
2.1.3. O Mecanismo Fluidodinâmico.....	7
2.1.4. Estabilidade do Jorro.....	9
2.1.5. Atrito Inter-Partícula.....	12
<b>2.2. Recobrimento de partículas.....</b>	<b>12</b>
2.2.1. Recobrimento de Partículas em Leito de Jorro.....	14
<b>2.3. Secagem de pastas e suspensões.....</b>	<b>16</b>
<b>2.4. Medidas de taxa de circulação.....</b>	<b>23</b>
<b>2.5. Medidas de concentração e taxa de circulação.....</b>	<b>31</b>
<b>CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>33</b>
<b>3.1. Materiais.....</b>	<b>33</b>
<b>3.2. Caracterização física das partículas.....</b>	<b>33</b>
3.2.1. Diâmetro médio.....	33

---

3.2.2. Esfericidade.....	34
3.2.3. Densidade Aparente da Partícula.....	34
3.2.4. Densidade Volumétrica dos Sólidos.....	35
3.2.5. Densidade Real das Partículas.....	35
3.2.6. Área superficial.....	35
3.2.7. Porosidade.....	36
3.2.8. Ângulo de repouso.....	36
3.2.9. Escoabilidade.....	36
<b>3.3. Definição da Formulação e Preparação da suspensão.....</b>	<b>36</b>
<b>3.4. Caracterização da suspensão.....</b>	<b>38</b>
3.4.1. Massa Específica.....	38
3.4.2. Tensão Superficial.....	38
3.4.3. Reologia.....	39
3.4.4. Ângulo de contato.....	40
<b>3.5. Métodos Experimentais.....</b>	<b>42</b>
3.5.1. Sistema Experimental e Procedimento.....	42
3.5.2. Estudo Fluidodinâmico em leito de jorro a seco.....	45
3.5.3. Estudo Fluidodinâmico com recobrimento.....	47
3.5.3.1. Cálculo do crescimento e da eficiência.....	47
3.5.4. Medida de velocidade de circulação de sólidos no ânulo.....	48
3.5.5. Vazão máxima de suspensão.....	48
<b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>51</b>
<b>4.1. Caracterização das partículas.....</b>	<b>51</b>
<b>4.2. Caracterização da suspensão de recobrimento.....</b>	<b>52</b>

---

4.3. Estudo Fluidodinâmico a seco sem pressão de atomização.....	54
4.4. Estudo Fluidodinâmico a seco com pressão de atomização.....	58
4.5. Estudo Fluidodinâmico com Recobrimento.....	65
4.6. Determinação da vazão máxima de suspensão.....	100
4.7. Estudo Fluidodinâmico em função da Saturação do leito.....	105
<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>111</b>
5.1. Conclusões.....	111
5.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	114
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>115</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>121</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>128</b>
<b>ANEXO C.....</b>	<b>152</b>

---

## RESUMO

Dentre as diversas operações unitárias que visam a modificação de características superficiais de partículas sólidas, o leito de jorro surge como um substituto para o leito fluidizado, sendo aplicado a uma grande variedade de materiais sólidos com dimensões não muito pequenas. A utilização deste equipamento para o recobrimento de partículas, inicialmente empregado na indústria farmacêutica, tem se mostrado bastante promissora, o que motivou vários estudos envolvendo equações básicas para o dimensionamento e aperfeiçoamento desta tecnologia. Esse trabalho investigou a fluidodinâmica do leito de jorro convencional, para o recobrimento de várias partículas (poliestireno, polipropileno, polietileno de baixa densidade, ABS®, placebo e esferas de vidro), e analisou a influência das propriedades físicas das partículas e da suspensão de recobrimento na fluidodinâmica. Utilizou-se uma suspensão polimérica aquosa para os ensaios de recobrimento, empregada em estudos anteriores de recobrimento de placebo (ATAÍDE, 1996), sendo esta caracterizada quanto à tensão superficial, massa específica, reologia e molhabilidade com o sólido (ângulo de contato). Os ensaios fluidodinâmicos com e sem recobrimento foram efetuados em um leito de jorro cônico-cilíndrico já instalado no Laboratório de Fluidodinâmica e Secagem (LFS). Verificou-se que as partículas com um elevado ângulo de contato com a suspensão (PEBD, PS e PP) não apresentaram um recobrimento eficiente e sim apenas a secagem da suspensão. Para as demais partículas (ABS, Placebo e Esferas de vidro), obteve-se recobrimentos com eficiências na faixa de 40 a 90%. A forma geométrica, o ângulo de repouso e a densidade das partículas também apresentaram um efeito na fluidodinâmica do recobrimento, tendo influência no atrito inter-partícula e na velocidade de circulação das mesmas no ânulo. Determinou-se também a máxima vazão de suspensão que o leito suporta para estas três partículas nas condições de operação estabelecidas a partir de testes preliminares. Juntamente, foram feitas medidas da velocidade dos sólidos no interior do leito, com o objetivo de se correlacionar esta taxa de circulação com o grau de saturação do leito. Verificou-se que a circulação das partículas no leito está relacionada com o grau de saturação do leito. Em leitos com maior grau de saturação, as partículas ficam mais pesadas e a velocidade das mesmas no ânulo decresce.

---

## ABSTRACT

Among the several unit operations that seek the modification of superficial characteristics of solid particles, the spouted bed appears as a substitute for the fluidized bed, to process a great variety of coarse solid materials. The use of this technique for the particle coating, initially employed in the pharmaceutical industry, is promising, which motivated several studies involving basic equations for the design and improvement of this technology. This work investigated the fluid-dynamics of the conventional spouted bed during a coating process, using several inert particles such as polystyrene, polypropilene, polyethilene of low density, ABS®, tablet and glass beads, and analyzed the influence of the physical properties of the particles and of the coating suspension on the fluid-dynamics. An aqueous polymeric suspension was used in the coating experiments. The suspension formulation is the same used in previous studies of coating of tablets (ATAÍDE, 1996). The suspension was characterized by the surface tension, specific mass, rheology and contact angle between the suspension and the solid surface. The fluid-dynamics essays with and without coating were made in a conical-cylindrical spouted bed already installed in the Laboratory of Fluid-dynamics and Drying (LFS). It was verified that the particles having a high contact angle with the suspension (polystyrene, polypropilene and polyethilene of low density) did not present an efficient coating, but only the drying of the suspension. For the other particles (ABS, Placebo and Glass Spheres), it was obtained coatings with efficiencies in the range of 40 to 90%. The shape, angle of repose and density of particles affected the fluid-dynamic during the coating, and also the inter-particle friction and the particle circulation velocity in the annulus. It was also determined the maximum suspension flow supported by the bed for these three particles, at operating conditions established at preliminary tests. The solids velocity inside the spouted bed was also measured in order to correlate this circulation rate with the saturation degree of the bed. It was verified that the circulation of the particles in the bed is related with the saturation grade in the bed. In beds with higher saturation degrees, the particles are heavier and their velocities in the annulus decrease.

---

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 2.1. - Esquema de um leito de jorro (MATHUR e EPSTEIN, 1974).....4

Figura 2.2. -Transição de Fase com o Aumento da Velocidade do Fluido (MATHUR e EPSTEIN, 1974).....5

Figura 2.3. -Diagrama de regime, trigo,  $d_p = 3,2 \times 6,4 \text{ mm}$ ,  $D_c = 15,2 \text{ cm}$ ,  $D_i = 1,25 \text{ cm}$  (MATHUR e EPSTEIN, 1974).....6

Figura 2.4.-Curva típica de queda de pressão *versus* velocidade do ar (MATHUR e EPSTEIN, 1974).....7

Figura 2.5 - Diagrama simplificado de classificação de partículas para fluidização através de ar em condições normais GELDART (1986).....15

Figura 3.1.- Detalhe do anel do tensiômetro de DuNoüy (Castellan, 1996).....38

Figura 3.2.- Esquema do tensiômetro de DuNoüy.....39

Figura 3.3 – Ângulo de contato do sistema sólido-líquido-vapor.....41

Figura 3.4.- Esquema do sistema experimental.....43

Figura 3.5.- Esquema do leito de jorro.....44

Figura 4.1.- Ângulo de contato entre a superfície da partícula e a gota de líquido.....53

Figura 4.2.- Curva Fluidodinâmica a seco do ABS para as cargas mássicas de 500g, 1000g e 1400g.....54

Figura 4.3.- Curva Fluidodinâmica a seco do PS para as cargas mássicas de 1000g , 1400g e 1700g.....55

Figura 4.4.- Curva Fluidodinâmica a seco do PEBD para as cargas mássicas de 500g, 1000g e 1400g.....55

Figura 4.5.- Curva Fluidodinâmica a seco do PP para as cargas mássicas de 1000g e 1400g.....56

Figura 4.6.- Curva Fluidodinâmica a seco do Placebo para a carga mássica de 1800g.....56

Figura 4.7.- Curva Fluidodinâmica a seco da a Esfera de vidro para as cargas mássicas de 3300g, 4300g e 4500g.....57

Figura 4.8.- Curva de altura do ânulo em leito seco para a Esfera de vidro.....59

Figura 4.9.- Curva de queda de pressão do leito *versus* vazão de ar para a Esfera de vidro.....59

Figura 4.10.- Curva de altura de fonte <i>versus</i> vazão de ar para a Esfera de vidro.....	60
Figura 4.11.- Curva de altura de leito <i>versus</i> vazão de ar para a Esfera de vidro.....	60
Figura 4.12: Comparação entre a curva de queda de pressão e de altura do ânulo do PS....	61
Figura 4.13: Comparação entre a curva de queda de pressão e de altura do ânulo da esfera de vidro.....	62
Figura 4.14.- Curva de queda de pressão <i>versus</i> vazão de ar sob pressão de atomização para a Esfera de vidro.....	63
Figura 4.15.- Curva de altura de ânulo <i>versus</i> vazão de ar sob pressão de atomização.....	63
Figura 4.16.- Curva de altura de leito <i>versus</i> vazão de ar sob pressão de atomização.....	64
Figura 4.17.- Curva de altura de fonte <i>versus</i> vazão de ar sob pressão de atomização.....	64
Figura 4.18.- Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do PEBD.....	66
Figura 4.19.- Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leito e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do PEBD.....	67
Figura 4.20.- Vazão de ar de jorro, altura do leito, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do PEBD.....	67
Figura 4.21.- Vazão do ar de jorro, queda de pressão do leito, altura da fonte e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do PEBD.....	68
Figura 4.22.- Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento do PEBD.....	68
Figura 4.23.- Partículas de PEBD antes e após o recobrimento em microscópio óptico com ampliação de 40 x.....	69
Figura 4.24.- Temperatura do ânulo e de entrada e saída do ar, umidade de entrada e de saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do PP.....	70
Figura 4.25.- Vazão de ar de jorro, queda de pressão do leito, altura da fonte e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do PP.....	70
Figura 4.26.- Vazão de ar de jorro, altura da fonte, do ânulo e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do PP.....	71

Figura 4.27: Vazão de ar de jorro, temperatura do ânulo, umidade e temperatura do ar de saída do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do PP.....	71
Figura 4.28.- Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento do PP.....	72
Figura 4.29.– Partículas de PP recobertas e não recobertas em microscópio óptico com ampliação de 40 x.....	72
Figura 4.30. - Curva de umidade de saída do ar para o PS-1 no recobrimento-1.....	74
Figura 4.31.- Temperatura do ânulo e de entrada e saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do PS.....	76
Figura 4.32.- Vazão de ar de jorro, temperatura do ânulo, umidade e temperatura do ar de saída do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do PS.....	77
Figura 4.33.- Vazão de ar de jorro, altura da fonte, do ânulo e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do PS.....	78
Figura 4.34.- Vazão de ar de jorro, queda de pressão do leito, altura da fonte e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do PS.....	78
Figura 4.35.- Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento do OS.....	79
Figura 4.36.– Partículas de PS recobertas e não recobertas em microscópio óptico com ampliação de 40x.....	79
Figura 4.37.- Curva de umidade de saída do ar para o ABS-3 no recobrimento-1.....	81
Figura 4.38.- Curva de umidade de saída do ar para o ABS-2 no recobrimento-2.....	83
Figura 4.39.- Curva de umidade de saída do ar para o ABS-3 no recobrimento-2.....	83
Figura 4.40.- Temperatura de entrada e de saída do ar e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento-3 para os ensaios ABS-1 e ABS-2.....	85
Figura 4.41.- Altura do ânulo, do leito e da fonte em função do tempo de processo durante o recobrimento-3 para os ensaios ABS-1 e ABS-2.....	85
Figura 4.42.- Vazão de ar de jorro e queda de pressão do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento-3 para os ensaios ABS-1 e ABS-2.....	86

---

Figura 4.43.- Umidade do ar de entrada e de saída do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento-3 para os ensaios ABS-1 e ABS-2.....	86
Figura 4.44.- Umidade da partícula em base seca em função do tempo de processo durante o recobrimento-3 para os ensaios ABS-1 e ABS-2.....	87
Figura 4.45.- Velocidade de circulação das partículas no interior do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento-3 para os ensaios ABS-2.....	88
Figura 4.46.- Partículas de ABS® recobertas e não recobertas em microscópio óptico com ampliação de 40 x.....	88
Figura 4.47.- Temperatura de entrada e de saída do ar e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento-2 para os ensaios Esfera-1 e Esfera-2.....	91
Figura 4.48.- Altura do ânulo, do leito e da fonte em função do tempo de processo durante o recobrimento-2 para os ensaios Esfera-1 e Esfera-2.....	92
Figura 4.49. - Vazão de ar de jorro e queda de pressão do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento-2 para os ensaios Esfera-1 e Esfera-2.....	92
Figura 4.50.- Umidade do ar de entrada e de saída do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento-2 para os ensaios Esfera-1 e Esfera-2.....	93
Figura 4.51.- Velocidade de circulação das partículas no interior do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento-2 para os ensaios Esfera-1 e Esfera-2.....	93
Figura 4.52. - Umidade da partícula em base seca em função do tempo de processo durante o recobrimento-2 para os ensaios Esfera-1 e Esfera-2.....	94
Figura 4.53. – Partículas de esfera de vidro recobertas e não recobertas em microscópio óptico com ampliação de 40 x.....	94
Figura 4.54. - Temperatura de entrada e de saída do ar e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento-1 para os ensaios Placebo-1 e Placebo-2.....	96
Figura 4.55.- Altura do ânulo, do leito e da fonte em função do tempo de processo durante o recobrimento-1 para os ensaios Placebo-1 e Placebo-2.....	97
Figura 4.56. - Vazão de ar de jorro e queda de pressão do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento-1 para os ensaios Placebo-1 e Placebo-2.....	98
Figura 4.57. - Umidade do ar de entrada e saída do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento-1 para os ensaios Placebo-1 e Placebo-2.....	98

Figura 4.58. - Velocidade de circulação das partículas no interior do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento-1 para os ensaios Placebo-1 e Placebo-2.....	99
Figura 4.59. - Umidade da partícula em base seca em função do tempo de processo durante o recobrimento-1 para os ensaios Placebo-1 e Placebo-2.....	99
Figura 4.60. - Partículas do placebo recobertas e não recobertas em microscópio óptico com ampliação de 40 x.....	100
Figura 4.61. - $H_{\text{fonte}}$ em função de $S'$ para o ABS.....	105
Figura 4.62. - $H_{\text{fonte}}$ em função de $S'$ para a esfera de vidro.....	106
Figura 4.63. - $H_{\text{fonte}}$ em função de $S'$ para o placebo.....	107
Figura 4.64. - $\Delta P_{\text{leito}}$ em função de $S'$ para o ABS.....	107
Figura 4.65. - $\Delta P_{\text{leito}}$ em função de $S'$ para a esfera de vidro.....	108
Figura 4.66. - $\Delta P_{\text{leito}}$ em função de $S'$ para o placebo.....	108
Figura 4.67. - $V_{\text{circulação}}$ em função de $S'$ para o ABS.....	109
Figura 4.68. - $V_{\text{circulação}}$ em função de $S'$ para a esfera de vidro.....	109
Figura 4.69. - $V_{\text{circulação}}$ em função de $S'$ para o placebo.....	110
Figura A.1. - Curva Fluidodinâmica a seco do ABS para as cargas mássicas de 500g, 1000g e 1400g.....	121
Figura A.2. - Curva Fluidodinâmica a seco do ABS para as cargas mássicas de 1800g, 2200g e 2500g.....	121
Figura A.3. - Curva Fluidodinâmica a seco do PS para as cargas mássicas de 400g e 700g.....	122
Figura A.4. - Curva Fluidodinâmica a seco do PS para as cargas mássicas de 1000g, 1400g e 1700g.....	122
Figura A.5. - Curva Fluidodinâmica a seco do PS para as cargas mássicas de 2000g, 2500g e 2800g. ....	123
Figura A.6. - Curva Fluidodinâmica a seco do PEBD para as cargas mássicas de 500g, 1000g e 1400g.....	123
Figura A.7. - Curva Fluidodinâmica a seco do PEBD para as cargas mássicas de 1800g, 2200g e 2600g.....	124
Figura A.8. - Curva Fluidodinâmica a seco do PP para as cargas mássicas de 400g e 700g.....	124

Figura A.9. - Curva Fluidodinâmica a seco do PP para as cargas mássicas de 1000g e 1400g.....	125
Figura A.10.- Curva Fluidodinâmica a seco do PP para as cargas mássicas de 1700g, 2000g e 2300g.....	125
Figura A.11.- Curva Fluidodinâmica a seco do Placebo para a carga mássica de 1800g.....	126
Figura A.12.- Curva Fluidodinâmica a seco da Esfera de vidro para as cargas mássicas de 350g, 700g e 1000g.....	126
Figura A.13.- Curva Fluidodinâmica a seco da Esfera de vidro para as cargas mássicas de 1500g, 2000g e 2300g.....	127
Figura A.14.- Curva Fluidodinâmica a seco da Esfera de vidro para as cargas mássicas de 3300g, 4300g e 4500g.....	127
Figura B.1. - Curva de queda de pressão do leito versus vazão de ar para o ABS.....	128
Figura B.2. - Curva de altura do ânulo em leito seco para o ABS.....	128
Figura B.3. - Curva de altura de fonte versus vazão de ar para o ABS.....	129
Figura B.4. - Curva de altura de leito versus vazão de ar para o ABS.....	129
Figura B.5. - Curva de queda de pressão do leito versus vazão de ar para o PS.....	130
Figura B.6. - Curva de altura do ânulo em leito seco para o PS.....	130
Figura B.7. - Curva de altura de fonte versus vazão de ar para o PS.....	131
Figura B.8. - Curva de altura de leito versus vazão de ar para o PS.....	131
Figura B.9: Curva de queda de pressão do leito versus vazão de ar para o PEBD.....	132
Figura B.10. - Curva de altura do ânulo em leito seco para o PEBD.....	132
Figura B.11. - Curva de altura de fonte versus vazão de ar para o PEBD.....	133
Figura B.12. - Curva de altura de leito versus vazão de ar para o PEBD.....	133
Figura B.13. - Curva de queda de pressão do leito versus vazão de ar para o PP.....	134
Figura B.14. - Curva de altura do ânulo em leito seco para o PP.....	134
Figura B.15. - Curva de altura de fonte versus vazão de ar para o PP.....	135
Figura B.16. - Curva de altura de leito versus vazão de ar para o PP.....	135
Figura B.17. - Curva de queda de pressão do leito versus vazão de ar para o Placebo.....	136
Figura B.18. - Curva de altura do ânulo em leito seco para o Placebo.....	136
Figura B.19. - Curva de altura de fonte versus vazão de ar para o Placebo.....	137
Figura B.20. - Curva de altura de leito versus vazão de ar para o Placebo.....	137

---

Figura B.21. - Curva de queda de pressão do leite versus vazão de ar para a Esfera de vidro.....	138
Figura B.22. - Curva de altura do ânulo em leite seco para a Esfera de vidro.....	138
Figura B.23. - Curva de altura de fonte versus vazão de ar para a Esfera de vidro.....	139
Figura B.24. - Curva de altura de leite versus vazão de ar para a Esfera de vidro.....	139
Figura B.25. - Curva de altura de ânulo versus vazão de ar sob pressão de atomização para o ABS.....	140
Figura B.26. - Curva de altura de fonte versus vazão de ar sob pressão de atomização para o ABS.....	140
Figura B.27. - Curva de altura de leite versus vazão de ar sob pressão de atomização para o ABS.....	141
Figura B.28. - Curva de queda de pressão versus vazão de ar sob pressão de atomização para o ABS.....	141
Figura B.29. - Curva de altura de ânulo versus vazão de ar sob pressão de atomização para o PS.....	142
Figura B.30. - Curva de altura de fonte versus vazão de ar sob pressão de atomização para o PS.....	142
Figura B.31. - Curva de altura de leite versus vazão de ar sob pressão de atomização para o PS.....	143
Figura B.32. - Curva de queda de pressão versus vazão de ar sob pressão de atomização para o PS.....	143
Figura B.33. - Curva de altura de ânulo versus vazão de ar sob pressão de atomização para o PEBD.....	144
Figura B.34. - Curva de altura de fonte versus vazão de ar sob pressão de atomização para o PEBD.....	144
Figura B.35. - Curva de altura de leite versus vazão de ar sob pressão de atomização para o PEBD.....	145
Figura B.36. - Curva de queda de pressão versus vazão de ar sob pressão de atomização para o PEBD.....	145
Figura B.37. - Curva de altura de fonte versus vazão de ar sob pressão de atomização para o PP.....	146
Figura B.38. - Curva de altura de ânulo versus vazão de ar sob pressão de atomização para o PP.....	146

---

Figura B.39. - Curva de altura de ânulo versus vazão de ar sob pressão de atomização para o PP.....	147
Figura B.40. - Curva de queda de pressão versus vazão de ar sob pressão de atomização para o PP.....	147
Figura B.41. - Curva de altura de ânulo versus vazão de ar sob pressão de atomização para o Placebo.....	148
Figura B.42. - Curva de altura de fonte versus vazão de ar sob pressão de atomização para o Placebo.....	148
Figura B.43. - Curva de altura de leite versus vazão de ar sob pressão de atomização para o Placebo.....	149
Figura B.44. - Curva de queda de pressão versus vazão de ar sob pressão de atomização para o Placebo.....	149
Figura B.45. - Curva de altura de fonte versus vazão de ar sob pressão de atomização a Esfera de vidro.....	150
Figura B.46. - Curva de altura de ânulo versus vazão de ar sob pressão de atomização para a Esfera de vidro.....	150
Figura B.47. - Curva de altura de leite versus vazão de ar sob pressão de atomização para a Esfera de vidro.....	151
Figura B.48. - Curva de queda de pressão versus vazão de ar sob pressão de atomização para a Esfera de vidro.....	151
Figura C.1. - Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leite em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 12 ml/min.....	152
Figura C.2. - Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leite e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 12 ml/min.....	152
Figura C.3. - Vazão de ar de jorro, altura do leite, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 12ml/min.....	153
Figura C.4. - Vazão do ar de jorro, queda de pressão do leite, altura da fonte e do leite em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 12ml/min.....	153

---

Figura C.5. - Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 12 ml/min.....	153
Figura C.6. - Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 14 ml/min.....	154
Figura C.7. - Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leito e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 14 ml/min.....	154
Figura C.8. - Vazão de ar de jorro, altura do leito, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 14 ml/min.....	155
Figura C.9. - Vazão do ar de jorro, queda de pressão do leito, altura da fonte e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 14ml/min.....	155
Figura C.10. - Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 14 ml/min.....	155
Figura C.11. - Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 15 ml/min.....	156
Figura C.12. - Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leito e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 15 ml/min.....	156
Figura C.13. - Vazão de ar de jorro, altura do leito, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 15 ml/min.....	157
Figura C.14. - Vazão do ar de jorro, queda de pressão do leito, altura da fonte e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 15ml/min.....	157
Figura C.15. - Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 15 ml/min.....	157

---

- Figura C.16. - Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 17 ml/min.....158
- Figura C.17.- Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leito e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 17 ml/min.....158
- Figura C.18. - Vazão de ar de jorro, altura do leito, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 17ml/min.....159
- Figura C.19. - Vazão do ar de jorro, queda de pressão do leito, altura da fonte e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 17ml/min.....159
- Figura C.20. - Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 17 ml/min.....159
- Figura C.21. - Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 12,5 ml/min.....160
- Figura C.22. - Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leito e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 12,5 ml/min.....160
- Figura C.23. - Vazão de ar de jorro, altura do leito, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 12,5ml/min.....161
- Figura C.24. - Vazão do ar de jorro, queda de pressão do leito, altura da fonte e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 12,5 ml/min.....161
- Figura C.25. - Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 12,5 ml/min.....161
- Figura C.26. - Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 16,5 ml/min.....162

Figura C.27. - Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leito e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 16,5 ml/min.....	162
Figura C.28. - Vazão de ar de jorro, altura do leito, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 16,5ml/min.....	163
Figura C.29. - Vazão do ar de jorro, queda de pressão do leito, altura da fonte e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 16,5 ml/min.....	163
Figura C.30. - Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 16,5 ml/min.....	163
Figura C.31: Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 20 ml/min.....	164
Figura C.32. - Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leito e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 20 ml/min.....	164
Figura C.33. - Vazão de ar de jorro, altura do leito, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 20 ml/min.....	165
Figura C.34. - Vazão do ar de jorro, queda de pressão do leito, altura da fonte e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 20 ml/min.....	165
Figura C.35. - Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 20 ml/min.....	165
Figura C.36. - Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 22 ml/min.....	166
Figura C.37. - Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leito e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 22 ml/min.....	166

---

- Figura C.38. - Vazão de ar de jorro, altura do leito, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 22 ml/min.....167
- Figura C.39. - Vazão do ar de jorro, queda de pressão do leito, altura da fonte e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 22 ml/min.....167
- Figura C.40. - Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 22 ml/min.....167
- Figura C.41. - Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 12,25 ml/min.....168
- Figura C.42. - Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leito e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 12,25 ml/min.....168
- Figura C.43. - Vazão de ar de jorro, altura do leito, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 12,25 ml/min.....169
- Figura C.44. - Vazão do ar de jorro, queda de pressão do leito, altura da fonte e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 12,25 ml/min.....169
- Figura C.45. - Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 12,25 ml/min.....169
- Figura C.46. - Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 16 ml/min.....170
- Figura C.47. - Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leito e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 16 ml/min.....170
- Figura C.48. - Vazão de ar de jorro, altura do leito, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 16ml/min.....171
-

Figura C.49. - Vazão do ar de jorro, queda de pressão do leite, altura da fonte e do leite em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 16 ml/min.....	171
Figura C.50. - Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 16 ml/min.....	171
Figura C.51. - Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leite em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 18 ml/min.....	172
Figura C.52. - Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leite e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 18 ml/min.....	172
Figura C.53. - Vazão de ar de jorro, altura do leite, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 18 ml/min.....	173
Figura C.54. - Vazão do ar de jorro, queda de pressão do leite, altura da fonte e do leite em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 18 ml/min.....	173
Figura C.55. - Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 18 ml/min.....	173
Figura C.56. - Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leite em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 20 ml/min.....	174
Figura C.57. - Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leite e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 20 ml/min.....	174
Figura C.58. - Vazão de ar de jorro, altura do leite, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 20 ml/min.....	175
Figura C.59. - Vazão do ar de jorro, queda de pressão do leite, altura da fonte e do leite em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 20 ml/min.....	175

---

Figura C.60. - Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 20 ml/min.....	175
Figura C.61. - Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 21 ml/min.....	176
Figura C.62. - Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leito e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 21 ml/min.....	176
Figura C.63. - Vazão de ar de jorro, altura do leito, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 21 ml/min.....	177
Figura C.64. - Vazão do ar de jorro, queda de pressão do leito, altura da fonte e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 21 ml/min.....	177
Figura C.65. - Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 21 ml/min.....	177
Figura C.66. - Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 22 ml/min.....	178
Figura C.67. - Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leito e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 22 ml/min.....	178
Figura C.68. - Vazão de ar de jorro, altura do leito, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 22 ml/min.....	179
Figura C.69. - Vazão do ar de jorro, queda de pressão do leito, altura da fonte e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 22 ml/min.....	179
Figura C.70. - Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 22 ml/min.....	179

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Formulação da suspensão polimérica aquosa.....	37
Tabela 3.2.- Condições para prensagem dos filmes.....	42
Tabela 4.1.- Características físicas das partículas.....	51
Tabela 4.2.- Características da suspensão.....	52
Tabela 4.3 - Ângulo de contato da suspensão.....	53
Tabela 4.4. - Carga mássica e parâmetros fluidodinâmicos das partículas.....	58
Tabela 4.5. - Condições operacionais e resultados para os ensaios de recobrimento-1 do PS.....	73
Tabela 4.6. - Condições operacionais e resultados para os ensaios de recobrimento-2 do PS.....	74
Tabela 4.7 -Condições operacionais e resultados para os ensaios de recobrimento-3 do PS.....	75
Tabela 4.8. - Condições operacionais e resultados para o ensaio de recobrimento-4 do PS.....	75
Tabela 4.9. - Condições operacionais e resultados para os ensaios de recobrimento-1 do ABS.....	81
Tabela 4.10. - Condições operacionais e resultados para os ensaios de recobrimento-2 do ABS.....	82
Tabela 4.11. - Condições operacionais e resultados para os ensaios de recobrimento-3 do ABS.....	84
Tabela 4.12. - Condições operacionais e resultados para os ensaios de recobrimento-1 da esfera de vidro.....	89
Tabela 4.13. - Condições operacionais e resultados para os ensaios de recobrimento-2 da esfera de vidro.....	90
Tabela 4.14. - Condições operacionais e resultados para os ensaios de recobrimento-1 do placebo.....	95
Tabela 4.15. - Resumo dos ensaios de recobrimento para o ABS®.....	101
Tabela 4.16. – Resumo dos ensaios de recobrimento para a esfera de vidro.....	101
Tabela 4.17. – Resumo dos ensaios de recobrimento para o Placebo.....	102
Tabela 4.18 - Vazão Máxima de suspensão.....	103

---

## NOMENCLATURA

U:	velocidade superficial (m/s)
v:	velocidade média do fluido (m/s)
H:	altura (m)
D:	diâmetro (cm)
Z:	comprimento do tubo (m)
Q:	vazão mássica (kg/min)
W:	vazão volumétrica (ml/min)
V:	volume (m <sup>3</sup> )
m:	massa (g)
t:	tempo de processo (min)
C:	concentração (%)
S:	grau de saturação
S':	grau de saturação instantâneo (min <sup>-1</sup> )
g:	aceleração da gravidade (m/s <sup>2</sup> )
A:	área transversal (m <sup>2</sup> )
R:	raio de volume (m)
r:	raio (m)
z:	distância normal (cm)
L:	largura (cm)
X:	umidade (%)
F:	força (N)
T:	temperatura do ar (°C)
a:	menor distância entre as partículas (m)

---

b: pressão barométrica local (mmHg)  
P: pressão (mmHg)  
Re: número de Reynolds  
k: índice de consistência  
n: índice de comportamento

- *Subscrito*

mf: mínima fluidização  
jm: jorro mínimo  
j: jorro  
a: ânulo  
S: estável  
s: sólidos  
est: estática  
exp: experimental  
L: leito de jorro  
líq: líquido  
1: tubo  
2: placa de orifício  
M: máxima  
i: orifício do leito  
p: partícula  
c: coluna  
b: leito de partículas  
w: água

---

hid:	hidráulico
v:	eixo vertical
h:	eixo horizontal
ar:	ar de jorro
cap:	capilar
pen:	pendular
fun:	funicular
pst,s:	pasta seca
rec:	partícula recoberta
o:	partícula original
susp:	suspensão
f´:	filme
f:	fluido
t:	tensão
T:	total
ic:	inscrito
cc:	circunscrito
ap:	aparente
pic:	picnômetro
vol:	volumétrico(a)
recp:	recipiente
	- <i>Letras gregas</i>
$\Delta P$ :	queda de pressão
$\Theta$ :	ângulo do cone (deg)
$\xi$ :	fator de compressibilidade para a placa de orifício

- $\Phi$ : ângulo de repouso ( $^{\circ}$ )
  - $\beta$ : ângulo da ponte líquida (-)
  - $\varepsilon$ : porosidade
  - $\alpha$ : coeficiente de descarga para a placa de orifício
  - $\sigma$ : tensão de ruptura ( $\text{N/m}^2$ )
  - $\mu$ : viscosidade do fluido ( kg/m. s)
  - $\phi$ : esfericidade das partículas
  - $\varphi$ : ângulo interno de fricção das partículas na fase densa ( $^{\circ}$ )
  - $\theta$ : ângulo de contato ( $^{\circ}$ )
  - $\tau$ : tensão de cisalhamento ( $\text{N/m}^2$ )
  - $\gamma$ : taxa de deformação ( $\text{s}^{-1}$ )
  - $\delta$ : crescimento (%)
  - $\omega$ : ângulo de contato entre a ponte líquida e a partícula inerte (-)
-



## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

A necessidade de recobrir partículas está relacionada às mais distintas finalidades, de acordo com os objetivos específicos de cada produto, tendo inúmeras aplicações nas indústrias química, farmacêutica, agrícola e de alimentos. Pode-se destacar as seguintes razões pelas quais o recobrimento é efetuado:

- Melhorar a aparência do produto, facilitando sua aceitação no mercado;
- Facilitar a identificação de diferentes materiais quando armazenados em local comum;
- Proteger o produto da ação de agentes ambientais (umidade, luz, oxigênio e calor);
- Facilitar a manipulação de produtos, evitando a contaminação ou perda por fraturas;
- Mascaram sabores e/ou odores desagradáveis;
- Isolar substâncias ativas, proporcionando uma liberação controlada; e,
- Possibilitar o uso de substâncias que atacam mucosas.

Um amplo trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Fluidodinâmica e Secagem (LFS) para o estudo do recobrimento de comprimidos em leito de jorro bidimensional, enfocando a fluidodinâmica do processo (Rocha e Taranto, 1992), a cinética de crescimento das partículas (Ayub, 1993), a transferência de calor gás-partícula (Taranto, Rocha e Raghavan, 1996), a análise da eficiência e da qualidade do recobrimento para três posições de atomização da solução (Queiroz Filho (1997), Queiroz Filho, Piccolo e Rocha (1996)), o desenvolvimento do processo de recobrimento de uréia com enxofre (Ayub, 1997), o estudo do recobrimento polimérico de uréia com enxofre em leito de jorro bidimensional (Donida, 2000) e o estudo do recobrimento de sementes de brócolos em leito de jorro e leito fluidizado (Almeida, 2002).

Neste trabalho, tem-se como proposta o estudo da fluidodinâmica do leito de jorro convencional, durante o processo de recobrimento, utilizando-se várias partículas,

---

analisando-se as influências das propriedades físicas das partículas e da suspensão de recobrimento na fluidodinâmica. Em paralelo, deseja-se medir a velocidade dos sólidos no interior do leito, correlacionando-se a taxa de circulação com o grau de saturação do leito.

Os ensaios fluidodinâmicos com e sem recobrimento foram efetuados em um leito de jorro cônico-cilíndrico, sob condições operacionais fixadas a partir de testes preliminares. As partículas que foram estudadas são: esferas de vidro, placebo e alguns polímeros. A suspensão de recobrimento foi analisada quanto a: tensão superficial, reologia, massa específica e molhabilidade com o sólido (ângulo de contato).

Este projeto tem como principais objetivos:

- Estabelecimento de uma metodologia de medida da taxa de circulação das partículas no leito durante o recobrimento, correlacionando esta taxa com o grau de saturação do leito no decorrer do tempo.
- Correlacionar a fluidodinâmica do recobrimento em leito de jorro com as características físicas das partículas e da suspensão.

A maioria dos trabalhos encontrados na literatura sobre a fluidodinâmica em leito de jorro abrange basicamente a secagem de pastas e suspensões. Os trabalhos que apresentam um estudo sobre recobrimento de partículas estão, na maior parte, diretamente relacionados a um determinado produto. Este projeto tem como intuito a realização de um estudo fluidodinâmico fundamental do processo de recobrimento, o qual se propõe a analisar de uma forma mais ampla a influência das características físicas de diferentes partículas na estabilidade do regime de jorro e, conseqüentemente, na eficiência do processo de recobrimento.

A escolha da utilização de um leito de jorro para os ensaios de recobrimento se deve principalmente ao fato de se tratar de um equipamento que permite um alto grau de contato fluido-partícula, com significativas taxas de transferência de calor e massa. Além disso, as partículas propostas para o estudo possuem um diâmetro acima de 1 mm, não sendo, portanto, recomendada a utilização de um leito fluidizado.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. Leito de jorro

##### 2.1.1. Considerações Gerais

Desenvolvido em 1954 por Mathur e Gishler, o sistema de leito de jorro foi concebido inicialmente como um método para secagem de trigo. Estudaram-se as características do leito usando uma grande variedade de materiais sólidos, tendo como fluido de jorro ar ou água.

As primeiras unidades comerciais de leito de jorro foram instaladas no Canadá em 1962, para secagem de ervilhas e lentilhas. Posteriormente, outras unidades foram implantadas em vários países para secagem, mistura de sólidos, resfriamento, recobrimento e granulação.

O sistema de leito de jorro consiste basicamente de uma coluna cilíndrica de base cônica, contendo partículas sólidas de um tamanho considerável,  $d_p > 1$  mm, e de um orifício de entrada do fluido localizado na parte inferior central da base cônica.

Um fluido é injetado no orifício de entrada centrado na extremidade inferior da base. Se a vazão for suficientemente elevada, o jato do fluido provocará um fluxo de partículas sólidas para a região central da coluna e em seguida, estas são jorradas sob a forma de um cogumelo, caindo na região periférica anular.

O leito de jorro é então a composição de três regiões distintas: o jorro, o anulo e a fonte, conforme mostra a Figura 2.1. O centro, região de jorro, é constituído de uma fase diluída com o movimento ascendente pneumático de partículas sólidas por um fluxo de fluido concorrente. O anulo ou região anular é constituído de uma fase densa com

---

percolação contracorrente de fluido. A fonte é a região superior ao ânulo onde as partículas se movimentam em regime desacelerado do jorro, caindo no ânulo.

Com o conjunto das três regiões, um modelo cíclico sistemático do movimento das partículas sólidas é estabelecido a partir de um sistema fluidodinâmico único, o qual é mais adequado para certas aplicações, em detrimento de outras configurações fluido-sólido mais convencionais. A intensa mistura favorece um alto grau de contato fluido-partícula e a obtenção de uma elevada taxa de circulação de sólidos.

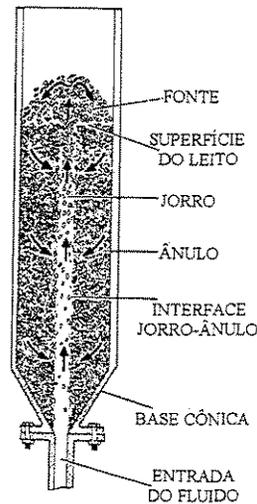


Figura 2.1 - Esquema de um leito de jorro (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

O leito de jorro foi originalmente concebido como uma solução modificada do leito fluidizado. Esta modificação provém da má qualidade de fluidização obtida com partículas maiores. Estudos desenvolvidos têm demonstrado que o leito de jorro apresenta características especiais, as quais tornam possível a construção de operações cíclicas com partículas sólidas que não poderiam ser executadas em um leito fluidizado, em virtude do movimento comparativamente randômico das partículas.

O leito de jorro surge então como um substituto para o leito fluidizado, sendo aplicado a uma grande variedade de materiais sólidos maiores que 1 mm. MATHUR e EPSTEIN (1974) citam unidades para resfriamento de sólidos, granulação, revestimento de

partículas, cristalização e ativação de carvão. Potenciais aplicações industriais para o leito de jorro, embora ainda estejam em escala piloto, inclui a carbonização e gaseificação do carvão, moagem e mistura de sólidos e pirólise de xisto.

### 2.1.2. Condições Necessárias para o Jorro

O fenômeno visual do jorro ocorre acima de um nível definido de velocidade do fluido para uma dada combinação de fluido, sólido e configuração do leito. Aumentando-se a velocidade do fluido, pode-se observar a transição que ocorre de um leito fixo para um jorro, que com um aumento ainda maior da velocidade do fluido passaria para um leito borbulhante e posteriormente para o regime "slugging" como ilustra a Figura 2.2.

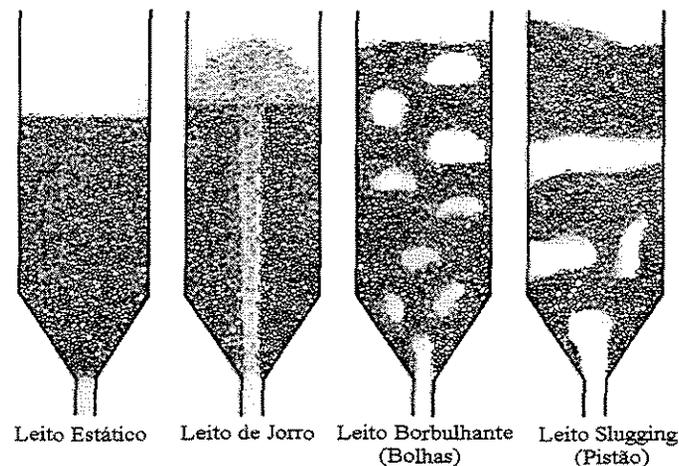


Figura 2.2 - Transição de Fase com o Aumento da Velocidade do Fluido (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

As transições de regime observadas na Figura 2 também podem ser quantitativamente representadas através de diagramas como gráfico de altura do leito *versus* velocidade do fluido, para cada conjunto leito-partícula. A Figura 2.3 exemplifica um diagrama de regime.

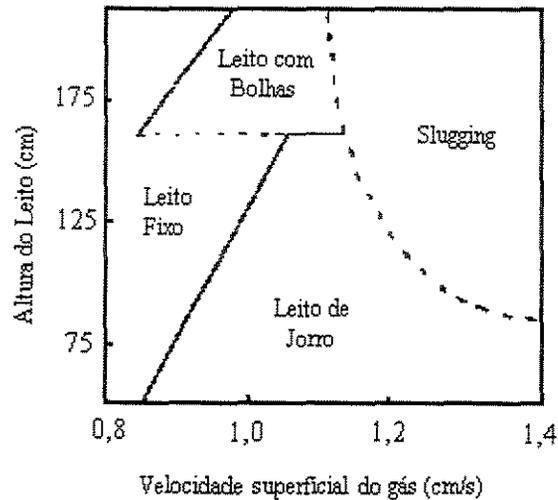


Figura 2.3 - Diagrama de regime, trigo,  $d_p = 3,2 \times 6,4$  mm,  $D_c = 15,2$  cm,  $D_i = 1,25$  cm (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

Diagramas de fase também indicam que para um dado conjunto que envolve a natureza do sólido, a velocidade de gás e configuração de leito, existe um tamanho máximo de entrada de gás, acima do qual não ocorre jorro estável, passando diretamente do leito móvel para o estado de fluidização agregada.

Para um dado material sólido em contato com um fluido específico e um leito de geometria fixa, existe uma altura máxima de jorro  $H_{M,j}$ , acima da qual não ocorre jorro e sim uma fluidização de má qualidade. A velocidade mínima de jorro em um leito pode estar 50% acima da velocidade mínima de fluidização correspondente,  $U_{mf}$ .

Um leito de jorro típico tem uma altura substancial, a qual no caso de um recipiente cilíndrico é geralmente no mínimo da ordem do diâmetro da coluna, medido através do orifício de entrada do fluxo para a superfície do ânulo. Se o leito for muito pequeno, o sistema se torna inadequado ao processo de jorro.

O diâmetro mínimo da partícula recomendado para a utilização em um leito de jorro é cerca de 1 mm. Este tamanho de partícula está próximo do limite, no qual a efetividade do contato gás-sólido em leito fluidizado é seriamente prejudicada pela passagem do gás na forma de grandes bolhas.

### 2.1.3. O Mecanismo Fluidodinâmico

O mecanismo de transição do leito estático para o leito de jorro é melhor descrito por meio de uma curva característica de queda de pressão do leito *versus* velocidade superficial do gás, como na Figura 2.4.

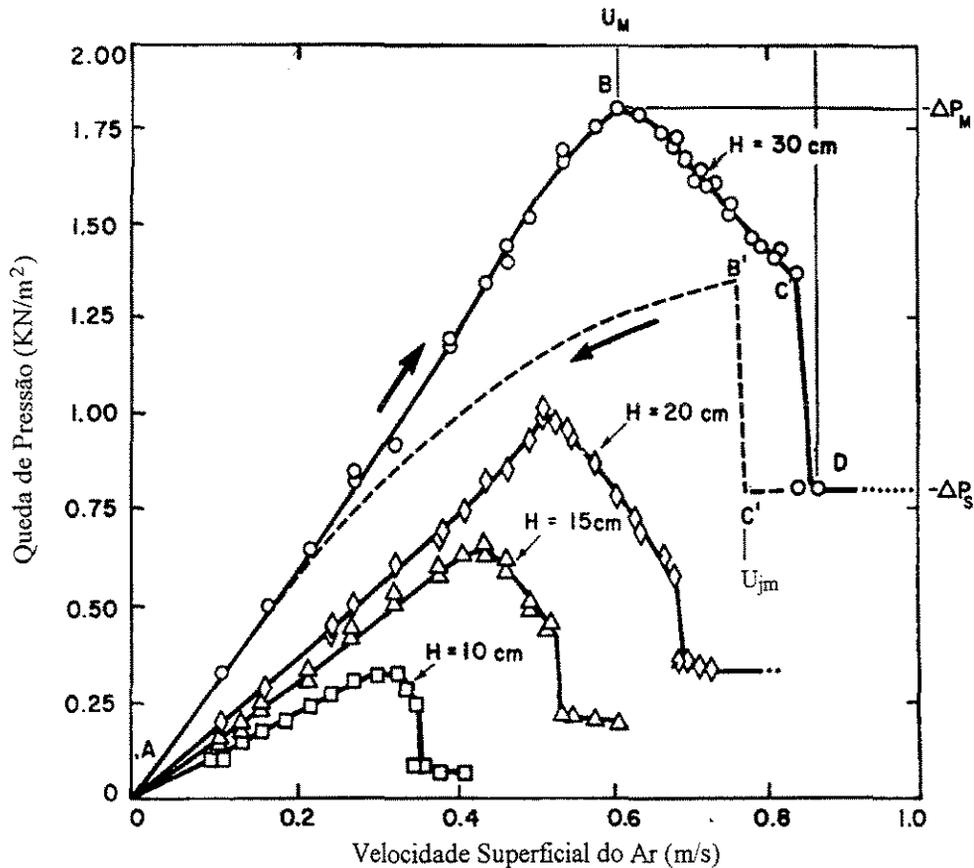


Figura 2.4 - Curva típica de queda de pressão *versus* velocidade do ar (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

Conforme o fluxo de fluido é aumentado, observa-se a seguinte seqüência de eventos:

- a. A baixas velocidades do gás, este simplesmente passa sem perturbar as partículas do leito; a queda de pressão aumenta com a taxa de escoamento (sentido AB), como em um leito fixo de partículas.

- b. A uma certa velocidade, o jato torna-se suficientemente forte para empurrar as partículas, ocasionando a formação de uma cavidade na região central logo acima da entrada. Uma camada sólida compacta oferece grande resistência ao fluxo de gás, acarretando uma maior queda de pressão.
- c. Com um acréscimo na vazão do gás, a cavidade se alonga formando um jorro interno. A queda de pressão atinge um máximo ( $-\Delta P_M$ ) no ponto B. A velocidade superficial correspondente é chamada de  $U_M$ .
- d. Com o aumento da taxa de escoamento além do ponto B, a altura da cavidade interna no jorro torna-se grande em comparação com a camada sólida compactada acima do jorro. A queda de pressão então decresce ao longo de BC.
- e. Aproximando-se do ponto C, um número suficiente de partículas sólidas é deslocado para o centro da cavidade causando uma expansão considerável do leito, resultando em um decréscimo na queda de pressão. Essa expansão é geralmente acompanhada pela expansão alternada de contração do jorro interno.
- f. Com um ligeiro aumento na vazão do gás após o ponto C, conhecido como ponto de jorro incipiente, a concentração de sólidos na região logo acima do jorro interno decresce abruptamente, resultando em uma redução notável na queda de pressão até o ponto D, no qual o jorro interno rompe a superfície do leito. O ponto D representa o início do jorro, no qual o leito torna-se móvel e o jorro contínuo se instala.
- g. Com mais um aumento na taxa de escoamento do gás, o fluxo adicional simplesmente passa através da região do jorro, o qual se encontra estável com o patamar de mínima resistência, formando a fonte, que não fornece efeito significativo na queda de pressão. A queda de pressão ( $-\Delta P_S$ ) além do ponto D permanece praticamente constante.

A instabilidade gerada pela ação de ruptura do jato através do leito faz com que a velocidade de jorro incipiente (C) e o princípio do jorro estável (D) não sejam exatamente reprodutíveis. Opta-se então pela utilização de uma variável mais reprodutível, a *velocidade de jorro mínimo* ( $U_{jm}$ ), que é obtida diminuindo-se lentamente a vazão de fluido. O leito permanece em estado de jorro até o ponto C', que representa a condição de mínimo jorro.

Uma pequena redução na velocidade do gás nesta condição provoca o colapso do jorro e a queda de pressão sobe repentinamente até o ponto B'. Diminuindo ainda a taxa de escoamento tem-se um decréscimo contínuo da queda de pressão ao longo de B'A.

Os pontos B e D correspondem aos valores de queda de pressão de interesse prático para o projeto e a operação de uma unidade de leito de jorro. Estes correspondem, respectivamente, ao pico de queda de pressão ( $-\Delta P_M$ ) e à queda de pressão de operação no ponto de jorro estável ( $-\Delta P_S$ ).

#### 2.1.4. Estabilidade do Jorro

A obtenção do jorro estável está relacionada a alguns fatores, tais como a geometria do leito e propriedades do sólido e do fluido.

##### Efeito da geometria do leito

##### a) Razão $D_i / D_c$

Um dos fatores limitantes da estabilidade de um leito de jorro é a altura da coluna (MATHUR e EPSTEIN (1974)). O valor máximo para essa altura ( $H_M$ ) pode ser determinado em função de parâmetros geométricos do leito, de modo a se obter um sistema estável. Este valor decresce com o aumento do diâmetro do orifício de entrada do gás. Para colunas cilíndricas, Becker (1961) sugere um valor crítico para a razão diâmetro do orifício e diâmetro da coluna  $D_i / D_c = 0,35$ . Do mesmo modo, Nemeth e Pallai (1970) propõem um valor limite de  $D_i / D_c = 0,30$  e sugerem um valor para  $D_i / d_p$  entre 40 e 50.

A literatura propõe diversas correlações, na sua maioria empíricas, que estão limitadas a faixas de condições operacionais restritas, para previsão da fluidodinâmica do processo.

## b) Ângulo do cone

Uma menor seção cônica do leito facilita o fluxo de sólidos do ânulo para a região do jato de gás. O ângulo limite do cone depende do atrito interno das partículas, e para a maioria dos materiais o ângulo varia entre 40° e 60°.

## c) Projeto do orifício de entrada do jato

Manurung (1964) observou, após vários experimentos, que o jorro torna-se mais estável quanto menor for o orifício de entrada do gás na parte mais estreita do cone. A estabilidade máxima é obtida com o projeto do orifício de entrada que facilite o fluxo do jato de forma mais direcionado, a fim de se evitar o desvio do jato antes que ele atinja o leito de partículas.

Efeito das propriedades do sólido

## a) Tamanho da partícula

Embora o tamanho mínimo de partícula recomendável para a operação de um leito de jorro seja de 1 mm de diâmetro, Ghosh (1965) sugere que a ação do jorro pode ser obtida para materiais ainda mais finos, contanto que o diâmetro do orifício de entrada não ultrapasse 30 vezes o diâmetro da partícula.

O efeito do tamanho da partícula e da altura do leito na velocidade do jorro pode ser estimado a partir da Equação de Mathur e Gishler (1955):

$$U_{jm} = \left( \frac{d_p}{D_c} \right) \left( \frac{D_i}{D_c} \right)^{1/3} \left( \frac{2gH_c(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} \right)^{1/2} \quad (1)$$

Onde:  $d_p$ : diâmetro da partícula (m)

$D_c$ : diâmetro da coluna (m)

$D_i$ : diâmetro do orifício (m)

$H_c$ : altura da coluna (m)

$\rho_s$ : densidade do sólido ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_f$ : densidade do fluido ( $\text{kg/m}^3$ )

Mantendo-se todas as outras variáveis constantes, a Equação 1 pode ser expressa por:

$$U_{jm} = Kd_p H_c^{0.5} \quad (2)$$

Enquanto que a dependência da velocidade de mínima fluidização no tamanho da partícula pode ser expressa sob a forma:

$$U_{mf} = Kd_p^n \quad (3)$$

Sendo que n depende do regime do fluxo.

#### b) Distribuição de tamanho

A uniformidade do tamanho das partículas favorece a estabilidade do jorro devido a uma distribuição mais efetiva do gás. A presença de uma pequena proporção de finos ou de partículas mais grossas em um leito pode prejudicar seriamente a estabilidade do jorro. (Mathur e Epstein, 1974).

#### c) Densidade

Não existem claras evidências que mostrem se a estabilidade do jorro é afetada ou não pela densidade das partículas.

---

### Efeito da vazão do ar

A estabilidade do jorro depende de uma faixa de valores para a velocidade do ar que varia em função da geometria do leito, do tamanho e da forma das partículas. Velocidades abaixo da faixa não conseguem aflorar o jorro, enquanto que um aumento no fluxo acima do requerido pode acarretar regimes instáveis com "slugging".

#### **2.1.5. Atrito Inter-Partícula**

Além da fragilidade do material sólido, o atrito entre as partículas depende das condições de jorro. Experimentos de análise de atrito em leitos de jorro para recobrimento de uréia (Haji-Zainali (1970)) mostram que:

- A maior parte de quebra de partículas ocorre durante os minutos iniciais do jorro (menos de dez minutos).
- O atrito entre as partículas cresce sensivelmente com o decréscimo do tamanho do orifício de entrada do gás.
- Em partículas menores, a quebra é mais severa em cones mais agudos.
- Próximo da velocidade mínima de jorro, o atrito torna-se maior quando a altura do leito é aumentada de 35 a 59 cm.

A mais importante variável no que se refere ao atrito entre as partículas é o diâmetro da abertura de entrada do gás, e, portanto a velocidade com que ele atinge o leito.

### **2.2. Recobrimento de partículas**

O recobrimento de partículas é uma operação unitária que visa a modificação das características superficiais de partículas, tendo hoje amplas aplicações em vários segmentos industriais, tais como: na indústria química, no recobrimento de micro-esferas; na indústria alimentícia, no recobrimento de balas e confeitos; na agroindústria, no recobrimento e

peletização de fertilizantes e sementes; e na indústria farmacêutica, no recobrimento de comprimidos (Rocha, 2001 – Notas particulares).

O processo de recobrimento consiste na aplicação de uma solução ou suspensão atomizada, que adere e seca sobre a superfície de partículas em um leito móvel de sólidos. O desenvolvimento de equipamentos de recobrimento permitiu o emprego da técnica em larga escala, sendo inicialmente utilizadas, na indústria farmacêutica, as "painéis rotatórias" ou drageadeiras. Neste equipamento, a solução de recobrimento pode ser aplicada às partículas manualmente ou por atomização, o que permite a redução significativa do tempo de secagem e a aplicação contínua da solução para recobrimento tipo filme. A principal desvantagem das drageadeiras é o tempo de residência relativamente alto e a não uniformidade do produto final (Rocha, 1992).

Em 1953, Wurster desenvolveu um novo equipamento para recobrimento utilizando um leito de comprimidos movimentado por um fluxo de ar, pré-aquecido, sobre o qual a suspensão de recobrimento é atomizada. A circulação provocada pelo fluido aquecido favorece uma melhor homogeneização e secagem da solução sobre as partículas. Atualmente, uma variedade de métodos tem sido desenvolvida e aplicada para este processo utilizando-se leito fluidizado ou leito de jorro. A escolha da técnica adequada depende da distribuição de tamanho, uniformidade e carga de sólidos.

Existem três principais tipos de recobrimento utilizados atualmente:

- Recobrimento com suspensões à base de açúcar
- Recobrimento por filme;
- Recobrimento por cristalização de materiais fundidos.

O recobrimento com suspensões açucaradas é bastante empregado nas indústrias farmacêutica e alimentícia, para o recobrimento de comprimidos, balas e confeitos. Este processo provoca um grande aumento no volume da partícula, chegando até 50% em relação ao inicial, passando por várias etapas: selamento, primeira camada de recobrimento, alisamento e acabamento, requerendo assim um longo tempo de processamento.

O recobrimento tipo filme, ou por película, surgiu para solucionar os problemas inerentes ao recobrimento convencional, à base de açúcar, diferindo pelas suas características físicas e químicas e pela espessura da película de recobrimento. Dentre suas vantagens, podemos destacar: o curto tempo de processamento, maior rendimento, pequena variação de peso, tamanho e forma da partícula, além da possibilidade de alterações na formulação do recobrimento. O recobrimento por película é atualmente o mais indicado para a maioria dos objetivos farmacológicos (SILVA e ROCHA, 2002), de alimentos e agrícolas (AYUB, 1993).

Os principais componentes de uma composição para o recobrimento por filme são um polímero, um plastificante, pigmentos corantes e um solvente. O agente de recobrimento é então atomizado sobre um leito móvel do material. A maioria dos polímeros utilizada é dissolvida em água ou em solventes orgânicos.

Outra possibilidade de se efetuar o recobrimento de partículas é por cristalização de materiais fundidos. Este tipo consiste basicamente na atomização do material no seu estado líquido e, ao entrar em contato com a partícula, este é então solidificado sobre a superfície que se deseja recobrir. Neste processo não se utiliza solventes, portanto, praticamente todo o material adicionado às partículas é incorporado. Um exemplo de aplicação comercial desta técnica é o recobrimento de fertilizantes muito solúveis com enxofre para reduzir a taxa de liberação do nutriente (WEISS e MEISEN, 1983).

### **2.2.1 Recobrimento de Partículas em Leito de Jorro**

Diversas pesquisas sobre recobrimento em leito de jorro têm sido desenvolvidas para comprimidos, que pertencem ao grupo D da classificação de Geldart (ver Figura 2.5). O uso do leito é justificado por suas propriedades fluidodinâmicas, como: o movimento cíclico dos sólidos produz uma rápida mistura axial dos sólidos no leito, o que proporciona um eficiente contato fluido-partícula, com elevadas taxas de transferência de massa e calor, garantindo um produto final mais homogêneo (Mathur e Epstein, 1974).

O recobrimento de partículas em leito de jorro consiste na injeção de ar aquecido no leito para a formação do jorro e na atomização da solução de recobrimento sobre as partículas do leito. A vazão da solução é regulada a fim de que não afete a estabilidade do jorro em virtude de uma aderência excessiva entre as partículas e nas paredes do leito. A remoção de solvente residual é feita por secagem ou por solidificação, formando uma camada fina e homogênea sobre a partícula (DONIDA, 2000).

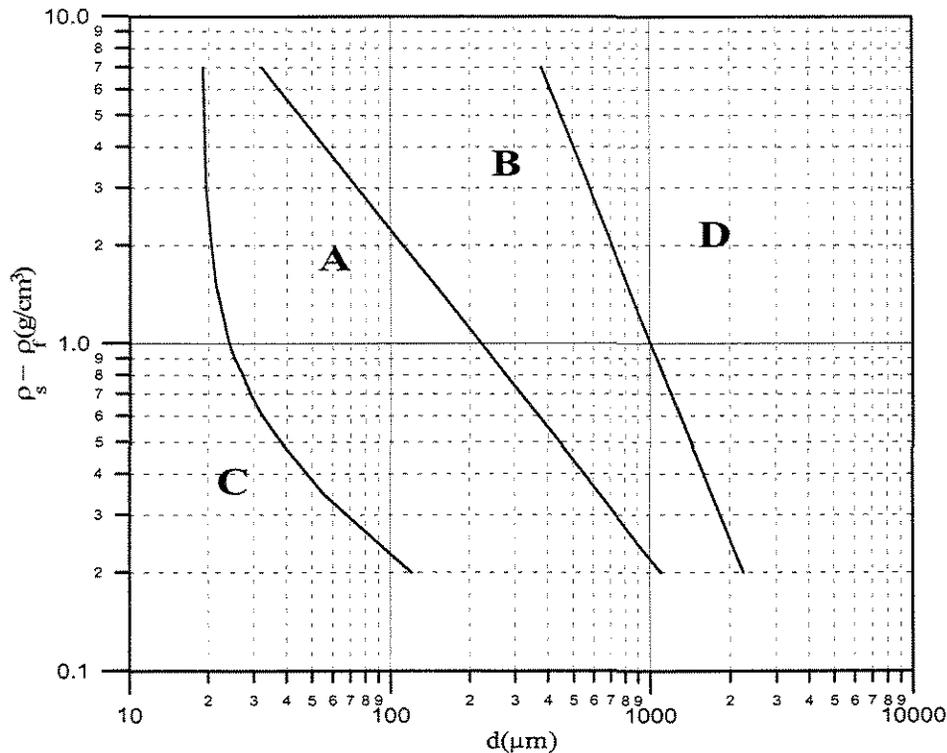


Figura 2.5 - Diagrama simplificado de classificação de partículas para fluidização através de ar em condições normais GELDART (1986).

Um estudo básico sobre a fluidodinâmica e as transferências de calor e de massa durante um recobrimento de comprimidos em leito de jorro foi apresentado em 1983 por Kucharski e Kmiéc. O leito de jorro consistia numa parte cilíndrica de 30 cm de diâmetro e uma base cônica, com diâmetro de entrada de 8,2 cm. Utilizou-se uma solução açucarada para recobrir placebos com dimensões de 4,0 x 7,0 mm e 4,3 x 9,0 mm com esfericidade 0,978 e 0,866, respectivamente. Os ensaios foram realizados com atomizador instalado na

base cônica do leito. Concluiu-se que as variáveis dinâmicas (queda de pressão máxima, queda de pressão de jorro mínimo e vazão de jorro mínimo) e números de Nusselt e Sherwood em processo de recobrimento podem ser estimados por correlações desenvolvidas para prever valores em processos em leito de jorro cônico, dentro das faixas de aumento de massa dos experimentos correspondentes aos realizados pelos autores.

Outros trabalhos foram apresentados continuando as pesquisas sobre o recobrimento de comprimidos (Kucharski e Kmiéc, 1988, 1991). Os autores realizaram um estudo experimental da eficiência do recobrimento, da cinética de granulação e desenvolveram um modelo matemático a partir dos fluxos fluidodinâmicos e dos processos de transferência de calor e massa para as regiões central e anular do leito e para as fases inerte (placebos), *spray* e a camada de recobrimento. Foram obtidos os perfis longitudinais de temperatura, umidade e velocidades em ambas as regiões estudadas.

### 2.3. Secagem de pastas e suspensões

O processo de secagem de pastas e suspensões tem grande semelhança com o processo de recobrimento de partículas, diferindo-se pelo objetivo final do processo. No recobrimento, deseja-se a obtenção de um filme que adere à superfície da partícula e não se desprenda da mesma ao final do processo. Já na secagem de pastas, as partículas funcionam como inertes, onde nestas é formado um filme que, em seguida, é desprendido da partícula, obtendo-se, ao final do processo, a pasta ou suspensão em forma de pó. Portanto, faz-se necessário uma breve revisão da literatura acerca deste tema.

Os primeiros estudos sobre secagem de pastas e suspensões em leito de jorro foram realizados por ROGER *et al.* (1967), partindo-se da secagem de tintas e lacas. A técnica tem se estendido a diferentes materiais, destacando-se a secagem de produtos biológicos como sangue animal (Cunha et al. 1998, Pham, 1983), polpas de frutas (Medeiros, 2001), extrato vegetal (Ré e Freire, 1986,1988) e polpa de tomate (Kachan e Chiappetta, 1988).

---

A escolha da técnica a ser utilizada na secagem de pastas está relacionada às características físicas do material a ser seco. Logo, cada pasta requer um estudo específico baseado nas propriedades reológicas e na resistência térmica do material para se definir o método mais adequado.

Dentre os principais parâmetros relacionados ao projeto de secadores de leito de jorro, destacam-se: a perda de carga em função da vazão do gás, a perda de carga máxima, a perda de carga no jorro estável, a velocidade de jorro mínimo e a altura máxima de jorro estável. Os perfis de velocidade do gás no leito, assim como a velocidade dos sólidos e a taxa de circulação das partículas constituem os demais parâmetros que auxiliam no entendimento dos fenômenos de transferência que ocorrem no leito durante a secagem (FREIRE, 1992).

SCHNEIDER e BRIDGWATER (1990) estudaram o leito de jorro convencional para secagem de soluções de NaCl e suspensões de alumina a diferentes concentrações. Verificou-se que a secagem ocorreu a uma taxa constante até a evaporação de quase toda a água, caindo, em seguida, rapidamente.

A adição de uma fase líquida em um leito de jorro é feita em processos de granulação, recobrimento ou secagem. Um estudo experimental realizado por SCHNEIDER e BRIDGWATER (1993) teve como objetivo a melhor compreensão da fluidodinâmica de um leito de jorro úmido. Analisou-se o efeito do líquido injetado na velocidade do jorro, na altura da fonte, na queda de pressão do leito e na estabilidade do regime de jorro. Utilizou-se quatro tipos de partículas inertes entre 2 e 5 mm de diâmetro, glicerol e água em testes hidrodinâmicos e suspensões de alumina em testes de secagem. Os principais fatores estudados foram a razão de volume de líquido injetado por volume do leito ( $V_{liq}/V_b$ ) e a presença de forças de coesão devido à adesão existente entre as partículas. A quantidade máxima de líquido injetada está relacionada à razão entre as forças inerciais da partícula e as forças viscosas ou de coesão que o filme líquido exerce sobre a partícula. Os resultados experimentais mostraram que as diferenças na fluidodinâmica entre um leito seco e um leito úmido depende da quantidade de líquido injetada e sua viscosidade, assim como da natureza do material inerte.

Materiais úmidos podem ser secados utilizando-se partículas inertes em um leito de jorro. BARRET e FANE (1990) realizaram um estudo de um sistema de secagem em termos de dois fatores operacionais: a taxa de evaporação e a taxa de remoção do filme. A taxa de secagem foi determinada pela análise da transferência de calor a partir de medidas de temperatura do gás e do sólido. A taxa de remoção do filme foi indiretamente determinada através da taxa de material acumulado no leito, sendo influenciada pela vazão do ar, temperatura de entrada, taxa de alimentação do líquido, material alimentado e altura do leito. Um modelo qualitativo foi proposto para estimar o efeito destes parâmetros na taxa de remoção do filme, assim como na transferência de calor. A partir desta investigação experimental, foram feitas as seguintes observações:

- Um aumento na taxa de alimentação do líquido pode aumentar a taxa de material depositado no leito e/ou aumentar o número de partículas recobertas.
- Um aumento na vazão do gás aumentará a taxa de transferência de calor assim como a quantidade de energia de colisão, reduzindo a taxa de acumulação do material.
- O processo é controlado pela taxa de remoção do filme e não pela taxa de evaporação.
- Um incremento na altura do leito provoca dois efeitos na taxa de acumulação de material no leito. Por um lado, reduz a taxa de circulação das partículas, favorecendo a remoção do filme. Por outro lado, reduz a velocidade da partícula e assim a energia de colisão, favorecendo o recobrimento. Logo, para uma dada vazão de gás e temperatura de entrada, deve haver uma altura ótima do leito.

Os autores concluíram que a transferência de calor e a evaporação ocorrem predominantemente na base do leito e na região do jorro.

Dentre as principais vantagens de um leito de jorro PATEL *et al.* (1986) destacam:

- Menor perda de carga comparada ao leito fluidizado.
- Para partículas maiores, o contato gás-sólido é superior àquele em um leito fluidizado.
- Pode-se processar materiais viscosos.

- Menor segregação dos sólidos.
- Construção e manutenção mais simples, não existindo partes móveis no processo do jato.

Segundo PATEL *et al.* (1986), a redução da velocidade mínima de jorro corresponde a uma característica de considerável significado prático na operação de leitos de jorro. A coesividade dos sólidos, o gradiente de porosidade no leito e a taxa de circulação do material no leito constituem importantes parâmetros fluidodinâmicos a serem estudados. Os autores realizaram ensaios com água e glicerol, utilizando-se partículas esféricas e não-esféricas. Observou-se que a vazão de jorro mínimo ( $Q_{jm}$ ) em leitos secos de partículas esféricas era cerca de 60% maior do que aquela em um leito de partículas não-esféricas com tamanho equivalente. O fluxo de sólidos no ânulo é bastante influenciado pelas forças de coesão. Portanto, a reologia do fluido injetado em um leito de jorro tem um impacto considerável no comportamento do jorro.

A queda de pressão no jorro decresce com o aumento da umidade no leito. Em particular, a altas viscosidades, onde as forças de coesão são maiores, a vazão de jorro mínimo ( $Q_{jm}$ ) em leitos úmidos é significativamente menor que em leitos secos.

A influência da presença de um pasta na estabilidade fluidodinâmica do leito de jorro durante a secagem foi estudada por SPITZNER NETO e FREIRE (1997, 2001) e SPITZNER NETO (2001). CUNHA *et al.* (1999) analisaram a variação de propriedades fluidodinâmicas de um leito de jorro em um sistema de alimentação pastosa (ovo homogeneizado) intermitente. Verificou-se que com o aumento da vazão de pasta, a vazão mínima de jorro ( $Q_{jm}$ ) tende a aumentar enquanto a queda de pressão de jorro estável ( $\Delta P_S$ ) tende a diminuir. Em um novo trabalho (CUNHA *et al.*, 2000), os autores relacionaram qualitativamente esta quantidade de pasta adicionada na alimentação em função do grau de saturação do leito. Uma metodologia de cálculo foi proposta baseada no balanço de forças entre partículas, relacionando a vazão mínima de jorro e o grau de saturação.

SPITZNER NETO e FREIRE (2000) propuseram um método para a medida do grau de saturação da pasta em leito de jorro durante o processo de secagem. O grau de saturação foi determinado pela seguinte Equação:

$$S = \frac{V_{liq}}{V_b} = (1 - \varepsilon_L) \cdot \left( \frac{m_w + m_{pst,s}}{\rho_{f'}} \right) \left( \frac{\rho_p}{m_p} \right) \quad (4)$$

Onde:  $V_{liq}$ : volume de pasta ou líquido ( $m^3$ )

$V_b$ : volume do leito fixo de partículas ( $m^3$ )

$\varepsilon_L$ : porosidade do leito

$m_w$ : massa de água (kg)

$m_{pst,s}$ : massa da pasta seca (kg)

$m_p$ : massa das partículas (kg)

$\rho_{f'}$ : densidade do filme ( $kg/m^3$ )

$\rho_p$ : densidade das partículas ( $kg/m^3$ )

A umidade do filme foi calculada por:

$$X_{f'} (\%B.S.) = 100 \cdot \frac{m_w}{m_{pst,s}} \quad (5)$$

Onde:  $X_{f'}$ : umidade do filme em base seca (%)

Os autores verificaram uma uniformidade da umidade do filme do ovo que reveste as partículas inertes em toda a porção do leito.

Em processos de secagem de suspensões, recobrimento de *pellets* ou granulação em leitos de jorro, fluidizado ou de jorro-fluidizado, a operação se torna mais complexa em virtude do surgimento de forças de coesão resultantes de pontes líquidas entre as partículas que acarretam problemas de aglomeração de partículas e uma baixa eficiência no contato gás-sólido.

PONT *et al* (2001), estudando a influência das propriedades físico-químicas dos sólidos durante o processo de granulação em leito fluidizado, verificaram que o crescimento do aglomerado é favorecido quando a tensão superficial da solução aumenta e o ângulo de contato decresce. O aumento da força de adesão da solução é função do

produto  $\sigma_{LV} \cos(\theta)$ , onde  $\sigma_{LV}$  é a tensão interfacial (líquido-vapor) e  $\theta$  é o ângulo de contato entre a superfície sólida e a gota líquida.

De acordo com RUMPF (1958), a resistência a pontes líquidas depende de forças capilares que existem devido à tensão capilar. Esta tensão é função da viscosidade da solução, do tamanho e da forma da partícula, da tensão superficial líquido-gás, além do ângulo de contato.

A medida do ângulo de contato tem sido utilizada para a quantificação da molhabilidade da partícula pela solução. Os métodos disponíveis para a estimação deste parâmetro podem ser divididos em dois grupos:

- Método direto: envolve a medida direta de uma gota líquida em uma superfície plana sólida. O ângulo de contato é determinado a partir da construção de uma tangente da gota no ponto de contato com a superfície sólida.
- Método indireto: baseia-se na penetração do líquido em um mesoporo através da tensão capilar.

PASSOS e MUJUMDAR (2000) estudaram as diferenças de comportamento em leito fluidizado e leito de jorro de partículas secas e úmidas. Foram identificados dois tipos de forças de interação partícula-partícula e seus efeitos na vazão de ar e no fluxo de sólidos em função da concentração de glicerol. Dentre as observações feitas, destacam-se:

- A formação do jorro e o colapso são distintos em leitos úmidos de partículas esféricas e não-esféricas.
- Um jorro interno é formado em leitos úmidos de partículas esféricas antes que se atinja o verdadeiro regime de jorro estável.
- As condições de jorro mínimo dependem fortemente da espessura da camada de cobertura das partículas, da porosidade do leito, do tamanho e da geometria da partícula inerte.

Os autores concluíram que o comportamento de um leito úmido depende da geometria da partícula e da força de ligações líquidas formadas nos pontos de contato entre as partículas.

Em um outro trabalho, PASSOS e MASSARANI (2000) propuseram uma metodologia de análise para a descrição de forças coesivas entre partículas:

1ª Etapa: Modelo para descrever o escoamento do gás através do leito de partículas, no qual as forças capilares são significativas. Aplica-se o critério de ruptura para sólidos granulados, correlacionando-se as tensões efetivas na matriz sólida com as propriedades coesivas do leito de partículas.

2ª Etapa: Relaciona-se a tensão de ruptura ( $\sigma$ ) com a Força capilar ( $F_{cap}$ ) resultante de pontes líquidas entre duas partículas.

3ª Etapa: Equaciona-se  $F_{cap}$  em função das propriedades do líquido e das partículas.

Em seguida, obtém-se uma relação entre  $F_{cap}$  e a queda de pressão no leito nas condições de fluidização incipiente. A determinação da resistência ao escoamento no leito devido à coesão entre partículas pode ser efetuada a partir da equação:

$$\sigma = \left[ \left( \frac{1 - \varepsilon_L}{\varepsilon_L} \right) \cdot \left( \frac{F_{cap}}{d_p^2} \right) \right] \quad (6)$$

na qual:  $\varepsilon_L$ : porosidade do leito

As partículas em leito de jorro são geralmente maiores que 1 mm, o que significa que as forças de coesão podem ser desprezadas. HE *et al.* (1997) analisaram o balanço de forças das partículas na região anular de um leito de jorro, adicionando dois parâmetros adimensionais, o ângulo de fricção ( $\phi$ ) e a porosidade do leito ( $\varepsilon_L$ ), às relações de escala propostas por GLICKSMAN (1984) para o scale-up de leito fluidizado. Dentre os parâmetros que devem ser controlados para se manter a similaridade mecânica no ânulo em um leito de jorro, destacam-se:

$g d_p / U_{ar}^2$ ,  $\rho_s d_p U_{ar} / \mu$ ,  $\rho_f / \rho_s$ ,  $H_L / d_p$ ,  $D_c / d_p$ ,  $\phi$ ,  $\phi$ ,  $\varepsilon_L$ , distribuição do tamanho de partículas e dimensões geométricas do leito.

na qual:  $g$ : aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )

$d_p$ : diâmetro da partícula (m)

$D_c$ : diâmetro interno da coluna (m)

$H_L$ : altura do leito (m)

$U_{ar}$ : velocidade superficial do ar de jorro (m/s)

$\rho_s$ : densidade da partícula ( $kg/m^3$ )

$\rho_f$ : densidade do fluido ( $kg/m^3$ )

$\mu$ : viscosidade do fluido ( $kg/m \cdot s$ )

$\phi$ : esfericidade das partículas

$\varphi$ : ângulo interno de fricção das partículas na fase densa (deg)

$\varepsilon_L$ : porosidade do leito

Para o jorro estável, deve-se manter os seguintes critérios:

$$D_i / d_p < 25 \sim 30$$

$$D_c / D_i > 3 \sim 12$$

$$H < H_{M,j}$$

$$Re \sim 100 \text{ (Para colunas largas admite-se } Re > 3000)$$

Onde  $H_{M,j}$ : altura máxima do jorro (cm)

A altos valores do número de Reynolds ( $Re > 1000$ ), as forças viscosas são desprezíveis se comparadas às forças inerciais. Na região intermediária ( $4 < Re < 1000$ ), tanto as forças viscosas como as inerciais são importantes. Para o scale-up do leito de jorro, ambas as forças devem ser consideradas, não sendo recomendável fazer simplificações.

O ângulo de fricção interno da partícula assim como sua esfericidade tem uma influência significativa na altura máxima de jorro, na altura da fonte e nos perfis longitudinais de pressão. As forças de interação partícula-partícula não devem ser ignoradas no scale-up do leito de jorro.

#### 2.4. Medidas de taxa de circulação

Várias modificações ao leito de jorro convencional foram propostas com o intuito de superar parte de suas limitações, melhorando-se a operacionalidade, a troca de calor e a eficiência do contato sólido-fluido. Uma dessas modificações consiste na introdução de um tubo central permitindo um melhor controle do tempo de residência do gás e do sólido e uma maior flexibilidade do projeto.

Este tubo separa as regiões de jorro e a anular, evitando os contínuos choques entre as partículas descendentes do ânulo e do jorro. BERRUTI *et al.* (1988) investigaram os efeitos dos parâmetros geométricos e operacionais sobre as velocidades de circulação dos sólidos à temperatura ambiente em um leito de jorro com areia e leito de jorro-fluidizado com tubo central (“draft tube”). Verificou-se que a circulação dos sólidos é fortemente afetada pela geometria do sistema e pelos fluxos no jorro e no ânulo. O leito de jorro fluidizado aparece como uma configuração mais versátil e de mais fácil controle do que o leito de jorro convencional. Os autores concluíram que a taxa de circulação dos sólidos pode ser facilmente controlada a partir do ajuste da localização do tubo central, altura relativa do jorro e fluxos auxiliares de aeração.

IJICHI *et al.* (1994) investigaram os efeitos da distância de separação do tubo central, seu diâmetro e a carga de partículas do leito no fluxo de gás na região anular, na concentração de partículas dentro do tubo e na taxa de circulação de partículas. Observou-se dois tipos de regime de fluxo: uma fase diluída, com movimento ascendente de partículas, no qual a concentração de partículas independe da velocidade do gás através do tubo; e uma fase densa, com movimento descendente de partículas, cuja concentração está fortemente relacionada à velocidade do gás no tubo. Verificou-se que o fluxo no ânulo decresce com o aumento da velocidade do gás de entrada, diâmetro do tubo central e a carga de partículas e cresce com o aumento da distância de separação do tubo central.

A concentração de partículas no tubo decresce com o aumento da velocidade do gás através do tubo e o diâmetro do tubo e aumenta com a carga de partículas no leito e a distância de separação do tubo, podendo ser medida através de três diferentes métodos:

- método por indutância (partículas magnetizadas)

- método da luz transmitida
- método volumétrico

$$W_p = A_a v_a (1 - \varepsilon_a) \quad (7)$$

na qual:  $W_p$ : vazão volumétrica de partículas no ânulo ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )

$A_a$ : área transversal do ânulo ( $\text{cm}^2$ )

$v_a$ : velocidade das partículas no ânulo ( $\text{cm}/\text{s}$ )

$\varepsilon_a$ : porosidade do ânulo

A taxa de circulação de partículas é proporcional à força de impulsão das partículas circulantes. Uma das formas de medida consiste na utilização de uma balança acoplada ao alimentador, coletando-se partículas em intervalos pré-fixados. A taxa de circulação relativa no tubo aumenta com a velocidade de gás no tubo, com a distância de separação do tubo em relação ao orifício de entrada do gás e com a carga; e decresce com o diâmetro do tubo.

Em HATTORI *et al.* (1998), medidas de taxa de circulação foram realizadas em um leito de jorro com um fundo plano, sendo o gás então introduzido através de uma tela a uma velocidade uniforme. Os resultados foram comparados ao leito de jorro convencional (com orifício de entrada para o gás). Verificou-se que o fluxo de gás do ânulo para o jorro através da distância existente entre a parte inferior do tubo central e a tela de entrada do gás é consideravelmente maior do que o correspondente em um leito de jorro convencional. A taxa de circulação de sólidos aumenta com o diâmetro do tubo central. A distância entre o tubo e a tela não representa um grande efeito. Esta configuração de leito torna-se vantajosa em processos que exijam elevadas taxas de circulação de sólidos.

KALWAR *et al.* (1993) estudaram os fatores que influem na circulação de grãos em leito de jorro bidimensional com tubo central, variando os ângulos de inclinação da parede cônica da base, largura e distância de separação do tubo central. Verificou-se que a taxa de circulação no ânulo aumentou com o comprimento do leito. O tempo de residência foi maior no caso do ângulo de inclinação de  $45^\circ$  do que para o de  $60^\circ$ , devido ao maior fluxo de grãos neste caso. O emprego do tubo central em leito de jorro bidimensional

apresentou-se bastante efetivo no controle da taxa de circulação de sólidos. Uma equação empírica para a taxa de circulação de grãos em leito de jorro foi desenvolvida nas condições de jorro mínimo.

$$\frac{M_s}{\rho_p A_a (g \cdot z_i)^{0.5}} = (D_{hid,t} / D_{hid,i})^{2.37} \Theta^{0.6} \varepsilon_L^{7.53} \left( \frac{z_i}{L_t} \right)^{0.34} \left( \frac{d_p}{D_{hid,i}} \right)^{0.26} \left( \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \right)^{0.56} \left[ \frac{U_{ar}^2 \mu}{g^2 H_c d_p^2 \rho_f^2} \right]^{-0.07} \quad (8)$$

na qual:  $M_s$  : fluxo mássico dos sólidos descendentes (kg/s)

$A_a$ : área transversal do ânulo (m<sup>2</sup>)

$z_i$ : distância normal do orifício (m)

$L_t$ : largura do tubo central ou jorro(m)

$D_{hid,t}$ : diâmetro hidráulico do jorro ou tubo central (m)

$D_{hid,i}$ : diâmetro hidráulico do orifício (m)

$d_p$ : média geométrica do diâmetro das partículas (m)

$\varepsilon_L$ : porosidade do leito

$\Theta$ : ângulo de inclinação(°)

$\rho_p$ : densidade das partículas (kg/cm<sup>3</sup>)

$\rho_f$ : densidade do fluido (kg/m<sup>3</sup>)

$U_{ar}$ : velocidade mínima superficial do ar através do leito para o jorro (m/s)

$\mu$ : viscosidade absoluta (kg/m.s)

$H_c$ : altura da coluna (m)

Em SULLIVAN *et al.* (1987) modelos cinéticos e de fluido ideal foram propostos para predição da circulação de sólidos em leito de jorro. Medidas de perfis de velocidade de sólidos foram realizadas com o auxílio de uma sonda de fibra óptica para a validação da condição crítica do modelo proposto.

GRBAVCIC *et al.*(1992) investigaram o perfil de escoamento do fluido e a velocidade de circulação dos sólidos em um leito fluidizado em fase líquida com um tubo central. Dentre os parâmetros operacionais e de projeto estudados estão a distância entre o orifício de entrada e o tubo central, fluxos do jorro e do ânulo e vazão total de fluido. Um

modelo unidimensional permanente proposto por GRBAVCIC *et al.* (1991a) apresentou uma boa predição do fluxo mássico de sólidos no tubo central.

O leito de jorro em jato (diluído) é alcançado a partir de altas velocidades de gás, reduzindo-se a altura do leito estático e modificando-se a geometria do leito para formas cônico-cilíndricas. Esta configuração apresenta uma velocidade de partícula mais elevada e uma maior porosidade do leito se comparada ao leito de jorro convencional, o que resulta em uma maior diluição gás-sólido e uma taxa de circulação de sólidos mais elevada.

UEMAKI e TSUJI (1992) compararam o movimento de partículas em um leito de jorro em jato a um leito de jorro convencional, determinando-se a velocidade das partículas, a taxa de circulação dos sólidos e a variação radial da porosidade do leito. A velocidade local das partículas e o fluxo mássico de sólidos foram medidos através de uma sonda de fibra óptica e uma sonda piezoelétrica, respectivamente. Verificou-se que a velocidade das partículas ascendentes no jorro aumenta consideravelmente com a velocidade do gás, ao contrário da velocidade descendente no ânulo, que praticamente não foi influenciada pela velocidade do gás. A taxa de circulação em um leito de jorro em jato é da mesma ordem de grandeza de um leito de jorro convencional. A porosidade na região anular (0,9) em um leito de jorro diluído é maior que na região de jorro (0,7), ao contrário do que ocorre em um leito de jorro convencional. A porosidade do leito na região do ânulo e jorro em um leito de jorro em jato pode ser determinada através da seguinte Equação:

$$\varepsilon = 1 - \left( \frac{Q_s}{\rho_p} \right) \cdot v_p \quad (9)$$

na qual:  $Q_s$ : fluxo mássico de sólidos ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ )

$\rho_p$ : densidade das partículas ( $\text{kg/m}^3$ )

$v_p$ : velocidade axial das partículas ( $\text{m/s}$ )

A porosidade do ânulo em leito de jorro é freqüentemente estimada a partir de um balanço de massa do fluxo ascendente de partículas no jorro e o fluxo descendente de sólidos no ânulo. Para a obtenção deste balanço de massa, a velocidade das partículas é geralmente medida com o auxílio de uma câmara de vídeo de alta velocidade através de

uma parede transparente. Outras técnicas incluem sondas piezoelétricas (MIKHAILLIK e ANTANISHIN, 1967), sondas capacitivas (GOLTSIKER, 1967) e absorção por raio  $\beta$  (ELPERIN *et al.*, 1969).

PIANAROSA *et al.* (2000) utilizaram três diferentes tipos de fibra óptica para determinar porosidades locais e perfis de velocidade de partículas em um leito de jorro fluidizado de geometria cilíndrica ( $D_c = 152$  mm,  $H_c = 900$  mm). Observou-se que a porosidade no jorro decresce com o aumento da vazão de ar auxiliar e independe do diâmetro da partícula nas condições estudadas (esferas de vidro,  $d_p = 1,3$  mm; 1,8 mm; 2,5 mm). A porosidade local do ânulo aumenta com a altura. As partículas no jorro aceleram inicialmente e depois desaceleram na região superior da coluna. A velocidade da partícula no jorro decresce com o aumento do fluxo do ar auxiliar, acarretando em uma redução da taxa de circulação líquida dos sólidos. A vazão mássica de sólidos no jorro e no ânulo foi determinada a partir das seguintes equações:

$$Q_j = 2\pi\rho_p \int_0^{r_j} v_j(1-\varepsilon_j)r.dr \quad (\text{jorro}) \quad (10)$$

$$Q_a = 2\pi\rho_p \int_{r_j}^R v_a(1-\varepsilon_a)r.dr \quad (\text{ânulo}) \quad (11)$$

Onde: R: raio de volume (m)

$r_j$ : raio do jorro (m)

$v_j$ : velocidade das partículas no jorro (m/s)

$v_a$ : velocidade das partículas no ânulo (m/s)

$\varepsilon_j$ : porosidade do jorro

$\varepsilon_a$ : porosidade do ânulo

FREITAS e FREIRE (1997b) estudaram o efeito da taxa de alimentação de partículas, fluxo do ar e altura do leito na fluidodinâmica de um leito de jorro cônico-cilíndrico, utilizando-se um tubo central ( $d_t = 5$  cm;  $z = 18$  cm, 28 cm). A velocidade da

partícula e a taxa de recirculação foram determinadas em um leito com paredes transparentes. Dois diferentes métodos de medida de velocidade superficial do ar na região do ânulo foram desenvolvidos. O primeiro consiste em um cálculo da velocidade do ar no ânulo a partir de uma curva de calibração usando-se um tubo de Pitot e o segundo, em um método iterativo entre as pressões estática e dinâmica locais. Os resultados obtidos de ambos os métodos foram comparados àqueles baseados no balanço de massa do ar na entrada e no jorro. Observou-se que o fluxo através do ânulo cresce ligeiramente com o aumento da altura do leito. A taxa de circulação cresce com o aumento da vazão do ar de entrada, mas diminui com a taxa de alimentação de partículas através da base. A velocidade de sólidos no jorro cresce tanto com o aumento da vazão de ar como com a taxa de alimentação de partículas.

O efeito das condições operacionais e geométricas (ângulo da base, diâmetro do orifício de entrada do gás, altura do leito estático, diâmetro da partícula e velocidade do gás) na velocidade das partículas nas três zonas em um leito de jorro – ânulo, jorro e fonte – foi investigado por OLAZAR *et al.* (2001), utilizando-se uma sonda de fibra óptica. A intensidade da luz refletida pelas partículas que passam em frente à sonda depende do tipo ou composição da partícula, da distribuição do tamanho e porosidade do leito.

Uma relação empírica foi proposta para o cálculo dos parâmetros da Equação proposta por EPSTEIN e GRACE (1984) para predição da componente vertical da velocidade da partícula no jorro:

$$v_v = v_j \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_j} \right)^m \right] \quad (12)$$

na qual:  $v_v$ : componente vertical da velocidade da partícula no jorro (m/s)

$v_j$ : componente vertical da velocidade da partícula no jorro (m/s)

$r_j$ : raio do jorro (m)

Sendo:  $1,3 < m < 2,2$

$$m = 2,0 + (m_o - 2) \cdot \exp(-100z^2) \quad (13)$$

Onde:

$$m_o = 13,3 \cdot \left(\frac{d_p}{D_c}\right)^{0,20} \cdot \left(\frac{H_b}{D_c}\right)^{-0,16} \cdot \left(\frac{U}{U_{jm}}\right)^{0,45} \cdot \Theta^{-0,09} \cdot \exp\left(\frac{-5,11D_i}{D_c}\right) \quad (14)$$

na qual:  $d_p$ : diâmetro da partícula (m)

$D_c$ : diâmetro interno da coluna,

$D_i$ : diâmetro do orifício de entrada do gás(m)

$H_b$ : altura do leito fixo de partículas (m)

$U_{ar}$ : velocidade superficial do gás (m/s)

$U_{jm}$ : velocidade de jorro mínimo (m/s)

$\Theta$ : ângulo da base do cone (rad)

A componente horizontal da velocidade de sólidos na zona de jorro foi calculada a partir de um balanço de massa aplicado em um elemento diferencial de volume:

$$\frac{\partial}{\partial z} [(1-\varepsilon)\rho_s v_v] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r(1-\varepsilon)\rho_s v_h] = 0 \quad (15)$$

- Condições de Contorno no Jorro:

Interior do leito:  $z = 0$  e  $0 < r < r_{\text{central}}$ ,  $\varepsilon = 1$

Eixo central:  $r = 0$ ,  $v_h = 0$   $\frac{\partial v_v}{\partial r} = 0$

Interface ânulo-jorro:  $r = r_j$ ,  $v_v = 0$ ,

$$z = 0 \text{ e } r = r_{\text{central}}, v_v = 0$$

A componente horizontal da velocidade de sólidos na região anular foi determinada por meio do mesmo balanço de massa apresentado acima aplicado em um elemento diferencial de volume. As condições de contorno são:

Interior do leito:  $z = 0$  e  $r_i < r < r_{\text{central}}$ ,  $\varepsilon = \varepsilon_b$

Interface ânulo-jorro:  $r = r_j$ ,  $v_v = 0$

Parede do leito:

Seção cilíndrica:  $r = r_c$ ,  $v_h = 0$

Seção cônica:  $r = r_{parede}$ ,  $\frac{v_v}{v_h} = \tan(\Theta/2)$

Superfície do leito:  $z = H$  e  $r = r_{parede}$ ,  $\varepsilon_a = \varepsilon_b$

A componente horizontal da velocidade de sólidos na região da fonte foi também calculada a partir do mesmo balanço de massa aplicado em um elemento diferencial de volume, com a seguinte condição de contorno:

Interface jorro-fonte:  $r = r_{j-fonte}$ ,  $v_v = 0$

na qual:  $v_h$ : componente horizontal da velocidade do sólido (m/s)

$\varepsilon$ ,  $\varepsilon_a$ ,  $\varepsilon_b$ : porosidade do leito em qualquer posição, porosidade do leito no ânulo, porosidade do leito em leito estático, respectivamente

$r_{central}$ ,  $r_j$ : raio do eixo central e do eixo de entrada do gás (m)

$r_{j-fonte}$ : raio na interface jorro-fonte (m)

$r_{parede}$ : posição radial do eixo da parede no nível  $z$  (m)

$r_c$ : raio da coluna (m)

$H$ : altura do leito expandido (m)

$\rho_s$ : densidade do sólido ( $\text{kg/m}^3$ )

A partir deste modelo, os autores verificaram que o módulo da velocidade nas três zonas é maior próximo à base e decresce à medida que se desloca axialmente na zona correspondente. Os valores da componente horizontal da velocidade no jorro são bem superiores àqueles correspondentes na região anular. Na interface jorro-fonte, exceto ao longo do eixo, o vetor da velocidade tem uma componente horizontal significativa, aumentando à medida que se desce verticalmente no eixo.

## 2.5. Medidas de concentração e taxa de circulação

WERTHER (1999) pesquisou as diversas técnicas de medidas empregadas em sistemas de leito fluidizado gasoso para determinação da concentração em volume de sólidos, velocidades e fluxos mássicos de sólidos no interior do sistema, distribuição lateral do gás fluidizado, temperaturas e concentrações do gás.

Essas técnicas foram agrupadas em três categorias:

- técnicas para medidas de rotina (empregadas usualmente nas indústrias), que incluem medidas de gradiente de temperatura e pressão;
- técnicas mais sofisticadas para medidas locais no interior do sistema, que incluem sondas de absorção para medidas de fluxos mássicos de sólidos locais, sondas de transferência de calor para detecção de zonas desfluidizadas, sondas capacitivas, para medidas de concentração e velocidade de sólidos sob altas temperaturas;
- técnicas avançadas para investigações acadêmicas do fenômeno da fluidização básica, que incluem sondas de fibra óptica, difração a laser, técnicas sensoriais e métodos de imagens e tomográficas.

Em SHELUKAR et al. (2000), técnicas quantitativas foram empregadas para medir dois fatores que controlam a uniformidade do recobrimento de comprimidos em um processo Wurster. Para a medição do tempo de circulação, usou-se a técnica de traço-magnético. Um espectrofotômetro foi usado para medir quantidades extremamente baixas de camada depositada nos comprimidos. Experimentos de imagem de vídeo a alta velocidade foram realizados para o estudo do movimento dos comprimidos através da zona de “spray”.

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGIA EXPERIMENTAL

#### 3.1. Materiais

Foram escolhidas seis partículas com diferentes propriedades físicas para a realização dos ensaios de recobrimento em leito de jorro, tais como: esferas de vidro, polietileno de baixa densidade (PEBD), poliestireno (PS), polipropileno (PP), placebo e ABS<sup>®</sup>. As partículas foram analisadas e classificadas quanto ao tipo de material, forma e tamanho, densidade aparente e volumétrica (*bulk*), porosidade, ângulo de repouso e escoabilidade. Também foi determinado o ângulo de contato entre a superfície destas partículas e a gota da suspensão de recobrimento. O objetivo deste estudo é avaliar a influência destas características físicas na fluidodinâmica do processo de recobrimento em leito de jorro.

#### 3.2. Caracterização física das partículas

##### 3.2.1. Diâmetro médio

A análise granulométrica das partículas foi determinada pelo peneiramento em peneiras padronizadas Tyler. O diâmetro médio foi calculado com a definição de Sauter.

$$\bar{d}_p = \sum \frac{1}{\Delta x / D} \quad (16)$$

Onde:  $\Delta x$ : fração mássica retida na peneira

$\bar{D}$ : diâmetro médio da abertura da peneira superior e inferior (mm)

### 3.2.2. Esfericidade

A esfericidade da partícula foi obtida pelo método de Peçanha e Massarani (1986). Neste método a esfericidade é obtida pela razão do maior diâmetro inscrito e o menor diâmetro circunscritivo na área projetada da partícula num plano estável. Para o placebo, foi utilizada a relação entre a área superficial da esfera de mesmo volume que o placebo e a área superficial do placebo. Foram realizadas em média 20 medidas para cada tipo de partícula.

$$\phi = \frac{d_{ic}}{d_{cc}} \quad (17)$$

Onde:  $d_{ic}$ : diâmetro inscrito (mm)

$d_{cc}$ : diâmetro circunscritivo (mm)

### 3.2.3. Densidade Aparente da Partícula

A densidade aparente da partícula é definida como a razão da massa da partícula e do volume total da partícula, incluindo o volume que os poros ocupam. A determinação da densidade aparente foi realizada por porosimetria de mercúrio. Realizou-se também a determinação desta característica pelo método clássico de deslocamento de líquido, utilizando um picnômetro calibrado e, como fluido, glicerina, para o placebo, e água destilada, para as demais partículas, de modo a comparar os resultados obtidos por ambos os métodos.

$$\rho_{ap} = \frac{m_p}{V_{pic} - \frac{m_w}{\rho_w}} \quad (18)$$

Onde:  $m_p$ : massa de partículas (g)

$m_w$ : massa de água (g)

$\rho_w$ : densidade da água ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$V_{pic}$ : volume do picnômetro ( $\text{cm}^3$ )

---

### 3.2.4. Densidade Volumétrica dos Sólidos

A densidade volumétrica (também conhecida como densidade *bulk*) dos sólidos é definida como a razão entre a massa de partículas e o volume que elas ocupam em um recipiente quando em arranjo normal, ou seja, são dispostas em queda livre em um recipiente de volume calibrado.

$$\rho_{vol} = \frac{m_p}{V_{recp}} \quad (19)$$

Onde:  $V_{recp}$ : volume do recipiente ( $\text{cm}^3$ )

### 3.2.5. Densidade Real das Partículas

A densidade real é definida como a razão entre a massa da partícula e o volume que a estrutura do sólido ocupa, ou seja, excluindo os poros do sólido. A determinação da densidade real foi realizada por picnometria a Hélio, pelo equipamento Accupyc 1330, da marca Micromeritics.

$$\rho_{real} = \frac{m_p}{V_s} = \frac{m_p}{V_{total} - V_{poros}} \quad (20)$$

Onde:  $V_s$ : volume da estrutura do sólido ( $\text{cm}^3$ )

$V_{total}$ : volume total da partícula ( $\text{cm}^3$ )

$V_{poros}$ : volume de poros da partícula ( $\text{cm}^3$ )

### 3.2.6. Área superficial

A área superficial da partícula foi obtida pelo método de BET, por adsorção física de  $\text{N}_2$  a 77 K, utilizando o equipamento Gemini III 2375 Surface Area Analyzer, da marca Micromeritics.

### **3.2.7. Porosidade**

A porosidade da partícula é a razão do volume de poros da partícula sobre o volume total da partícula. A porosidade da partícula foi obtida pela análise de porosimetria de mercúrio, com o equipamento Autopore II, da marca Micromeritics.

### **3.2.8. Ângulo de repouso**

O ângulo de repouso da partícula foi obtido pelo método do tambor rotatório, sendo este o ângulo de inclinação formado ao deslizamento da primeira camada de partículas.

### **3.2.9. Escoabilidade**

A escoabilidade das partículas foi obtida a partir da medida do tempo em que determinada massa de partícula escoou através de um funil de 80° com um orifício de 1,5cm de diâmetro. A velocidade de escoamento foi determinada dividindo-se o valor de escoabilidade pela densidade aparente de cada partícula.

## **3.3. Definição da Formulação e Preparação da suspensão**

A formulação da suspensão aquosa polimérica utilizada nos ensaios de recobrimento tem como base o estudo anterior realizado por ATAÍDE (1996) para o recobrimento de comprimidos em leito de jorro e jorro fluidizado. Determinou-se também as propriedades desta suspensão como massa específica, tensão superficial, reologia e molhabilidade com o sólido (ângulo de contato).

A suspensão de recobrimento é preparada a partir do polímero de hidroxietilcelulose. O polietileno glicol é usado como plastificante. O estearato de magnésio reduz a tensão superficial da suspensão. O dióxido de titânio é opacificante. O

talco tem como função tornar mais lisa a superfície recoberta. O pigmento utilizado foi o corante à base de laca de alumínio vermelho 40, também utilizado na indústria alimentícia. A formulação da suspensão de recobrimento utilizada encontra-se na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1 – Formulação da suspensão polimérica aquosa.**

Reagentes	% em massa
Hidroxietilcelulose (Cellosize®)	3,50
Polietileno Glicol 6000	0,75
Estearato de Magnésio	1,00
Dióxido de Titânio	1,25
Pigmento	1,00
Talco	3,50
Água	89,00
C <sub>s</sub> (%)	11,00

A suspensão foi preparada de acordo com o seguinte procedimento. Inicialmente, preparou-se uma solução Cellosize (59% da água total e HEC). O HEC é diluído em água sob agitação constante. Em seguida, preparou-se uma suspensão de pigmentos a partir dos demais constituintes da Tabela 3.1. Diluiu-se na seqüência o polietileno glicol, o dióxido de titânio, o talco, o pigmento e o estearato de magnésio em 30% da água total sob agitação constante. Juntou-se, então, a solução Cellosize com a suspensão de pigmentos, também sob agitação. Finalmente, passou-se a suspensão de recobrimento em um moinho coloidal por no mínimo 20 minutos. A suspensão foi armazenada em geladeira em recipientes de 2000 ml.

### 3.4. Caracterização da suspensão

A suspensão de recobrimento foi caracterizada quanto à massa específica, tensão superficial, reologia e ângulo de contato (molhabilidade).

#### 3.4.1. Massa Específica

A massa específica da suspensão foi determinada por picnometria. Foram feitas medidas de massa específica da suspensão a diversas temperaturas, variando-se de 14 a 37°C. Fez-se uma curva de calibração desta propriedade em função da temperatura.

#### 3.4.2. Tensão Superficial

A tensão superficial da suspensão foi medida pelo tensiômetro de DuNoüy da marca KSB- SIGMA, nas temperaturas de 25 e 35°C, valores estes em que a suspensão de recobrimento foi atomizada. A tensão é determinada a partir da medida da força necessária para estender o filme mostrado na Figura 3.1.

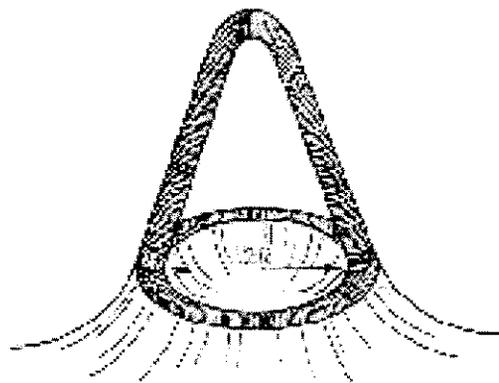


Figura 3.1: Detalhe do anel do tensiômetro de DuNoüy (CASTELLAN, 1996).

Para fazermos a medida colocamos o anel pendurado no braço de nivelamento e suspendemos a suspensão e o braço nivelado na horizontal, de modo a ajustarmos o ponto zero da balança de torção. O anel é então puxado lentamente pela balança de torção enquanto que a plataforma é abaixada para que o braço permaneça em nível. A leitura é feita quando o anel se desprende do líquido. A força é igual ao comprimento do fio em contato com o anel ( $2 \times 2\pi R$ ) vezes  $\gamma$ , a força por unidade de comprimento. A Figura 3.2 apresenta o esquema do equipamento utilizado para a medida da tensão superficial.

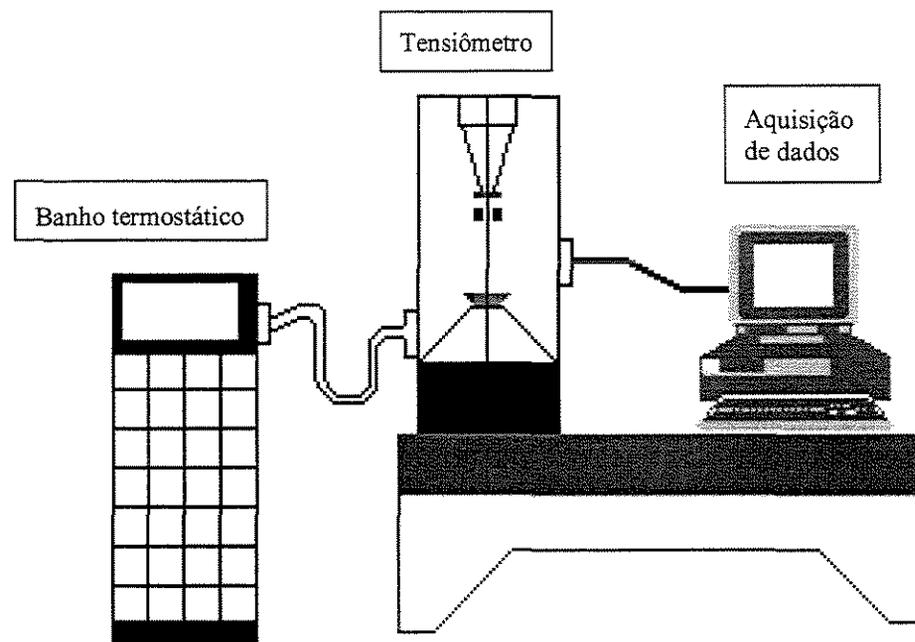


Figura 3.2: Esquema do tensiômetro de DuNoüy.

### 3.4.3. Reologia

A reologia foi obtida em um reômetro capilar, através da determinação da curva pseudo-reológica. Mediu-se a vazão da suspensão em escoamento laminar a diferentes alturas e, através da Equação 21 obteve-se a tensão de cisalhamento. A pseudotaxa de

deformação foi obtida a partir da Equação 23. Construiu-se uma curva de tensão de cisalhamento *versus* pseudo-taxa de deformação, de acordo com a Equação 24.

$$\tau_r = \frac{D\Delta P}{4Z} \quad (21)$$

na qual:  $\Delta P = \rho g \Delta h$  (22)

$D_{\text{cap}}$ : diâmetro interno do capilar (m)

$Z$ : comprimento do capilar (m)

$\tau_r$ : tensão de cisalhamento ( $\text{N/m}^2$ )

$$\gamma_r = \frac{8v}{D} \quad (23)$$

na qual:  $v$ : velocidade média do fluido

$\gamma_r$ : taxa de deformação ( $\text{s}^{-1}$ )

$$\ln(\tau_r) = \ln(k) + n \ln\left(\frac{8v}{D}\right) \quad (24)$$

na qual:  $k$ : índice de consistência

$n$ : índice de comportamento

Se os dados se ajustarem à Equação 24, o fluido é Newtoniano ou se comporta de acordo a lei de potência: fluido Power-Law. Nesse caso, se  $n=1$ , o fluido é Newtoniano. Se  $n<1$ , o fluido é considerado pseudoplástico e se  $n>1$ , o fluido é dilatante.

#### 3.4.4. Ângulo de contato

O ângulo de contato ( $\theta$ ) é o ângulo formado entre a superfície da partícula e a linha tangente onde a gota cai. Depende da energia de superfície da partícula e da tensão superficial do líquido. Utilizou-se para essa medida o micrômetro de ângulo de contato da

marca Cole-Parmer, com acurácia de  $\pm 2^\circ$ . Foram feitas 20 medidas de ângulo de contato para cada partícula, a fim de se obter uma melhor precisão.

A molhabilidade de um sólido por um líquido é caracterizada em função do ângulo de contato que a gota do líquido faz no sólido e da tensão superficial do líquido.

O ângulo de contato é obtido através de um balanço de tensões interfaciais, como mostra a Figura 3.3, e é definido pela equação de Young:

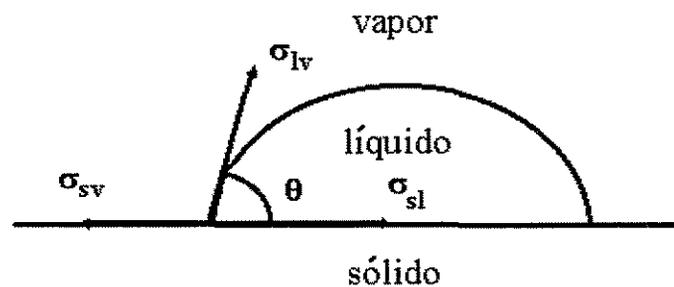


Figura 3.3 – Ângulo de contato do sistema sólido-líquido-vapor.

$$\sigma_{lv} \cos \theta + \sigma_{ls} = \sigma_{sv} \quad (25)$$

na qual:  $\sigma_{lv}$ : tensão na interface líquido-vapor ( $\text{N/m}^2$ )

$\sigma_{ls}$ : tensão na interface líquido-sólido ( $\text{N/m}^2$ )

$\sigma_{sv}$ : tensão na interface sólido-vapor ( $\text{N/m}^2$ )

Os líquidos que molham a superfície do sólido possuem  $\theta < 90^\circ$ , enquanto os que não molham têm valores de  $\theta$  maiores que  $90^\circ$ . Desta forma, os limites para o ângulo de contato são:  $\theta = 0^\circ$  e  $\theta = 180^\circ$  definidos como molhamento completo, onde o espalhamento se dá de forma espontânea, e o não molhamento completo, onde as gotas se aglutinam em contato com a superfície do sólido. O ângulo de contato  $\theta$  é uma propriedade do sistema sólido-líquido-vapor.

Para a medida do ângulo de contato utilizando o equipamento citado, deve-se utilizar uma superfície lisa e plana do sólido. Para tanto, foram confeccionados filmes a partir da prensagem do PP, PEBD, PS e ABS® nas condições apresentadas na Tabela 3.2. A prensa utilizada foi a Carver AccuStamp- Modelo 3986 da marca Fred & Carver Inc.

USA. Para a esfera de vidro, utilizou-se uma placa de vidro e para o placebo, a medição foi realizada diretamente sobre a superfície da partícula, pois esta apresentava uma superfície plana. Vários testes preliminares, juntamente com informações da literatura, permitiram o estabelecimento das condições especificadas na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2: Condições para prensagem dos filmes.**

MATERIAL	TEMPERATURA(°C)	PRESSÃO (psia)	TEMPO (min)
ABS®	160	3000	1
PP	180	2000	1
PEBD	130	2200	1
PS	240	2000	1

### 3.5. Métodos Experimentais

#### 3.5.1. Sistema Experimental e Procedimento

O sistema experimental utilizado nos ensaios de recobrimento pode ser visualizado na Figura 3.4. O ar de jorro é alimentado por um soprador (1). A água serve como fluido refrigerante para o resfriador (2), sendo este utilizado quando se trabalha a temperatura inferior a 50 °C. A vazão de ar é controlada pela válvula globo (3) e medida pelo conjunto da pressão estática na linha (4) e a queda de pressão na placa de orifício (18mm de diâmetro) (5), acoplados a um conjunto de manômetros diferenciais de mercúrio (6) e (7), respectivamente. O ar de jorro atravessa um leito de sílica (8), sendo aquecido por um conjunto de três resistências (9). O ar chega à entrada do leito (10), passando pela placa distribuidora que suporta as partículas. A temperatura do ar na entrada do leito e na região do ânulo é acompanhada pelo indicador de temperatura (14). A queda de pressão no leito é acompanhada pelo manômetro diferencial de água (11). O bico atomizador (15), de duplo fluido, encontra-se sobre o leito de partículas, recebendo ar da linha de ar comprimido (16) e a suspensão de recobrimento (18) por meio da bomba peristáltica (17). Durante os ensaios são coletadas amostras na região do ânulo por um ponto de coleta. A umidade relativa na

entrada e na saída do leito é medida por higrômetros em pontos específicos (12) e (13), respectivamente.

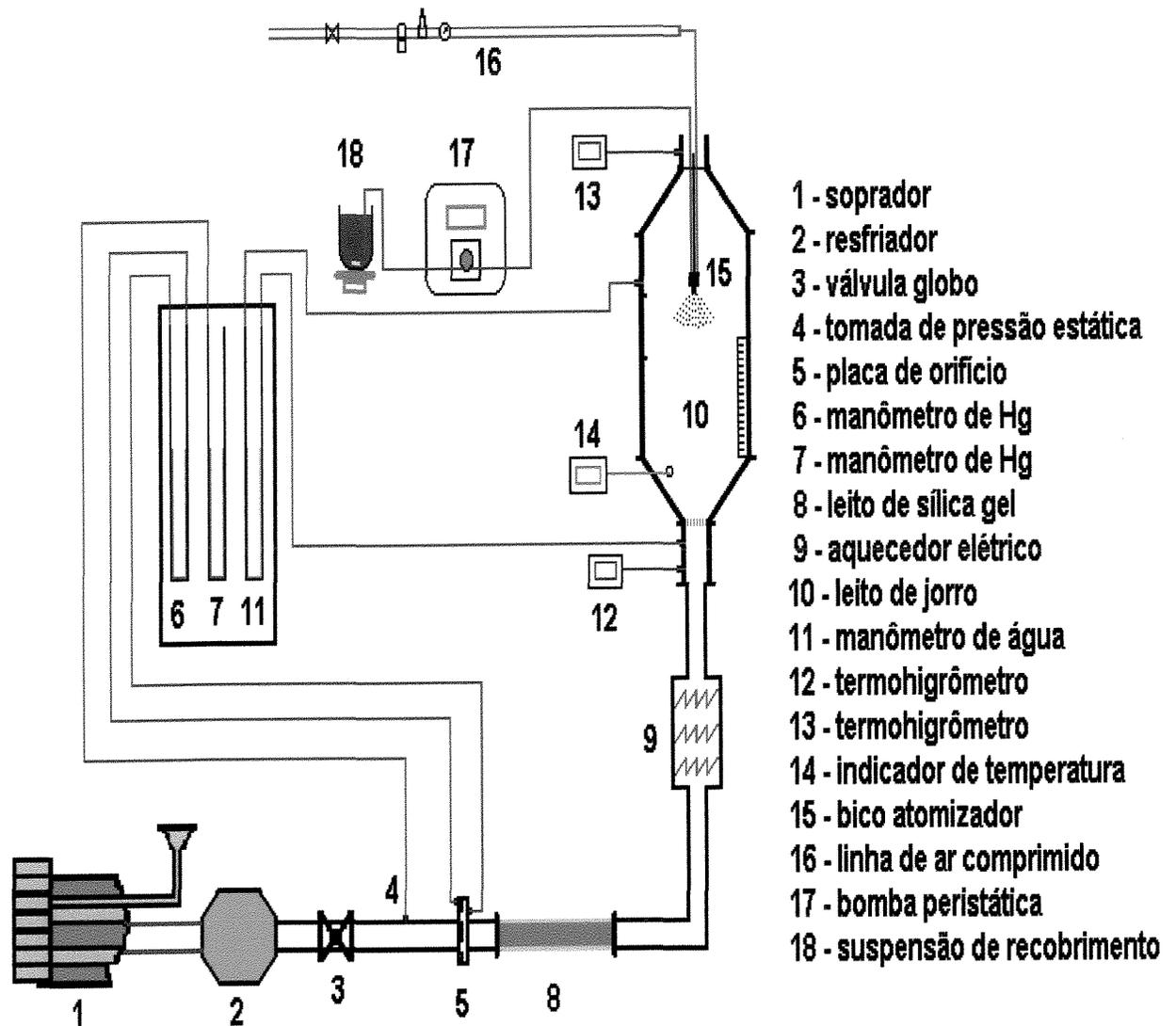


Figura 3.4: Esquema do sistema experimental.

O leito de jorro utilizado no experimento é construído em acrílico, de geometria cone-cilíndrica, cujas dimensões podem ser visualizadas no esquema seguinte. As

dimensões seguem as recomendações de projeto para operação em regime estável (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

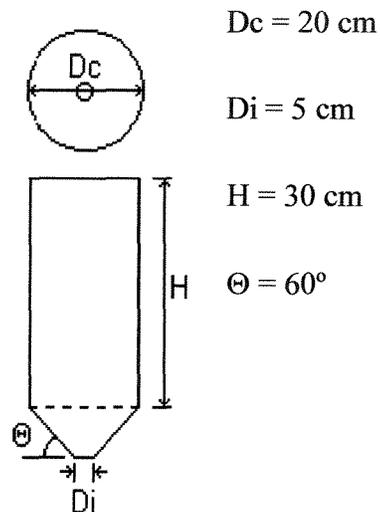


Figura 3.5: Esquema do leito de jorro.

O procedimento experimental adotado pode ser dividido em algumas etapas:

1ª Etapa: Caracterização física das partículas de acordo com o tipo de material, forma e tamanho, densidades aparente e volumétrica (*bulk*), porosidade, ângulo de repouso e escoabilidade.

2ª Etapa: Preparação da suspensão e análise das propriedades: massa específica, tensão superficial, reologia e molhabilidade.

3ª Etapa: Estudo fluidodinâmico a seco de todas as partículas previamente selecionadas e caracterizadas, variando-se a carga mássica, obtendo-se também a carga máxima na qual ainda se obtém um regime de jorro estável.

4ª Etapa: Determinação das condições operacionais para o recobrimento, a partir de testes preliminares: temperatura, pressão de atomização, vazão de gás do jorro.

5ª Etapa: Ensaios de recobrimento em leito de jorro, de modo a se analisar a fluidodinâmica e determinar a capacidade máxima de líquido jorrável antes do colapso, ou seja, a condição de saturação e/ou conteúdo de umidade das partículas limite para a estabilidade do jorro.

6ª Etapa: Estabelecer uma metodologia de medida da taxa de circulação das partículas no leito durante o recobrimento, e se possível correlacionar esta taxa com o grau de saturação do leito no decorrer do tempo.

### 3.5.2. Estudo Fluidodinâmico em leito de jorro a seco

Inicialmente, foram realizados os ensaios fluidodinâmicos sem alimentação de suspensão para todas as partículas em estudo, variando-se as cargas mássicas, até a obtenção da máxima carga de partículas para a qual ainda se verificava um regime de jorro estável. Para tanto, carregava-se o leito com a quantidade desejada de partículas, medindo-se a altura do leito fixo. Aumentava-se gradativamente a vazão de ar até a máxima capacidade do soprador, e, a cada variação desta, efetuava-se uma leitura dos valores de pressão estática, queda de pressão da placa de orifício e do leito. À medida que o processo ia sendo realizado, fazia-se anotações sobre mudanças no comportamento do leito de jorro. Em seguida reduzia-se gradativamente a vazão de ar até zerá-la.

A vazão de ar de jorro foi determinada utilizando-se a Equação de aferição de Ower e Pankhurst (1977).

$$Q_{ar} = K \cdot \xi \cdot \alpha \cdot a_2 \sqrt{\frac{1}{1 - m^2} (\Delta P_1) \frac{b}{c + T}} \quad (26)$$

Sendo:  $Q_{ar}$  - vazão mássica do ar [kg/min]

$\alpha$  - coeficiente de descarga para a placa de orifício

T - temperatura do ar [°C]

$\Delta P_1$  - queda de pressão na placa de orifício [cm H<sub>2</sub>O]

m -  $a_2/a_1$

$a_1$  – área do tubo [cm<sup>2</sup>]

$a_2$  – área de orifício da placa [cm<sup>2</sup>]

$b$  – pressão barométrica local [mmHg]

$\xi$  - fator de compressibilidade para a placa de orifício

$$\text{Onde: } \xi = 1 - \beta \frac{(\Delta P_1)}{P_{est,1}} \quad (27)$$

$$\beta = 0,3041 + 0,0876m - 0,1166m^2 + 0,4089m^3$$

$$\alpha = 0,5959 + 0,0312m^{1,05} - 0,184m^4$$

$P_{est,1}$  = pressão estática a montante da placa de orifício

Para o sistema internacional de unidades, tem-se as seguintes constantes:  $K = 0,0573$  e  $c = 273,15$ . O diâmetro da placa de orifício é 18 mm e do tubo é 52,5 mm. Para estes valores, obteve-se a seguinte equação.

$$Q = 2,3424 \sqrt{\frac{\Delta h}{273,15 + T}} - \frac{0,7341}{P_1} \sqrt{\frac{(\Delta h)^3}{273,15 + T}} \quad (28)$$

Os parâmetros fluidodinâmicos medidos foram a queda de pressão de jorro, a vazão de jorro mínimo, altura de ânulo e fonte. Construiu-se curvas típicas de fluidodinâmica de queda de pressão *versus* vazão de ar para todas as partículas e diferentes cargas mássicas. Escolheu-se, então a carga adequada de cada partícula, que apresentava ampla faixa de jorro estável.

Definida a carga, foram realizados ensaios fluidodinâmicos a seco em triplicata. Para os ensaios fluidodinâmicos realizados com ar de atomização, trabalhou-se com valores de 10, 20 e 30 psig de pressão de atomização, sem líquido. Nestes experimentos, apenas a volta da curva de queda de pressão do leito *versus* vazão de ar de jorro foi medida. Para tanto, iniciou-se o ensaio em regime de jorro e diminuiu-se gradativamente a vazão de ar

até zero-la. As propriedades fluidodinâmicas citadas foram sendo medidas a cada variação da vazão de ar.

### **3.5.3. Estudo Fluidodinâmico com recobrimento**

Os experimentos de recobrimento foram realizados conforme o seguinte procedimento: carregou-se o equipamento de leito de jorro com a carga mássica de partículas inertes previamente escolhida. Ligou-se o soprador e regulou-se para a vazão de ar de jorro 10% acima da vazão de jorro mínimo de cada partícula. Ligou-se as resistências elétricas, sendo estas reguladas para aquecer o ar de entrada até 60°C. Atingido o regime permanente, iniciou-se a alimentação da suspensão de recobrimento por meio de uma bomba peristáltica na vazão e pressão de atomização estabelecidas.

À medida que o processo avançava, foram feitas medidas de pressão estática, queda de pressão do leito e da placa de orifício, para o cálculo da vazão de jorro, umidade relativa do ar de entrada e saída, temperatura do ânulo, do ar de entrada e de saída do leito, assim como medidas de alturas da fonte e do ânulo e circulação de sólidos.

Em intervalos fixados, retirou-se amostras na região do ânulo. A umidade das amostras coletadas foi obtida a partir do método gravimétrico estático, em estufa à vácuo à 75°C e à 25 in Hg, durante um período de 24 horas.

Após um tempo estabelecido do processo, desligou-se o soprador e retirou-se uma amostra para se determinar o crescimento da partícula e a eficiência do experimento.

#### **3.5.3.1. Cálculo do crescimento e da eficiência**

O crescimento da partícula ( $\delta$ ) é definido como a razão entre a massa do filme formado durante o recobrimento e a massa original da partícula, sendo então calculada a partir da Equação 29.

---

$$\delta_{\text{exp}} = \frac{m_{\text{rec}} - m_0}{m_0} \quad (29)$$

na qual:  $m_{\text{rec}}$  : massa seca da partícula após o recobrimento (g)

$m_0$ : massa seca da partícula original (g)

A eficiência do processo ( $\eta$ ) de recobrimento é definida como a razão entre o crescimento obtido experimentalmente e o crescimento teórico, ou seja, o máximo crescimento obtido considerando-se que toda a massa de sólido atomizada fosse aderida à superfície da partícula, não havendo perdas por elutriação e também nas paredes do leito. A eficiência é calculada a partir das Equações 30 e 31, também utilizadas por vários pesquisadores (Kucharski and Kmiéc, 1988; Donida, 2000).

$$\eta = \frac{\delta_{\text{exp}}}{\delta_{\text{teorico}}} \quad (30)$$

$$\delta_{\text{teorico}} = \frac{W_{\text{susp}} \cdot \rho_{\text{susp}} \cdot t \cdot C_s}{m_0} \quad (31)$$

na qual:  $W_{\text{susp}}$ : vazão de suspensão atomizada (ml/min)

$\rho_{\text{susp}}$ : densidade da suspensão ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

t: tempo de processo (min)

$C_s$ : concentração de sólidos ( $\text{g}_S/\text{g}_{\text{susp}}$ )

$m_0$ : massa seca do leito de partículas original (g)

### 3.5.4. Medida da velocidade de circulação de sólidos no ânulo

A velocidade de circulação das partículas foi determinada da seguinte forma: mediu-se o tempo gasto para uma partícula percorrer uma distância de 3,5 cm marcada na parede da parte cônica do leito. Fez-se uma média de 10 medidas e, assim, calculou-se o valor da velocidade. Essas medidas foram feitas em intervalos fixos durante o processo de recobrimento, apresentando uma boa reprodutibilidade, com um pequeno desvio padrão.

### 3.5.5. Vazão máxima de suspensão

Segundo Oliveira (1996), a vazão máxima de suspensão suportada pelo leito ( $W_{\text{susp, M}}$ ) é aquela na qual ocorre uma ou mais condições a seguir:

- i) a umidade do ar de saída do leito atinge um valor próximo da saturação e/ou;
- ii) o leito se torna instável e/ou;
- iii) a relação massa de água evaporada pela massa de água alimentada for próximo à unidade.

O leito era carregado com uma determinada massa de partículas inertes. A seguir, alimentava-se o leito com uma vazão de ar de jorro à pressão de atomização adequada. Atingido o regime, iniciava-se a alimentação da suspensão com vazão pré-fixada. Esperava-se de 20 a 30 minutos de forma que o sistema atingisse novamente o regime. Fazia-se então medidas de temperatura de entrada e saída do ar e umidade do ar de saída. Aumentava-se a vazão e repetia-se o procedimento até que se atingisse alguma das condições citadas.

No presente trabalho, a alimentação da suspensão é feita de forma contínua. Deste modo, cada vazão de suspensão trabalhada é um novo ensaio. A vazão máxima de suspensão que o leito suporta é a vazão limite de suspensão alimentada para a qual ainda se observe um regime de jorro estável, sem a ocorrência de colapso ou mesmo sinais de instabilidade do leito durante todo o tempo de processo estabelecido a partir de testes preliminares, para cada partícula.

A cada vazão de suspensão trabalhada determina-se o grau de saturação do leito, sendo este uma função do tempo de processo, como mostram as Equações 32, 33, 34, 35 e 36. Este conceito de grau de saturação foi utilizado em trabalhos cuja alimentação da pasta ou suspensão era intermitente. Como neste trabalho a vazão é alimentada continuamente, não há sentido em determinar este parâmetro somente ao final do processo, tendo em vista que nem todos os ensaios tiveram o mesmo tempo de processo, devido ao colapso do leito. Neste caso, para efeito de comparação entre os ensaios, utilizaremos o grau de saturação instantâneo ( $S'$ ), ou seja, o grau de saturação ( $S$ ) dividido pelo tempo de processo total.

---

$$S' = \frac{S}{t} \quad (32)$$

na qual: S: grau de saturação (-)  
t: tempo de processo (min)

$$S = \frac{V_{susp}}{V_{poros}} \quad (33)$$

na qual:  $V_{susp}$ : volume de suspensão alimentada ( $\text{cm}^3$ )  
 $V_{poros}$ : volume de poros no leito fixo ( $\text{cm}^3$ )

$$V_{susp} = W_{susp} \cdot t \quad (34)$$

na qual:  $W_{susp}$ : vazão de suspensão alimentada ( $\text{cm}^3/\text{min}$ )

$$V_{poros} = V_T - V_p = \varepsilon \cdot V_T \quad (35)$$

na qual:  $V_T$ : volume total do leito fixo de partículas ( $\text{cm}^3$ )  
 $\varepsilon$ : porosidade do leito fixo (-)  
 $V_p$ : volume de partículas ( $\text{cm}^3$ )

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_s}{V_T} = 1 - \frac{m_s}{\rho_s} \cdot \frac{1}{V_T} \quad (36)$$

na qual:  $V_s$ : volume de sólidos ( $\text{cm}^3$ )  
 $m_s$ : massa de sólidos (g)  
 $\rho_s$ : densidade aparente dos sólidos ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 4.1. Caracterização das partículas

As partículas a serem utilizadas foram caracterizadas fisicamente, segundo metodologia anteriormente descrita e os resultados estão na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1: Características físicas das partículas.**

Material	Vidro	PS	PEBD	PP	Placebo	ABS®
Forma	arredondada	cuneiforme	“pellet”	“pellet”	cilíndrica	arredondada
$d_p$ (mm)	2,27	4,58	3,56	2,91	5,536	2,90
$\phi$	0,865 $\pm 0,037$	0,880 $\pm 0,047$	0,785 $\pm 0,050$	0,750 $\pm 0,066$	0,825	0,788 $\pm 0,045$
Ângulo de Repouso $\Phi$ (°)	33,0 $\pm 1,4$	34,5 $\pm 1,9$	35,5 $\pm 1,5$	35,0 $\pm 1,0$	43,8 $\pm 2,0$	43,7 $\pm 1,9$
$\rho_{ap-pic}$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,4874 $\pm 0,0013$	0,9981 $\pm 0,0017$	0,8879 $\pm 0,0009$	0,8941 $\pm 0,0110$	1,3274 $\pm 0,0048$	0,9639 $\pm 0,0116$
$\rho_{bulk}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,5625 $\pm 0,0318$	0,6575 $\pm 0,0041$	0,5954 $\pm 0,0055$	0,5979 $\pm 0,0068$	0,8629 $\pm 0,0244$	0,6482 $\pm 0,0060$
$\rho_{real}$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,4915 $\pm 0,0004$	1,0600 $\pm 0,0006$	0,9193 $\pm 0,0002$	0,9053 $\pm 0,0006$	1,6571 $\pm 0,0008$	1,0221 $\pm 0,0008$
$\rho_{ap-por. Hg}$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,4917	1,0491	0,9194	0,9053	1,3482	1,0136
$\epsilon_p$ (%)	0	1,03	0	0	18,64	0,83
Vescoamento (cm/s)	18,8621 $\pm 0,2243$	19,4257 $\pm 0,2010$	22,9150 $\pm 0,5300$	23,7584 $\pm 0,1184$	---	16,0277 $\pm 0,5430$

Em virtude da baixa porosidade das partículas escolhidas, não foi possível a determinação da área superficial das mesmas pelo método de BET, por adsorção física de  $N_2$  a 77 K, utilizando-se o equipamento Gemini III 2375 Surface Area Analyzer, da marca Micromeritics.

Pode-se observar que os valores de densidade aparente obtidos pelo picnômetro e pelo porosímetro de mercúrio são bem próximos para os polímeros e para a esfera de vidro, em virtude da baixa porosidade destas partículas. Pela mesma razão, os valores de densidade real obtidos por picnometria à Hélio também são próximos dos valores de densidade aparente, com exceção do placebo, que já apresenta uma porosidade considerável. Assim, para partículas com baixa porosidade, a determinação da densidade aparente por picnometria já fornece resultados consistentes.

#### 4.2. Caracterização da suspensão de recobrimento

As propriedades da suspensão polimérica a ser utilizada nos ensaios de recobrimento foram determinadas de acordo com o procedimento descrito no item 3.3. A Tabela 4.2 lista as características da suspensão à temperatura ambiente. A Tabela 4.3 apresenta os valores de ângulo de contato entre a superfície de cada partícula e a gota líquida de suspensão.

**Tabela 4.2- Características da suspensão.**

Massa específica ( $g/cm^3$ )	Tensão Superficial (mN/m)	Reologia
1,033 $\pm$ 0,003	63,37 $\pm$ 0,98 (25°C) 54,81 $\pm$ 0,15 (35°C)	Fluido pseudoplástico power-law $\eta = 0,8625 \pm 0,0299$ $k = 0,1086 \pm 0,0042$ (N/m <sup>2</sup> ) $R^2 = 0,9964$ $\tau_r = 0,1086\gamma_r^{0,8625}$

**Tabela 4.3 – Ângulo de contato da suspensão.**

PARTÍCULA	ABS®	PEBD	VIDRO	PP	PLACEBO	PS
$\theta$ (°)	71,5	92,4	40,3	81,0	74,0	79,9

Deve-se observar o elevado ângulo de contato para o PEBD, o que indica a não molhabilidade da partícula pela suspensão. Isto sugere previamente a obtenção de uma baixa eficiência do processo de recobrimento para esta partícula.

Foram também obtidos os valores do ângulo de contato dos materiais sólidos com água. Uma comparação entre o ângulo de contato entre a superfície da partícula e a gota líquida da suspensão em relação ao ângulo de contato formado entre a partícula e a gota de água pode ser observada na Figura 4.1.

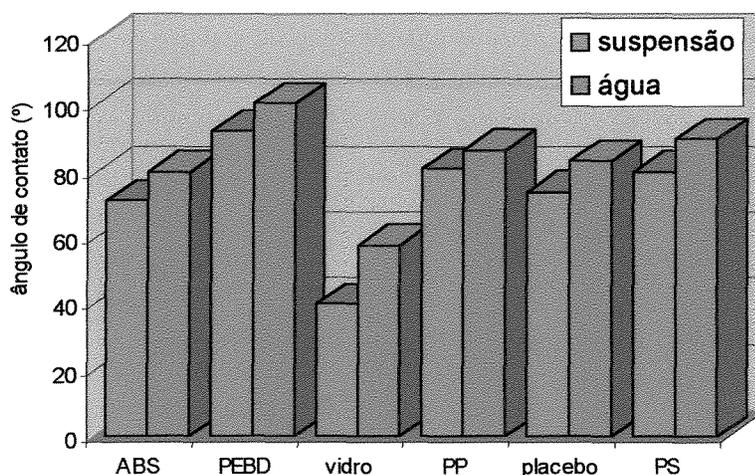


Figura 4.1: Ângulo de contato entre a superfície da partícula e a gota de líquido.

Verifica-se que o ângulo de contato da água com a superfície das partículas é sempre superior ao ângulo de contato da suspensão com a superfície das mesmas. Isto ocorre em virtude da água apresentar uma tensão superficial superior à da suspensão (72,75 mN/m, à 20°C), sabendo-se que a tensão superficial é inversamente proporcional ao cosseno do ângulo de contato.

### 4.3. Estudo Fluidodinâmico a seco sem pressão de atomização

Inicialmente, foram realizados ensaios fluidodinâmicos a seco, ou seja, sem a presença de suspensão. Trabalhou-se à temperatura ambiente e sem pressão de ar de atomização. Variou-se as cargas mássicas das partículas, partindo-se do leito cônico até atingir uma carga máxima na qual não mais se observasse um regime de jorro estável, já em leito cone-cilíndrico.

As Figuras a seguir apresentam as curvas fluidodinâmicas a seco para as partículas ABS, PS, PEBD, PP, placebo e esfera de vidro. As demais curvas fluidodinâmicas realizadas para outras cargas mássicas encontram-se no ANEXO A. Os símbolos preenchidos representam os valores de queda de pressão obtidos à vazão crescente e os símbolos sem preenchimento representam os valores de queda de pressão obtidos à vazão decrescente.

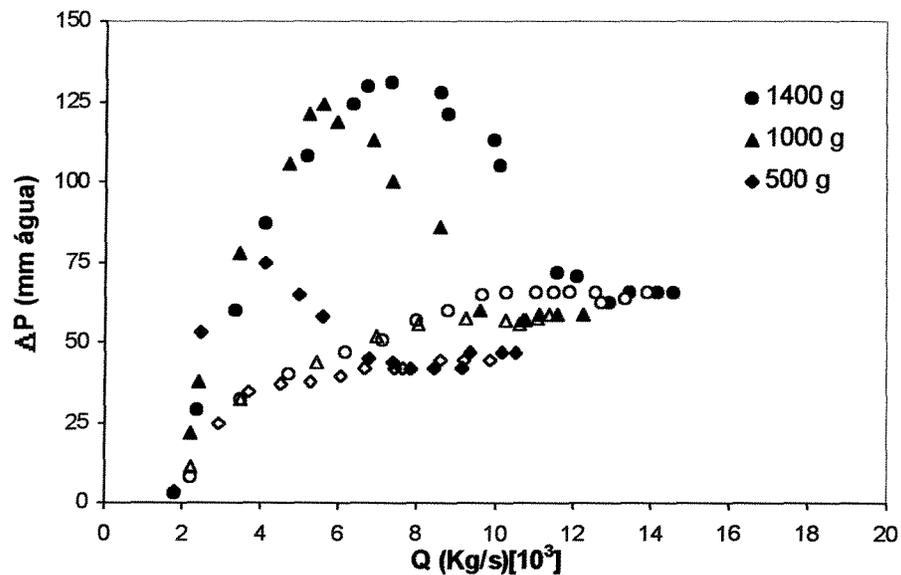


Figura 4.2: Curva Fluidodinâmica a seco do ABS para as cargas mássicas de 500g, 1000g e 1400g.

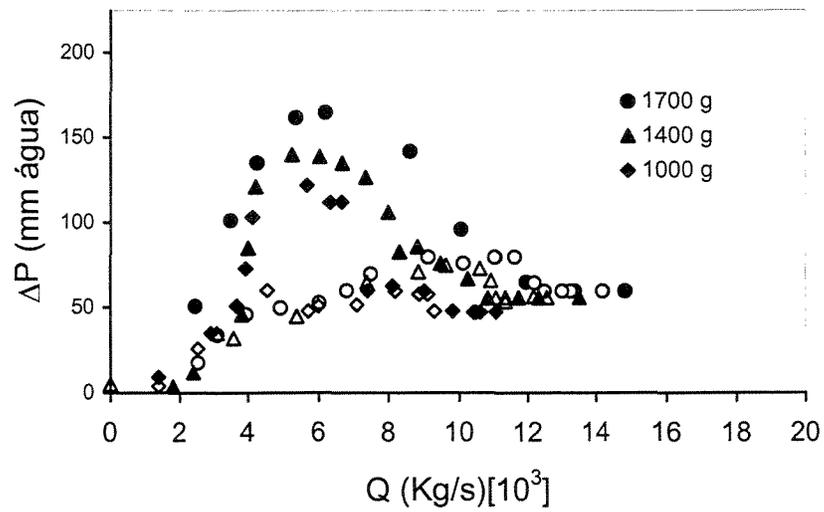


Figura 4.3: Curva Fluidodinâmica a seco do PS para as cargas mássicas de 1000g, 1400g e 1700g.

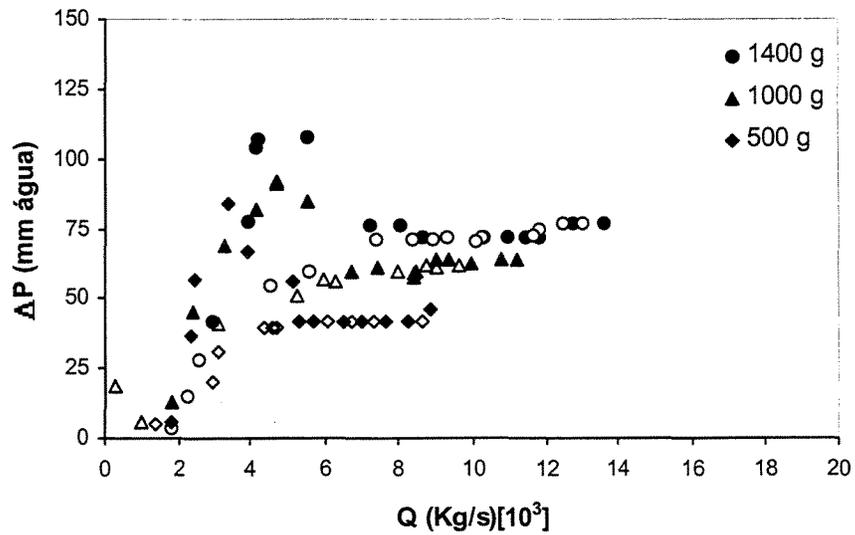


Figura 4.4: Curva Fluidodinâmica a seco do PEBD para as cargas mássicas de 500g, 1000g e 1400g.

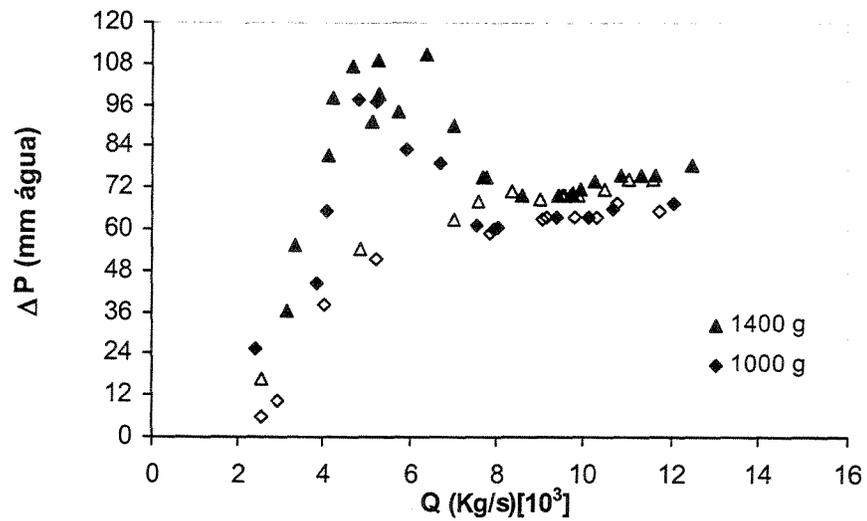


Figura 4.5: Curva Fluidodinâmica a seco do PP para as cargas mássicas de 1000g 1400g.

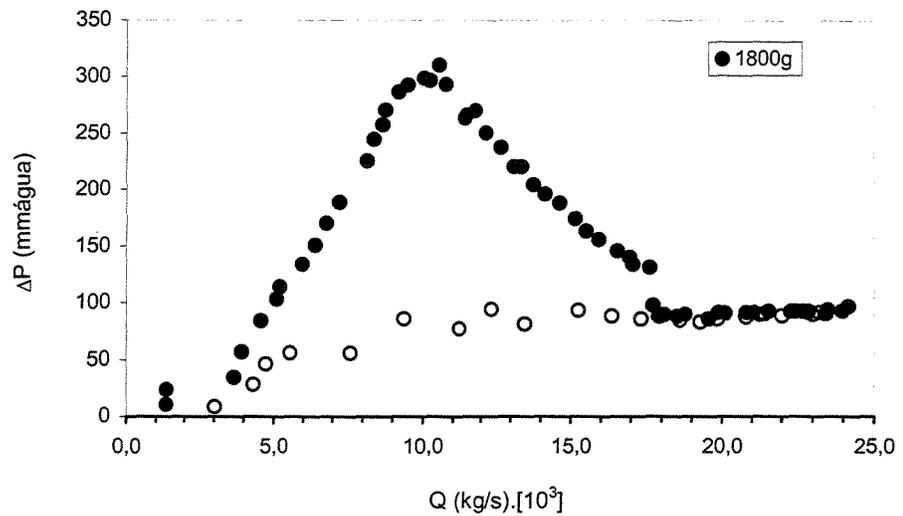


Figura 4.6: Curva Fluidodinâmica a seco do placebo para a carga mássica de 1800g.

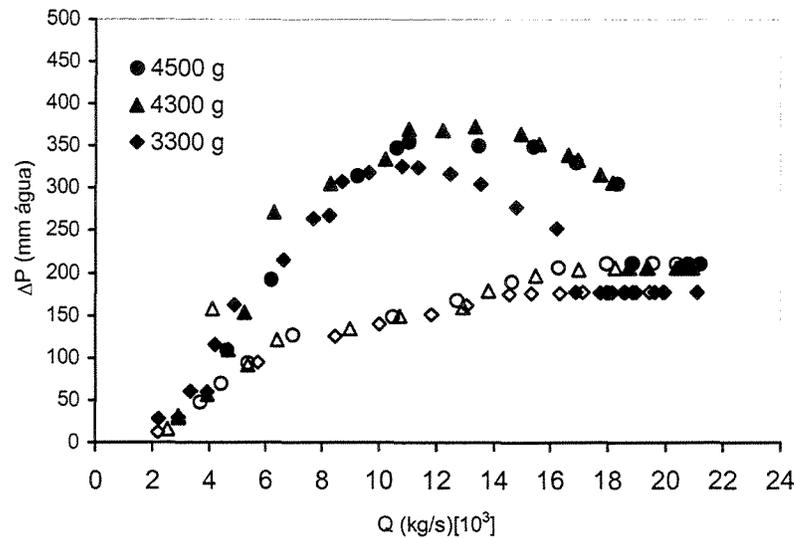


Figura 4.7: Curva Fluidodinâmica a seco da esfera de vidro para as cargas mássicas de 3300g, 4300g e 4500g.

As curvas fluidodinâmicas obtidas apresentam perfis típicos aos da literatura, conforme mostra a Figura 2.4. A escolha da carga mássica adequada para cada partícula foi feita a partir da curva característica mais estável, ou seja, do leito que apresentasse uma boa fluidodinâmica e um regime de jorro estável, com uma boa circulação das partículas no ânulo e com uma faixa de jorro estável significativa. Como segundo critério, procurou-se fixar a altura do leito de partículas em aproximadamente 16,0 cm, trabalhando-se em configuração cone-cilíndrica. A Tabela 4.4 lista as cargas mássicas escolhidas para os ensaios, juntamente com a vazão mínima de jorro ( $Q_{jm}$ ), máxima queda de pressão ( $\Delta P_M$ ) e queda de pressão de jorro estável ( $\Delta P_S$ ) dos mesmos.

A vazão de jorro mínimo determinada para cada partícula é função do diâmetro e da densidade da partícula, assim como da carga mássica utilizada. Em relação à queda de pressão do leito, verifica-se um aumento deste parâmetro com o aumento da densidade da partícula. Logo, os valores obtidos para vazão de jorro mínimo e queda de pressão estão coerentes de acordo com a literatura (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

**Tabela 4.4: Carga mássica e parâmetros fluidodinâmicos das partículas.**

Partícula	$M_0$ (kg)	$Q_{jm}$ (kg/s)[ $10^3$ ]	$\Delta P_M$ (mm água)	$\Delta P_S$ (mm água)
PEBD	1,4	7,35	107,79	74,64
PP	1,4	9,03	111,04	74,50
PS	1,5	11,07	139,80	55,66
ABS	1,4	12,72	130,74	62,62
Placebo	1,8	19,86	310,57	92,70
Esfera de vidro	3,3	16,24	325,66	177,50

#### 4.4. Estudo Fluidodinâmico a seco com pressão de atomização

Fixada a carga mássica de cada partícula, realizou-se ensaios fluidodinâmicos a seco em triplicata, medindo-se os demais parâmetros fluidodinâmicos como altura de fonte, leito e ânulo, além da queda de pressão e vazão de ar do jorro. Em seguida, foram realizados ensaios fluidodinâmicos com ar de atomização, sob pressão de 10, 20 e 30 psig, sem líquido. Mediu-se somente a volta da curva, partindo-se da máxima vazão, de acordo com a capacidade do soprador, até zerá-la. Nestes experimentos foram acompanhadas a queda de pressão do leito, a altura do ânulo, da fonte e do leito com a vazão de ar de jorro.

As Figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 exemplificam, para a esfera de vidro, as curvas fluidodinâmicas em triplicata de queda de pressão da partícula, altura do ânulo, leito e fonte em função da vazão de ar de jorro. As curvas para as demais partículas apresentaram comportamento similar e encontram-se no ANEXO B.

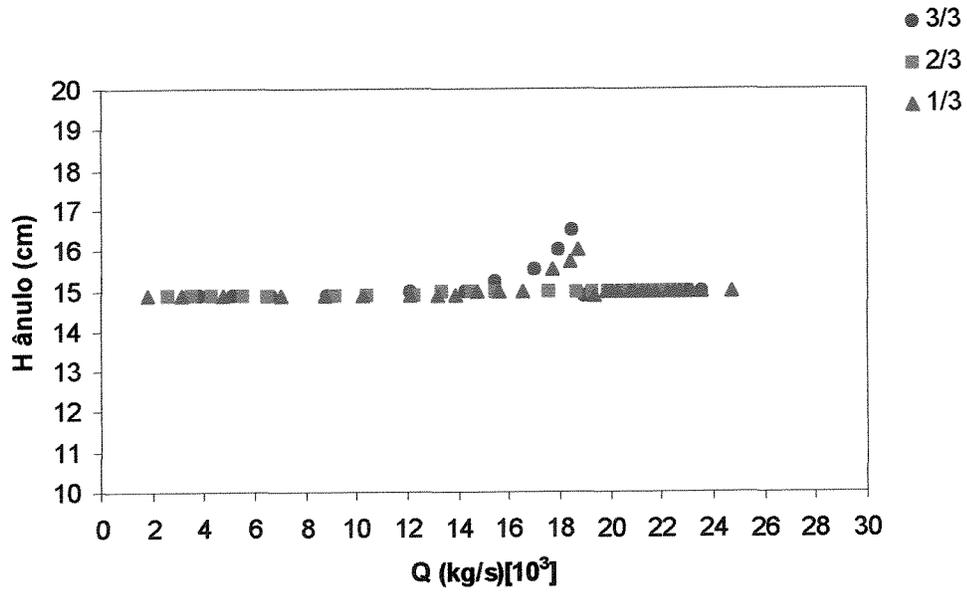


Figura 4.8: Curva da altura do ânulo em leito seco para a Esfera de vidro.

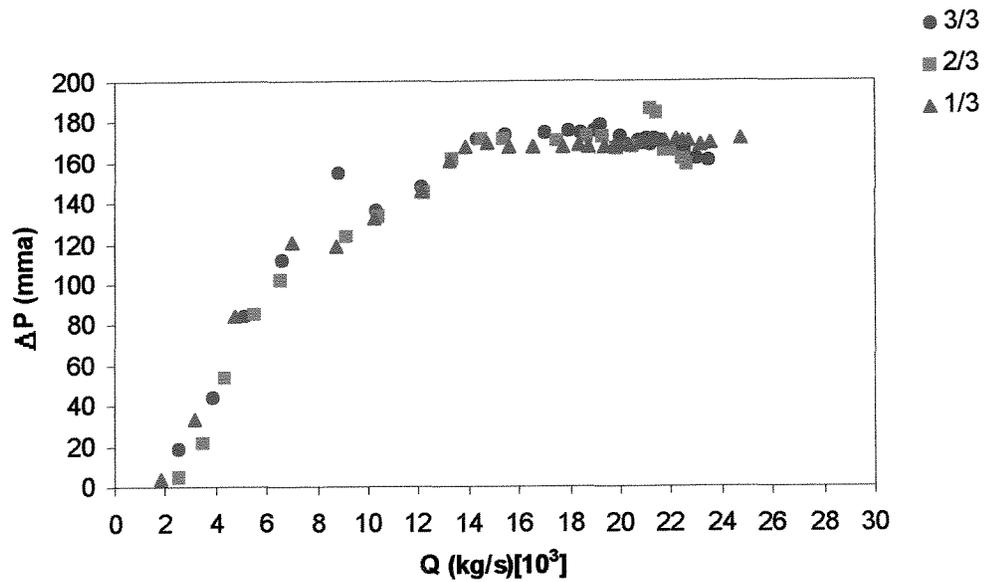


Figura 4.9: Curva de queda de pressão do leito *versus* vazão de ar para a Esfera de vidro.

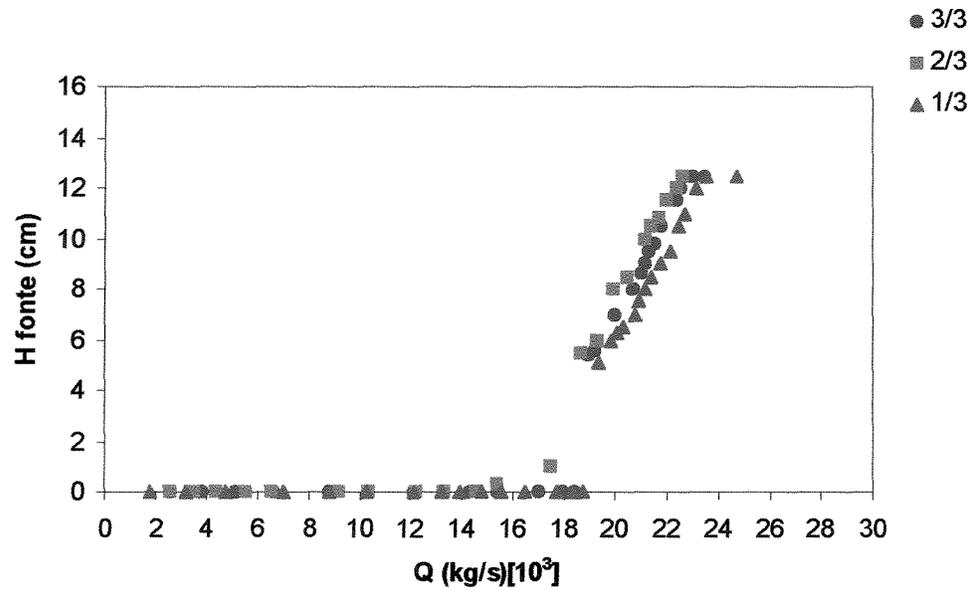


Figura 4.10: Curva de altura de fonte *versus* vazão de ar para a Esfera de vidro.

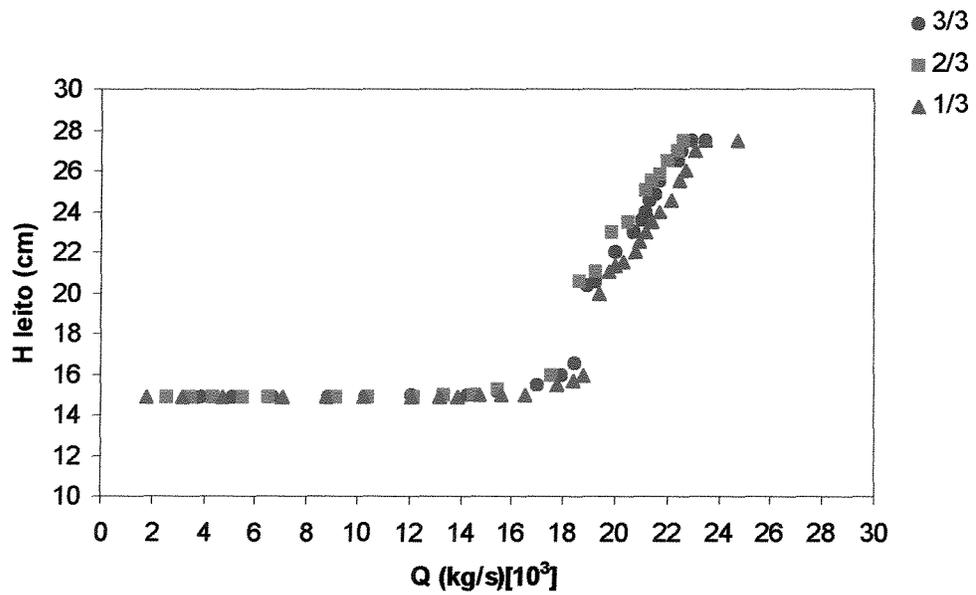


Figura 4.11: Curva de altura de leito *versus* vazão de ar para a Esfera de vidro.

Ao obter-se a curva fluidodinâmica característica do leito de jorro para cada partícula, observou-se que a vazão de jorro mínima determinada visualmente pelo

desaparecimento da fonte é sempre maior ou igual à vazão de jorro mínimo obtida a partir da curva, segundo a definição de Mathur e Epstein (1974). O desvio entre estas vazões de jorro mínimo aumenta com a massa específica e o ângulo de repouso da partícula.

Para PP, PS, PEBD e ABS, partículas com densidade aparente próxima a  $1000\text{kg/m}^3$ , independentemente do ângulo de repouso, verificou-se uma equivalência nas velocidades de jorro mínimo, obtidas pela curva fluidodinâmica característica e pela altura do ânulo, como mostra a Figura 4.12 para o PS. A linha tracejada indica a velocidade de jorro mínimo obtida através da curva de altura do ânulo (símbolo preenchido), que coincide com o valor experimental obtido por observação visual.

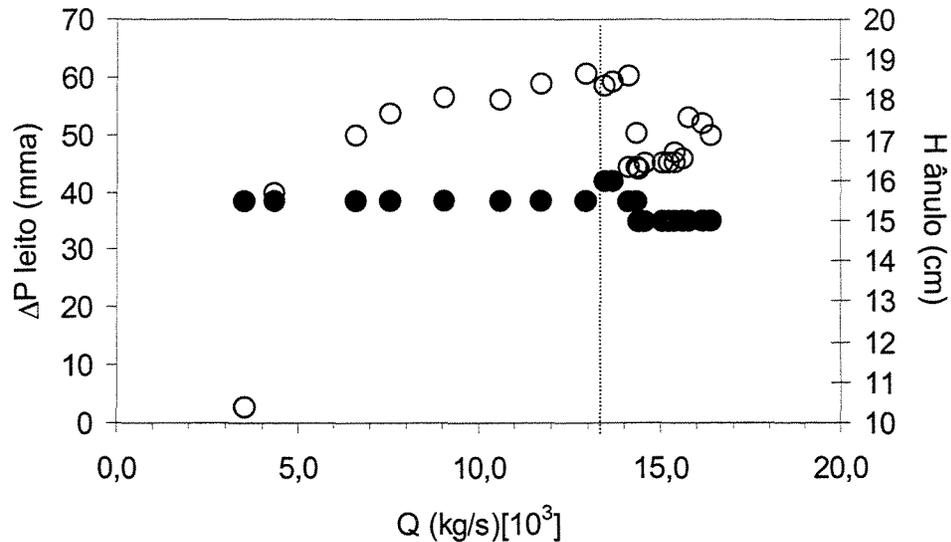


Figura 4.12: Comparação entre a curva de queda de pressão e de altura do ânulo do PS.

Para a esfera de vidro e para o placebo, partículas com densidade superior a  $1100\text{kg/m}^3$ , observou-se uma diferença significativa entre as velocidades de jorro mínimo obtidas por ambos os métodos.

A esfera de vidro, por exemplo, apresentou um grande desvio entre as velocidades. A Figura 4.13 mostra a curva fluidodinâmica da esfera de vidro com o acompanhamento da altura do ânulo. O comportamento verificado sugere uma forte

influência da densidade da partícula, pois a esfera apresenta um baixo ângulo de repouso ( $33,0^\circ$ ), ou seja, quando a densidade da partícula é muito superior a  $1100 \text{ kg/m}^3$ , o ângulo de repouso tem pouca influência nos parâmetros fluidodinâmicos.

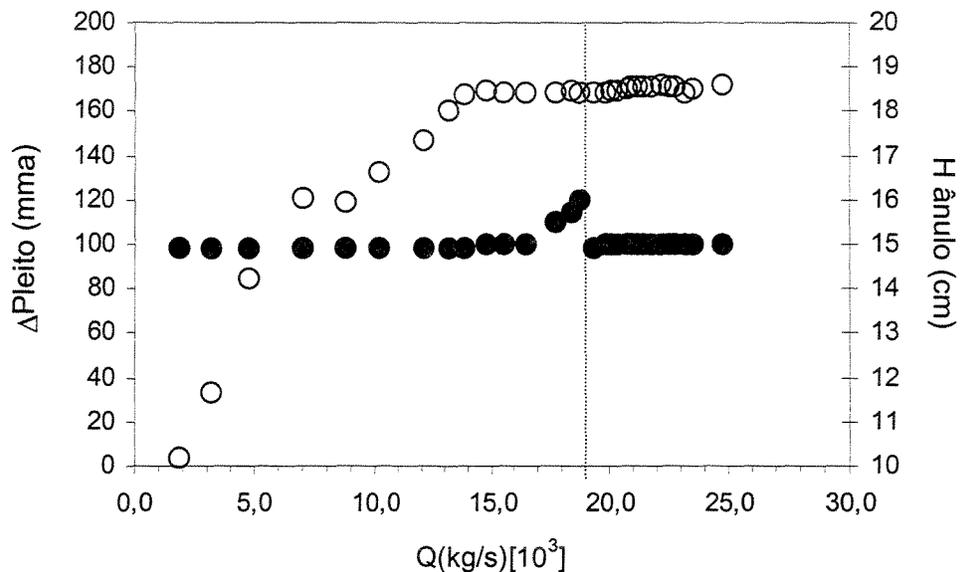


Figura 4.13: Comparação entre a curva de queda de pressão e de altura do ânulo da esfera de vidro.

Desta forma, uma proposta de metodologia para determinação da vazão de jorro mínimo seria através da curva de altura do ânulo *versus* vazão de ar de jorro, em que se verifica uma coincidência dos valores de velocidade de jorro mínimo obtidos visualmente pelo desaparecimento da fonte e pelo acompanhamento da altura do ânulo.

O comportamento, em relação às velocidades de jorro mínimo, mantém-se quando a pressão de atomização é inserida no sistema. A pressão de atomização de ar não influenciou no valor da velocidade de jorro mínimo para as partículas testadas, nos valores de 10 e 20 psig. As Figuras 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17 mostram, para a faixa de pressão utilizada nos testes, as curvas fluidodinâmicas do leito de esferas de vidro sob pressão de atomização, comparando-se com a curva fluidodinâmica sem pressão de atomização. Os gráficos referentes às demais partículas encontram-se no ANEXO B.

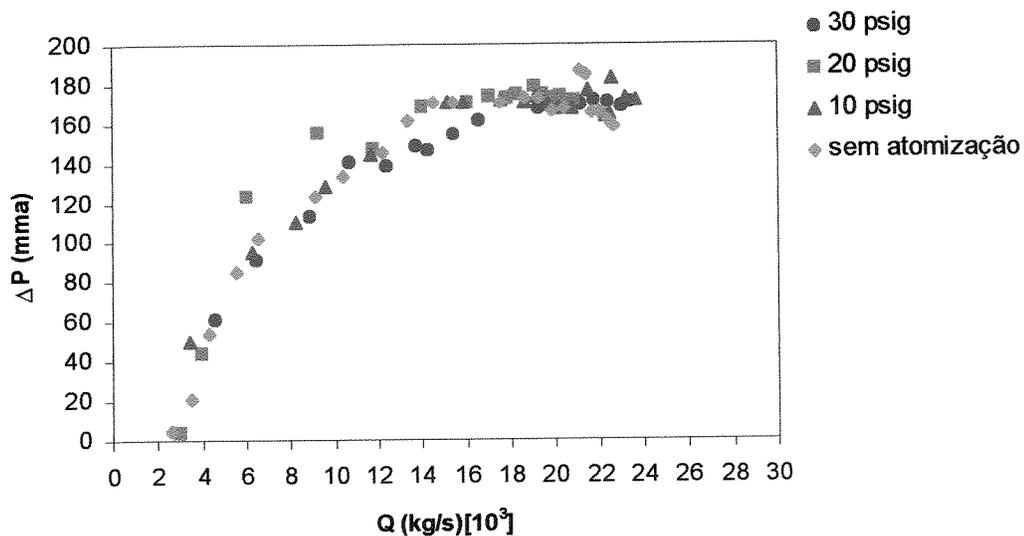


Figura 4.14: Curva de queda de pressão *versus* vazão de ar sob pressão de atomização para a Esfera de vidro.

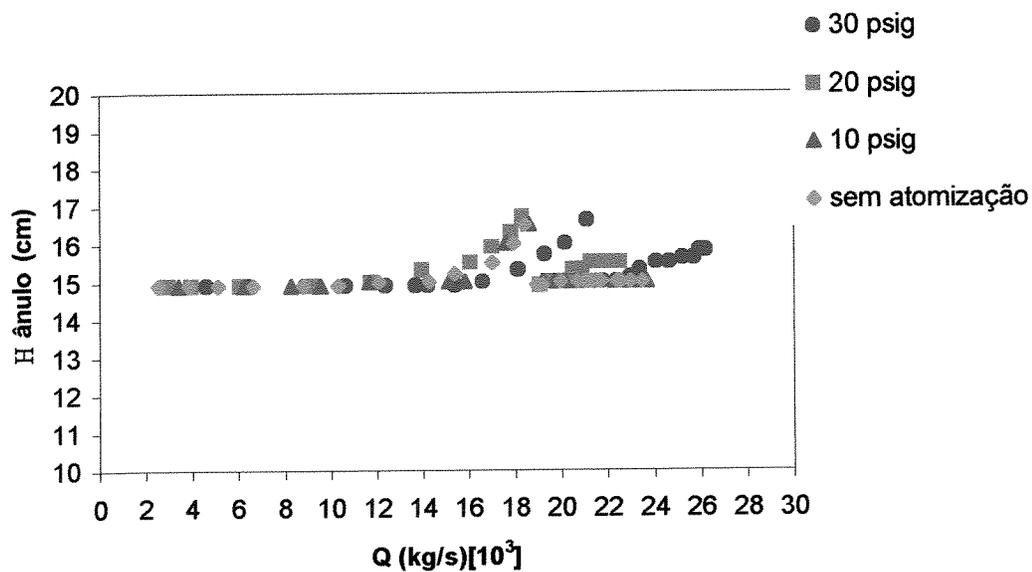


Figura 4.15: Curva de altura de ânulo *versus* vazão de ar sob pressão de atomização.

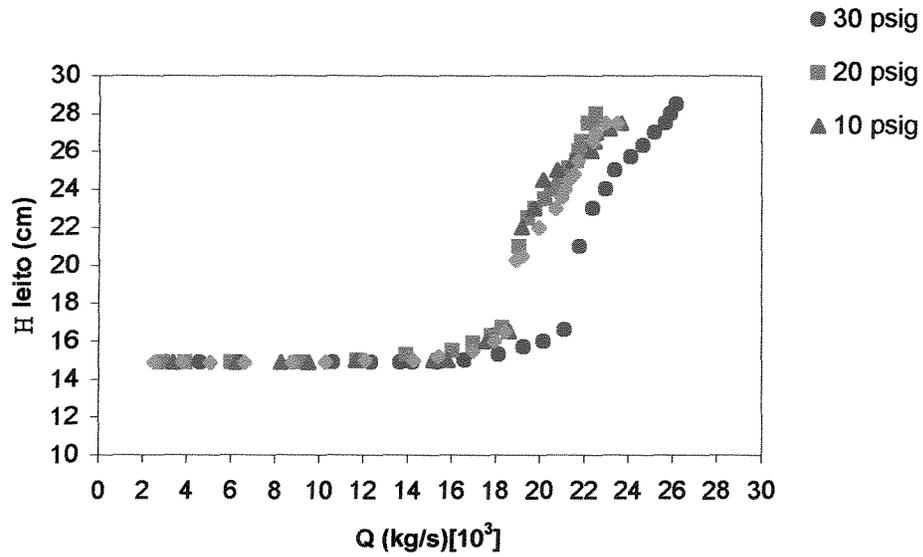


Figura 4.16: Curva de altura de leito *versus* vazão de ar sob pressão de atomização.

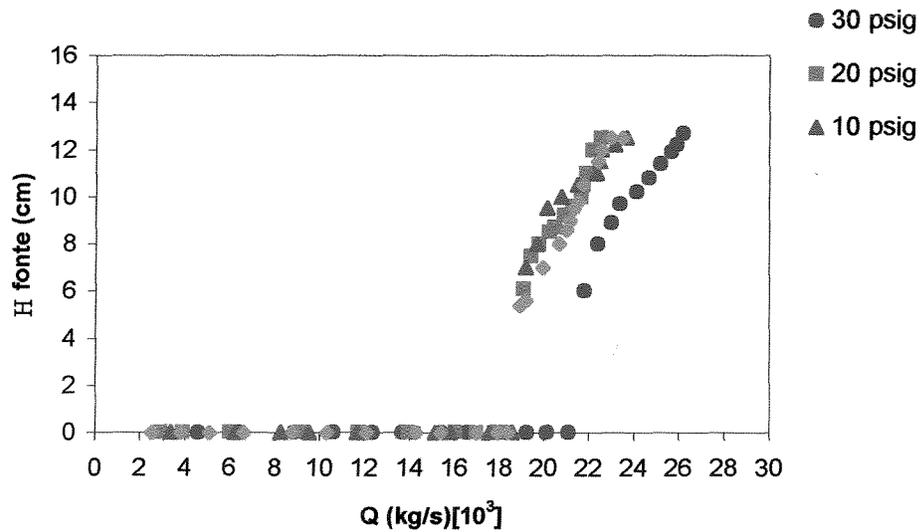


Figura 4.17: Curva de altura de fonte *versus* vazão de ar sob pressão de atomização.

Uma variação no comportamento fluidodinâmico pode ser observada para 30 psig de pressão de atomização. O comportamento desta partícula com pressões de atomização superiores não é objeto do nosso estudo, visto que valores de pressão acima de 30 psig não são recomendados para o recobrimento de partículas, na faixa de condições experimentais utilizadas neste trabalho.

#### 4.5. Estudo Fluidodinâmico com Recobrimento

Os ensaios fluidodinâmicos com recobrimento foram realizados com carga mássica determinada anteriormente no estudo fluidodinâmico a seco sem pressão de atomização (ver Tabela 4.4). A temperatura do ar de entrada foi fixada em 60°C. A suspensão de recobrimento foi alimentada sob pressão de atomização de 20 psig. Esta foi escolhida tendo em vista que à 10 psig a gota formada no bico atomizador seria maior do que a desejada, acarretando em perdas de suspensão nas paredes do leito, enquanto que à 30 psig já se observou uma variação no comportamento fluidodinâmico do leito. A seguir, tem-se o estudo fluidodinâmico detalhado para cada partícula testada.

- **PEBD**

Foram realizados ensaios preliminares de recobrimento com o polietileno de baixa densidade, onde se observou que a partícula não é adequada para este processo. Verificou-se que o polietileno possui um elevado ângulo de contato ( $\theta > 90^\circ$ ), de modo que a superfície do sólido não é molhada pela suspensão, o que nos sugere previamente que o recobrimento desta partícula pela suspensão polimérica utilizada não apresentaria uma boa eficiência.

Os ensaios de recobrimento com o PEBD foram de apenas 5 minutos, pois se verificou que, ao invés de obtermos o recobrimento da partícula, o que de fato ocorria era uma secagem da suspensão. A gota atomizada atinge a superfície da partícula e é imediatamente seca. Não ocorre espalhamento da mesma, verificando-se uma aglutinação. Em seguida, o atrito interpartícula provoca o desprendimento desta película, aumentando, assim, a elutriação de pó no interior do leito.

Trabalhou-se com uma vazão de jorro de 0,805 kg/min de ar, dando uma razão de 1,34 em relação à vazão de jorro mínimo em leito seco. A vazão de suspensão utilizada foi de 12,5 ml/min, sendo esta atomizada com pressão de 20 psig. Utilizou-se uma carga de partículas de 1400g, baseando-se em estudo fluidodinâmico a seco realizado para diferentes cargas mássicas.

---

As Figuras 4.18, 4.19, 4.20, 4.21 e 4.22 apresentam o estudo fluidodinâmico para o PEBD. A temperatura e a umidade de entrada do ar foram praticamente constantes em torno de 60°C e 11,3 %, respectivamente. A temperatura de saída acompanha o valor da temperatura do ânulo, conforme visto na Figura 4.18.

Na Figura 4.19, observa-se que a umidade de saída aumenta no decorrer do tempo, chegando a um equilíbrio. O contrário ocorre com a temperatura de saída do ar.

Na Figura 4.20, tem-se o acompanhamento da altura do ânulo, da fonte e do leito, que ficam em torno de 16,8 cm, 6,2 cm e 23 cm, nesta ordem.

A queda de pressão do leito sofre uma redução após o primeiro minuto de processo, chegando a se estabilizar em torno de 57,75 mma, conforme mostra a Figura 4.21, enquanto que a queda de pressão de jorro estável em leito seco é de 74,64 mma. A redução da queda de pressão de jorro estável com o aumento da umidade no interior do leito também foi verificada por demais autores (Patel *et al* (1986), Schneider e Bridgwater (1993), Cunha *et al* (1999) e Medeiros (2001)). Uma das razões seria que com o aumento da umidade o anel fica mais empacotado e desta forma uma parcela maior do ar de jorro atravessa somente o canal preferencial, o jorro, tornando-o mais diluído.

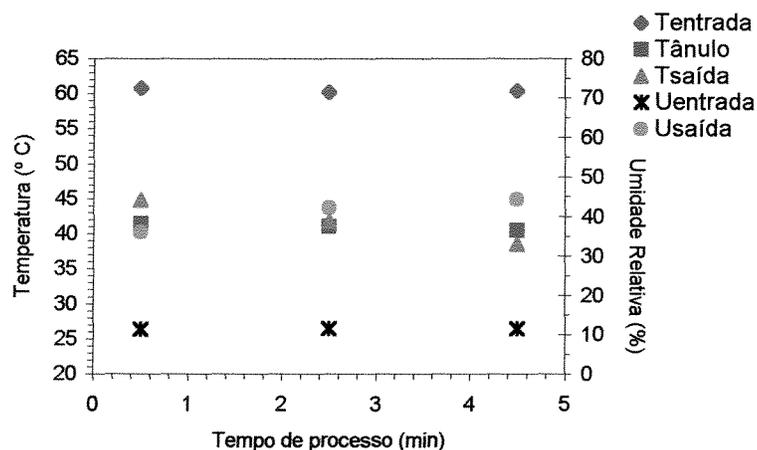


Figura 4.18: Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do PEBD.

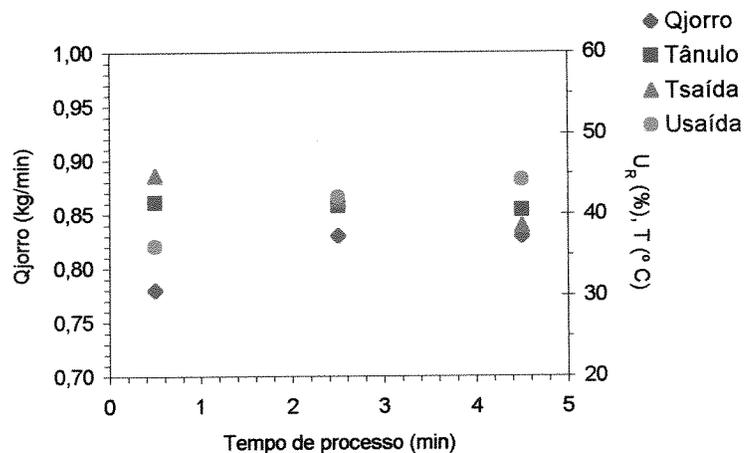


Figura 4.19: Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leito e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do PEBD.

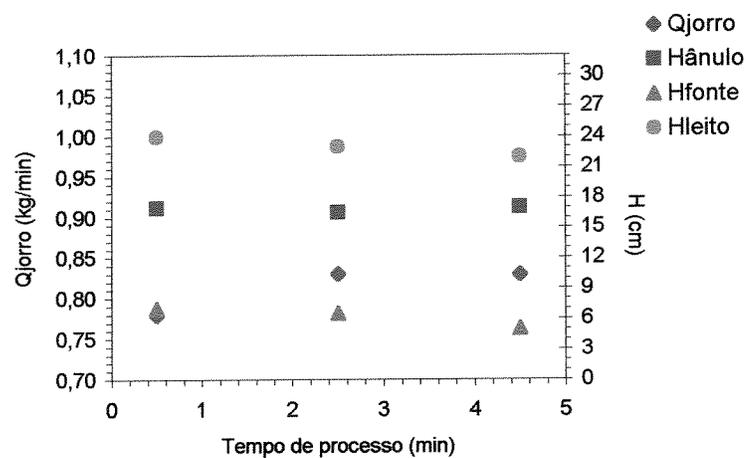


Figura 4.20: Vazão de ar de jorro, altura do leito, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do PEBD.

mostrou-se ascendente com passar do tempo, o que indica a secagem do filme formado, e consequentemente, a queda de umidade no interior do leito durante o processo.

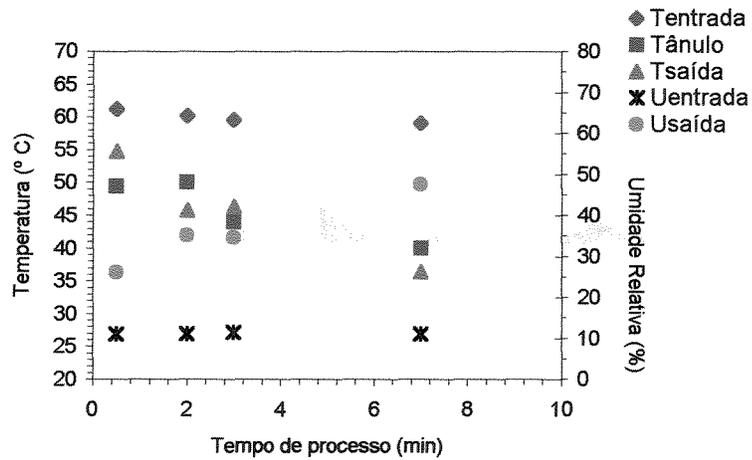


Figura 4.24: Temperatura do ânulo e de entrada e saída do ar, umidade de entrada e de saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do PP.

Na Figura 4.25, observa-se um ligeiro aumento da queda de pressão do leito no início do processo. Neste instante, verificou-se a eminência de um colapso do leito. Aumentou-se um pouco a vazão de ar de jorro. A queda de pressão do leito sofreu então uma redução após os 2 minutos, apresentando em seguida uma tendência decrescente com o tempo. A queda de pressão em leito seco é de 74,50 mma, 35% maior do que a obtida em leito úmido. Com o aumento da vazão, o leito se estabilizou por um curto intervalo de tempo e, em seguida, iniciou-se um processo de secagem da suspensão.

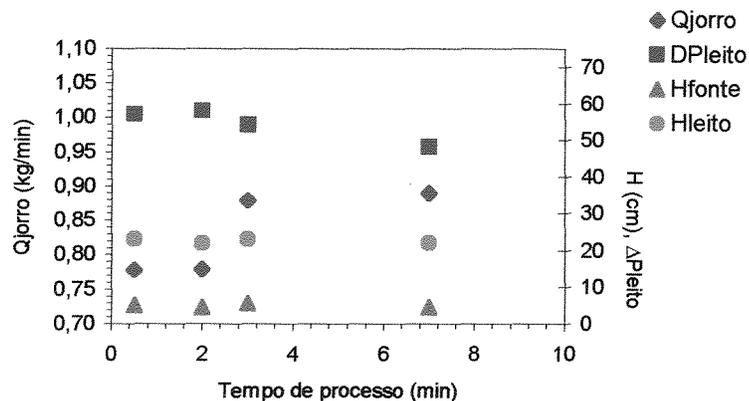


Figura 4.25: Vazão de ar de jorro, queda de pressão do leito, altura da fonte e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do PP.

Na Figura 4.26, verifica-se uma pequena compactação do leito no instante em que o leito estava quase colapsando. Com o aumento da vazão, houve uma expansão do mesmo. As alturas do leito, da fonte e do ânulo ficaram em torno de 28,82 cm, 4,87 cm e 17,62 cm, respectivamente.

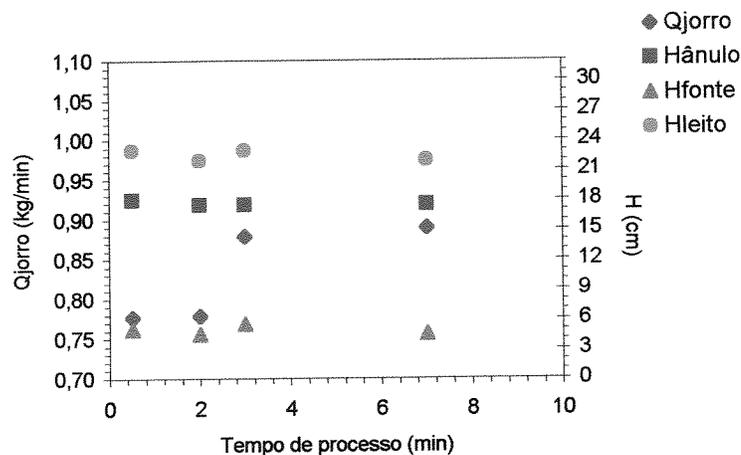


Figura 4.26: Vazão de ar de jorro, altura da fonte, do ânulo e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do PP.

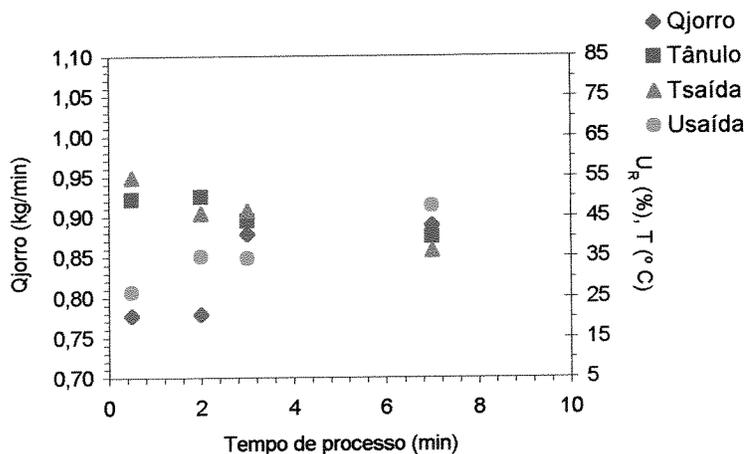


Figura 4.27: Vazão de ar de jorro, temperatura do ânulo, umidade e temperatura do ar de saída do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do PP.

A velocidade de circulação das partículas na parede durante o recobrimento praticamente não varia com o tempo, ficando em torno de  $0,432 \pm 0,042$  cm/s. A velocidade das mesmas em leito seco é de 0,96 cm/s. O leito úmido apresenta uma velocidade mais baixa em relação à do leito seco, tendo em vista que as partículas se encontram mais pesadas, além do aumento das forças interpartículas, dificultando sua mobilidade no interior do leito. Esse comportamento concorda com a redução na queda de pressão do leito, pois indica uma diminuição no número de partículas com conseqüente aumento de porosidade na região do jorro.

O filme polimérico formado sobre a partícula é completamente seco, conforme mostra a Figura 4.28.

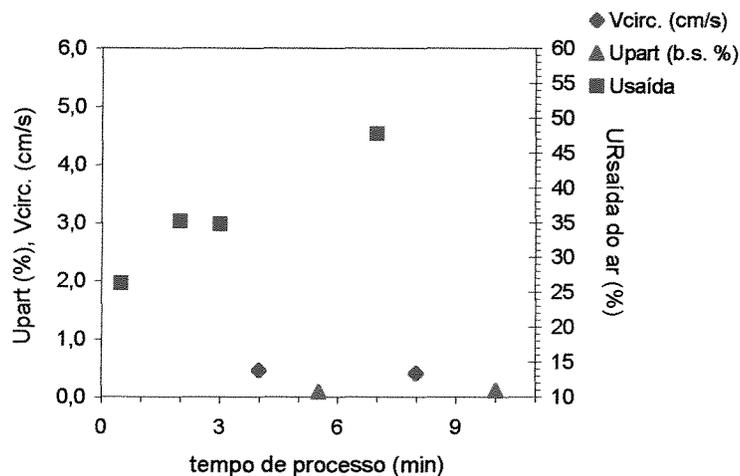


Figura 4.28: Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento do PP.

A Figura 4.29 mostra o polipropileno antes e após o recobrimento.

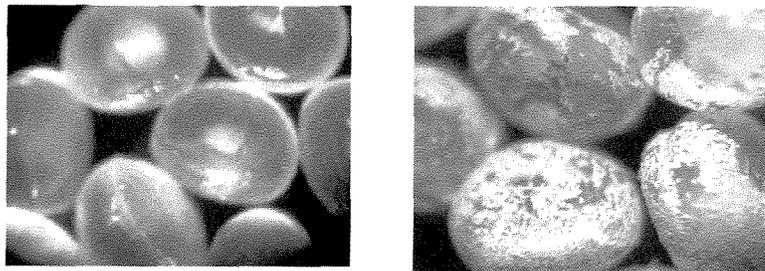


Figura 4.29 – Partículas de PP antes e após o recobrimento em microscópio óptico com ampliação de 40 x.

- PS

Foram realizados diversos ensaios de recobrimento para o poliestireno. Trabalhou-se em quatro diferentes condições que podem ser visualizadas nas Tabelas 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8. Em todos os ensaios a temperatura de entrada do ar e a pressão de atomização do ar foram os mesmos ( $T_{en} = 60^{\circ}\text{C}$ ;  $P_{at} = 20$  psig), com carga mássica de partículas igual a 1500g. A vazão de ar na condição de jorro mínimo em leito seco ( $Q_{jm,o}$ ) para o poliestireno é de 0,69 kg/min.

Pode-se verificar que, em nenhuma das condições estudadas conseguiu-se uma boa reprodutibilidade quanto à parte fluidodinâmica, o que caracteriza o regime de grande instabilidade, além da falta de controle de outras variáveis que interferem no processo. Os valores de eficiência do processo e o crescimento do filme não se mostraram reprodutíveis nos ensaios de recobrimento para esta partícula. Estes parâmetros somente serão avaliados para as partículas em que se obteve um processo de recobrimento durante todo o ensaio, ou seja, para as partículas ABS<sup>®</sup>, esfera de vidro e placebo.

**Tabela 4.5: Condições operacionais e resultados para os ensaios de recobrimento-1 do PS.**

Recobrimento -1	PS -1	PS-2
$Q_j / Q_{jm,o}$	1,207	1,204
$W_{suspensão}$ (ml/min)	10,3	10,3
$t_{processo}$ (min)	40	40
$H_{fonte}$ (cm)	6,4	7,0
$H_{ânulo}$ (cm)	17,5	18,0
$\Delta P_{leito}$ (mma)	47,5	47,94
$V_{circulação}$ (cm/s)	0,290	0,450
$U_{entrada\ ar}$ (%)	9,0	9,0
$U_{saída\ ar}$ (%)	30,0	25,2

No ensaio PS-1 do recobrimento-1, ocorreram três colapsos nos instantes 6, 9 e 12,5 minutos e, ao final do processo, também ocorreu o entupimento do bico. Isto pode ser verificado na Figura 4.30, através do acompanhamento da curva de umidade de saída do ar. Observa-se que a umidade aumenta nos instantes de colapso, indicando que o leito se encontra molhado. No instante onde ocorre o entupimento do bico, observa-se um decréscimo acentuado da umidade.

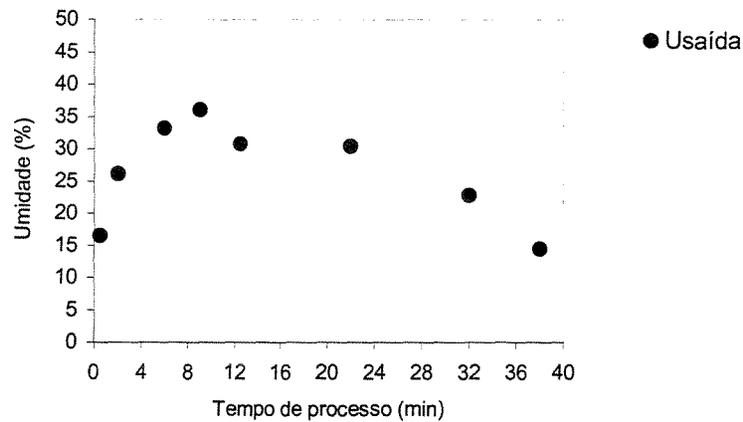


Figura 4.30: Curva de umidade de saída do ar para o PS-1 no recobrimento-1.

**Tabela 4.6: Condições operacionais e resultados para os ensaios de recobrimento-2 do PS.**

Recobrimento -2	PS -1	PS-2
$Q_j / Q_{j,m,o}$	1,197	1,210
$W_{suspensão}$ (ml/min)	10,3	10,3
$t_{processo}$ (min)	20	20
$H_{fonte}$ (cm)	7,0	8,5
$H_{ânulo}$ (cm)	18,0	18,0
$\Delta P_{leito}$ (mma)	54,28	47,12
$V_{circulação}$ (cm/s)	0,428	0,595
$U_{entrada\ ar}$ (%)	10,5	8,2
$U_{saída\ ar}$ (%)	34,9	23,8

**Tabela 4.7: Condições operacionais e resultados para os ensaios de recobrimento-3 do PS.**

Recobrimento -3	PS -1	PS-2	PS-3
$Q_j / Q_{jm,o}$	1,250	1,28	1,290
$W_{suspensão}$ (ml/min)	12,5	12,5	12,5
$t_{processo}$ (min)	15	15	15
$H_{fonte}$ (cm)	4,3	12,0	8,9
$H_{ânulo}$ (cm)	18,6	17,0	17,7
$\Delta P_{leito}$ (mma)	43,43	46,20	49,42
$V_{circulação}$ (cm/s)	0,694	0,450	0,500
$U_{entrada\ ar}$ (%)	12,8	12,6	13,4
$U_{saída\ ar}$ (%)	34,7	39,0	47,0

**Tabela 4.8: Condições operacionais e resultados para o ensaio de recobrimento-4 do PS.**

Recobrimento -4	PS -1
$Q_j / Q_{jm,o}$	1,220
$W_{suspensão}$ (ml/min)	12,0
$t_{processo}$ (min)	10
$H_{fonte}$ (cm)	7,5
$H_{ânulo}$ (cm)	17,75
$\Delta P_{leito}$ (mma)	49,70
$V_{circulação}$ (cm/s)	0,513
$U_{entrada\ ar}$ (%)	11,4
$U_{saída\ ar}$ (%)	36,4

O recobrimento no PS ocorre nos 12-13 minutos iniciais do processo, com formação de um filme uniforme. Em seguida, o atrito entre as partículas provoca o desprendimento deste filme e, a partir desta etapa, toda suspensão atomizada é seca e elutriada em forma de pó.

O PS também possui um elevado ângulo de contato ( $\theta = 79,9^\circ$ ), o que nos sugere que tanto o PP quanto o PS tenham comportamento similar diante da suspensão. No entanto, o filme formado em ambas as partículas apresentam algumas diferenças. O filme formado sobre o PP é mais pontual e se desprende com mais facilidade, enquanto que a película formada sobre a superfície do PS é mais homogênea. O espalhamento da gota no PS é mais completo em relação ao PP, devido à superfície mais plana do PS. Além disso, o contato interpartícula do PS é mais suave e, conseqüentemente, o atrito sofrido pelas mesmas é menor em virtude de sua forma geométrica. Deste modo, o ângulo de contato mais baixo e a forma geométrica do PS (cuneiforme) favoreceram uma maior adesão da suspensão na superfície da partícula, se comparado ao PP. O ângulo de contato determina a molhabilidade e a adesão, ou seja, determina se a partícula pode ser recoberta ou servirá como inerte para a secagem da suspensão. A forma da partícula determina a eficiência do recobrimento e da secagem.

As Figuras 4.31, 4.32, 4.33, 4.34 e 4.35 apresentam o estudo fluidodinâmico para o ensaio de recobrimento-4. Na Figura 4.31, observa-se que a umidade de saída cresce no início do processo até atingir um patamar, o que indica o equilíbrio do regime, com a secagem da suspensão no interior do leito. A temperatura e a umidade do ar de entrada permaneceram constantes durante o ensaio. As temperaturas do ânulo e do ar de saída apresentam uma tendência decrescente, devido ao aumento de umidade no interior do leito.

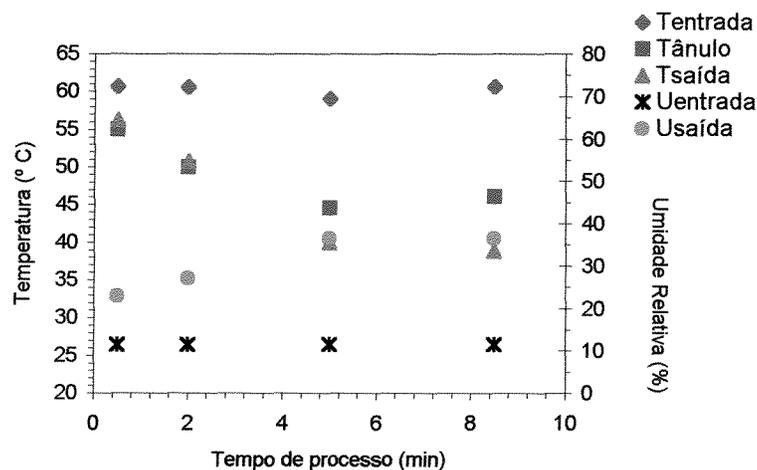


Figura 4.31: Temperatura do ânulo e de entrada e saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do PS.

A vazão de jorro inicial foi 0,80 kg/min, mas passados 2 minutos, verificou-se uma instabilidade do leito, com uma eminência de colapso. Aumentou-se a vazão para 0,90 kg/min. A queda de pressão do leito decresce com o tempo, como mostra a Figura 4.32.

As alturas do ânulo, do leito e da fonte sofreram uma redução após os dois minutos de processo, instante no qual aumentou-se a vazão de ar (ver Figura 4.33), mantendo-se constante em seguida. O aumento na altura da fonte representa uma instabilidade do regime de jorro, conforme também verificado por MEDEIROS (2001) em um estudo de secagem de polpas de frutas modificadas. A autora identificou intensas alterações no comportamento do leito quando se efetuava a alimentação da polpa, sendo esta feita de forma intermitente. Estas alterações dependiam do material processado, refletindo-se em bruscas reduções da queda de pressão, fontes mais altas e aumento da velocidade superficial do ar. Suspensa a alimentação, a queda de pressão subia gradativamente, a velocidade do ar e a altura da fonte diminuía enquanto o regime era então restabelecido.

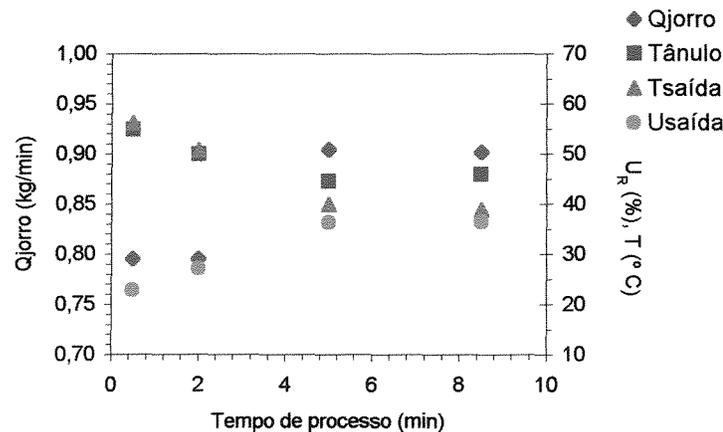


Figura 4.32: Vazão de ar de jorro, temperatura do ânulo, umidade e temperatura do ar de saída do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do PS.

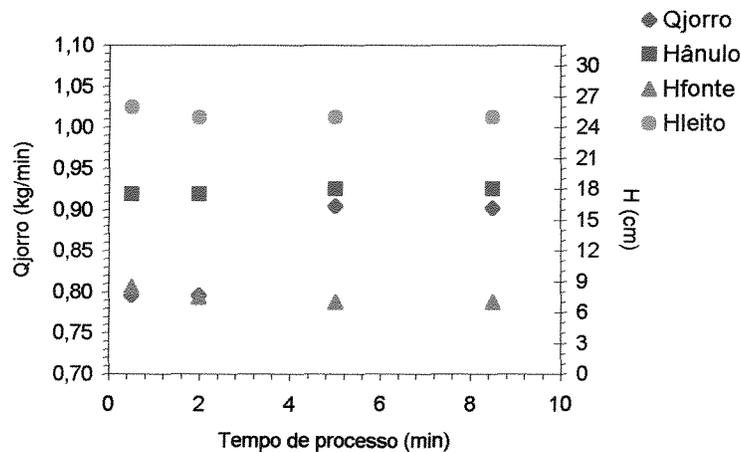


Figura 4.33: Vazão de ar de jorro, altura da fonte, do ânulo e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do PS.

Na Figura 4.34, verifica-se a estabilização da queda de pressão do leito após os dois minutos de processo em torno de 40,70 mma, enquanto que a equivalente em leito seco é de 55,66 mma.

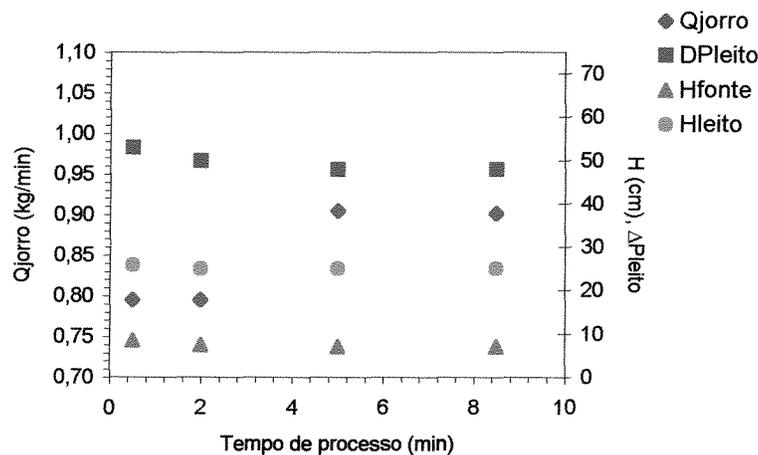


Figura 4.34: Vazão de ar de jorro, queda de pressão do leito, altura da fonte e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do PS.

A velocidade de circulação das partículas de PS na parede do ânulo em leito seco é de 1,163 cm/s. Com a alimentação da suspensão, esta velocidade é reduzida quase à

metade, atingindo o valor de  $0,513 \pm 0,054$  cm/s, e em seguida, praticamente não varia com o tempo. O filme formado sobre a superfície é totalmente seco, como pode ser observado na Figura 4.35.

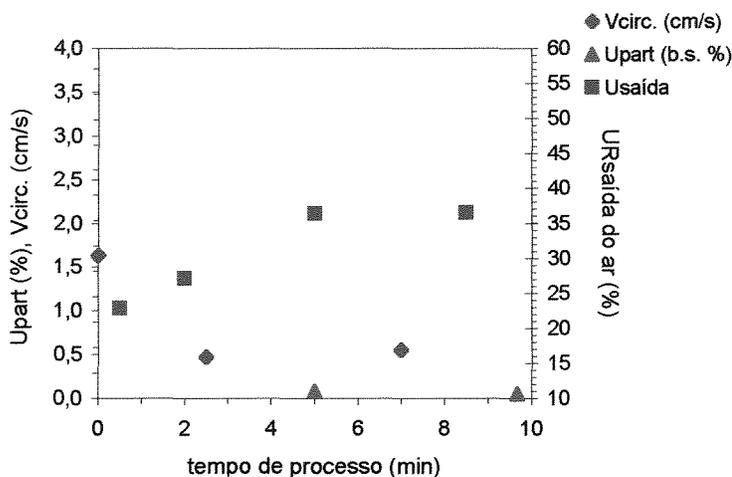


Figura 4.35: Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento do PS.

A Figura 4.36 compara as partículas de PS antes e após 10 minutos de processo nas condições do recobrimento-4.

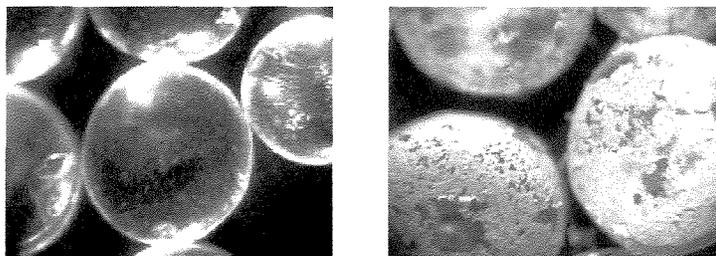


Figura 4.36 – Partículas de PS não recobertas e recobertas em microscópio óptico com ampliação de 40x.

- **ABS**

O ABS apresentou as características de recobrimento tipo filme em todos os ensaios realizados. O ângulo de contato da suspensão na superfície do ABS é de  $71,5^\circ$ ,

valor bem inferior ao das partículas anteriores (PEBD, PP e PS). Essa é uma das características mais significativas para diferenciá-lo das partículas para as quais não se obteve um recobrimento eficiente. Além disso, o atrito interpartícula foi minimizado em virtude da superfície uniforme arredondada da partícula, favorecendo assim, a formação de um filme homogêneo.

A dificuldade encontrada nos ensaios com o ABS foi a determinação de condições operacionais nas quais verificou-se uma boa reprodutibilidade tanto na parte fluidodinâmica, quanto em relação à eficiência e ao crescimento do filme. Diversos ensaios foram realizados, os quais foram divididos em três recobrimentos de mesma condição. As Tabelas 4.9, 4.10 e 4.11 apresentam as condições operacionais de cada recobrimento assim como a eficiência e o crescimento obtidos ao final de cada ensaio.

No recobrimento-1, a vazão de jorro de trabalho durante o ensaio de recobrimento, leito úmido, é inferior à velocidade de jorro mínimo em leito seco. Isto decorre da influência da adição da suspensão no comportamento do leito, reduzindo a vazão de jorro mínimo durante o recobrimento. Patel *et al* (1986) realizaram ensaios com água e glicerol e verificaram que, em particular, a altas viscosidades, a vazão de jorro mínimo em leito úmido é bem menor que em leitos secos. Portanto, a reologia do fluido injetado no leito tem uma contribuição considerável no comportamento do leito. Por outro lado, Cunha *et al* (1999), estudando a secagem de pasta de ovo homogeneizado com alimentação descontínua, verificaram que com o aumento da vazão de pasta, ou seja, o aumento de umidade no interior do leito, a vazão de jorro mínimo tende a aumentar. O mesmo foi observado por Passos *et al* (1990) e Santana *et al* (1997), utilizando-se o glicerol como pasta. A alimentação da suspensão durante o recobrimento é feita continuamente, de forma que o leito encontra-se sempre úmido, ao contrário do que ocorreu no trabalho de Cunha *et al* (1999), que, sendo a pasta alimentada descontinuamente, o leito ficava seco em alguns momentos, apresentando assim, um comportamento diferente ao utilizado no presente estudo.

---

**Tabela 4.9: Condições operacionais e resultados para os ensaios de recobrimento-1 do ABS.**

Recobrimento -1	ABS-1	ABS-2	ABS-3	ABS-4
$Q_j / Q_{j,m,o}$	0,97	0,95	0,97	0,98
$W_{suspensão}$ (ml/min)	10,3	10,3	10,3	10,3
$t_{processo}$ (min)	70	70	44,5	70
$\delta$ (%)	6,308	5,224	3,850	5,300
$\eta$ (%)	75,20	62,23	71,39	63,22
$H_{fonte}$ (cm)	6,9	5,8	6,8	7,3
$H_{ânulo}$ (cm)	15,2	16,4	16,1	16,1
$\Delta P_{leito}$ (mma)	58,94	60,85	62,60	63,22
$V_{circulação}$ (cm/s)	0,549	1,164	1,097	1,450
$U_{entrada\ ar}$ (%)	8,5	8,3	7,3	11,2
$U_{saída\ ar}$ (%)	37,0	33,7	22,9	38,2

No ensaio ABS-3 do recobrimento-1, ocorreu um colapso com 17 minutos de processo e aos 44,5 minutos, também ocorreu um entupimento do bico atomizador. A curva de umidade de saída do ar, Figura 4.37, nos permite verificar o instante em que estes problemas são observados.

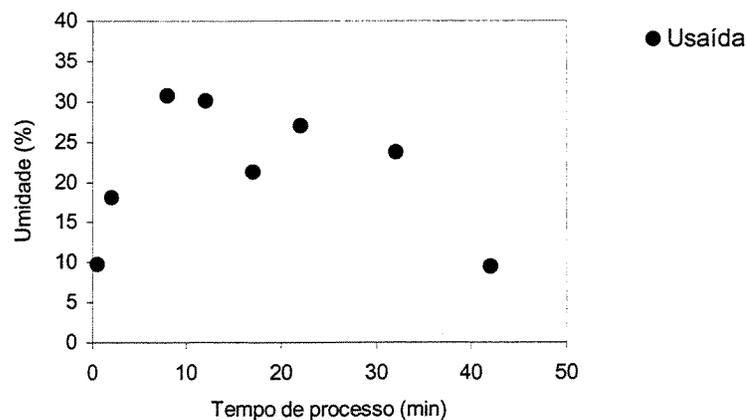


Figura 4.37: Curva de umidade de saída do ar para o ABS-3 no recobrimento-1.

Os ensaios ABS-1, ABS-2 e ABS-4 do recobrimento-1 apresentaram uma boa reprodutibilidade quanto à fluidodinâmica, excetuando-se a velocidade de circulação das partículas no ânulo. No entanto, não se obteve uma reprodutibilidade quanto ao crescimento do filme e à eficiência do processo. O recobrimento-2 foi então realizado a uma vazão de suspensão maior enquanto que o tempo de processo foi reduzido para 60 minutos.

**Tabela 4.10: Condições operacionais e resultados para os ensaios de recobrimento-2 do ABS.**

Recobrimento -2	ABS-1	ABS-2	ABS-3
$Q_j / Q_{jm,o}$	1,109	1,112	1,109
$W_{suspensão}$ (ml/min)	11,0	12,0	12,5
$t_{processo}$ (min)	60	55	51,5
$\delta$ (%)	5,130	4,207	4,000
$\eta$ (%)	95,89	78,63	76,63
$H_{fonte}$ (cm)	10,0	8,7	11,3
$H_{ânulo}$ (cm)	17,0	17,3	16,6
$\Delta P_{leito}$ (mma)	65,03	68,03	66,62
$V_{circulação}$ (cm/s)	2,644	2,695	3,423
$U_{entrada\ ar}$ (%)	12,1	12,2	12,6
$U_{saída\ ar}$ (%)	35,6	33,1	34,0

Nos ensaios ABS-2 e ABS-3 do recobrimento-2 ocorreu um entupimento do bico atomizador, razão pela qual esses dois experimentos não atingiram o tempo estipulado para este processo, que seria de 60 minutos. Como pode ser observada na Figura 4.38, a umidade de saída do ar cresce nos primeiros minutos de processo e em seguida se estabiliza, atingindo o equilíbrio. Após os 30 minutos de processo, observa-se uma redução desta umidade até o instante de 55 minutos, no qual ocorreu o entupimento completo do bico atomizador.

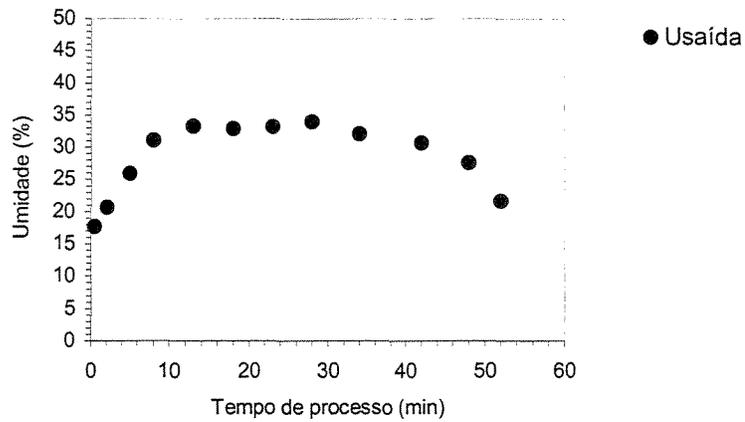


Figura 4.38: Curva de umidade de saída do ar para o ABS-2 no recobrimento-2.

O mesmo pode ser observado na Figura 4.39, após os 34 minutos inicia-se o abaixamento da umidade de saída e o entupimento total do bico se dá no instante de 51,5 minutos.

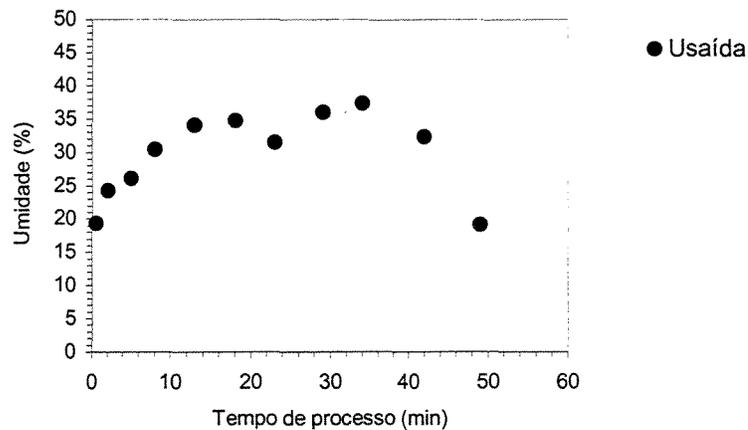


Figura 4.39: Curva de umidade de saída do ar para o ABS-3 no recobrimento-2.

Nos ensaios do recobrimento-3, reduziu-se o tempo de processo para 30 minutos com intuito de melhor controlar as variáveis que interferiam no processo.

**Tabela 4.11: Condições operacionais e resultados para os ensaios de recobrimento-3 do ABS.**

Recobrimento -3	ABS-1	ABS-2	ABS-3
$Q_j / Q_{jm,o}$	1,089	1,103	1,090
$W_{suspensão}$ (ml/min)	12,5	12,1	12,0
$t_{processo}$ (min)	30	30	30
$\delta$ (%)	2,790	2,420	2,186
$\eta$ (%)	84,04	83,40	77,45
$H_{fonte}$ (cm)	5,1	6,1	5,2
$H_{\text{ânulo}}$ (cm)	17,1	16,5	16,7
$\Delta P_{leito}$ (mma)	58,23	58,24	58,18
$V_{circulação}$ (cm/s)	1,043	0,858	0,724
$U_{entrada\ ar}$ (%)	13,1	14,3	15,3
$U_{saída\ ar}$ (%)	53,8	45,2	51,2

Os ensaios do recobrimento-3 apresentaram uma boa reprodutibilidade quanto à fluidodinâmica e ao crescimento do filme. No entanto, obteve-se uma baixa eficiência do processo, se comparada à dos demais ensaios deste recobrimento. Para efeito de comparação, escolheu-se os ensaios ABS-1 e ABS-2 nestas condições operacionais.

O estudo fluidodinâmico comparativo entre esses dois ensaios pode ser visualizado nas Figuras 4.40, 4.41, 4.42, 4.43 e 4.44. Na Figura 4.40, observa-se que a temperatura de saída do ar acompanha a temperatura das partículas no ânulo, conforme também verificado em demais ensaios.

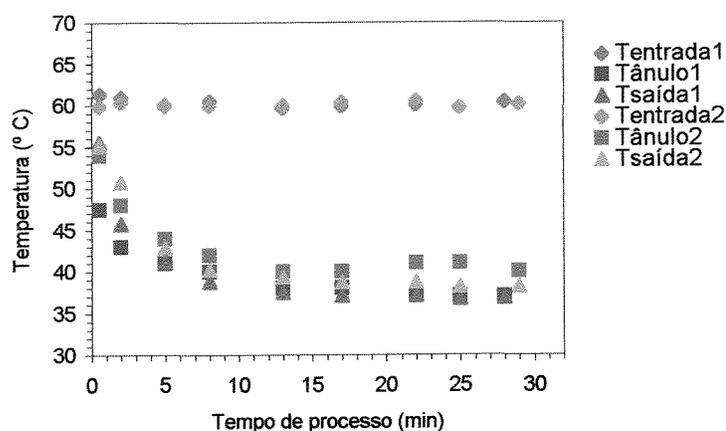


Figura 4.40: Temperatura de entrada e de saída do ar e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento-3 para os ensaios ABS-1 e ABS-2.

Na Figura 4.41, observa-se a boa concordância nos valores de altura de leito, fonte e ânulo que ficam em torno de 22,4 cm, 5,6 cm e 16,8cm, respectivamente.

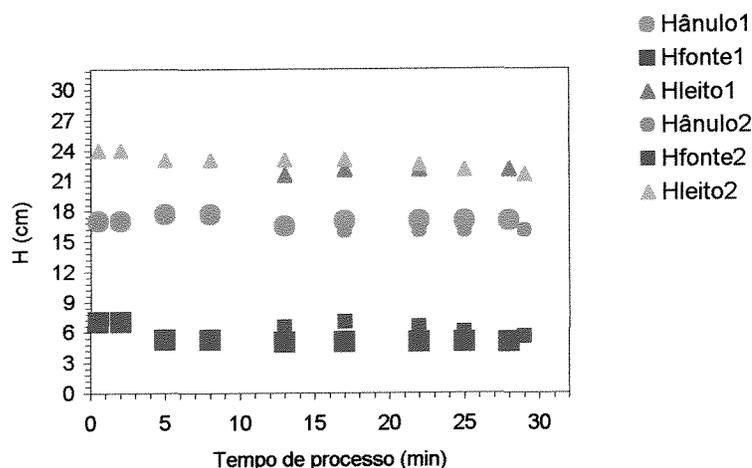


Figura 4.41: Altura do ânulo, do leito e da fonte em função do tempo de processo durante o recobrimento-3 para os ensaios ABS-1 e ABS-2.

Como também verificado para as demais partículas, observa-se na Figura 4.42 que a queda de pressão do leito sofre um decréscimo após o início do processo, e, em seguida, se estabiliza em valor inferior à queda de pressão do leito seco (62,62 mma), em torno de

58,24 mma. A vazão de ar jorro se manteve constante ao longo do processo em ambos os ensaios, ficando em torno de 0,935 kg/min.

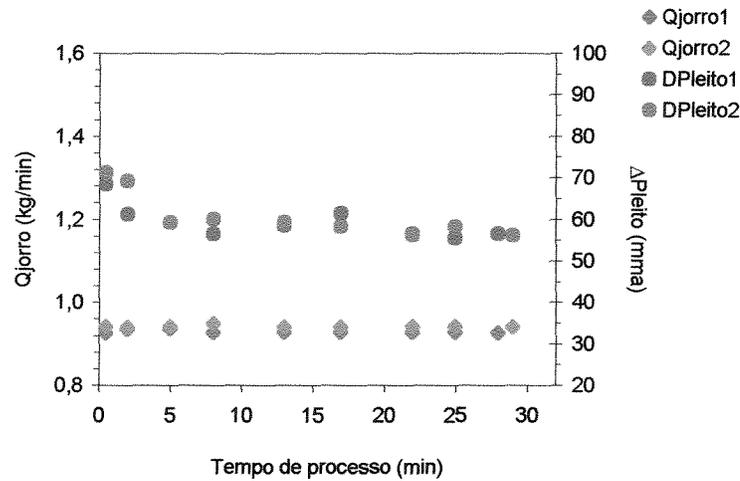


Figura 4.42: Vazão de ar de jorro e queda de pressão do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento-3 para os ensaios ABS-1 e ABS-2.

Na Figura 4.43, a umidade de entrada do ar é constante nos dois ensaios, com uma pequena diferença entre si. O mesmo ocorre para os valores de umidade de saída do ar. Observa-se um aumento da umidade de saída até se atingir um patamar de equilíbrio.

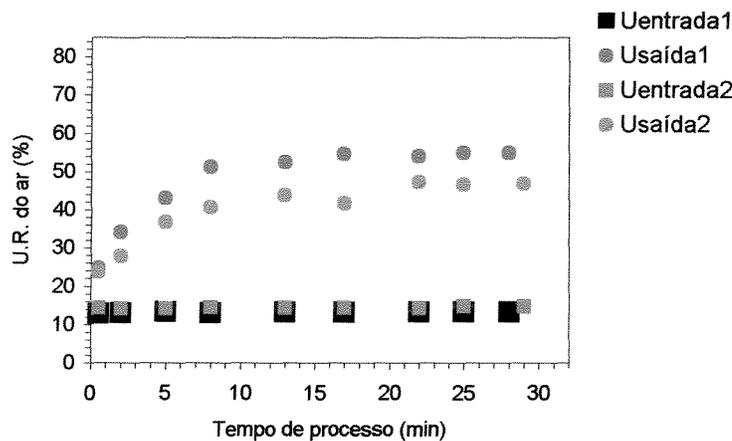


Figura 4.43: Umidade do ar de entrada e de saída do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento-3 para os ensaios ABS-1 e ABS-2.

Como pode ser visto na Figura 4.44, o filme polimérico formado sobre a superfície da partícula encontra-se praticamente seco em todo o processo, com valores de umidade em base seca inferiores a 0,45%.

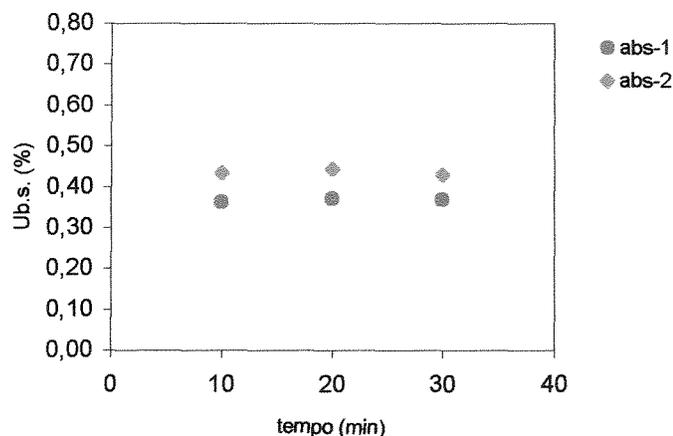


Figura 4.44: Umidade da partícula em base seca em função do tempo de processo durante o recobrimento-3 para os ensaios ABS-1 e ABS-2.

A velocidade das partículas na parede do ânulo, Figura 4.45, decresce com o tempo, atingindo um valor médio após os 5 minutos de processo em torno de  $0,858 \pm 0,298$  cm/s, o que representa uma brusca redução da taxa de circulação das partículas em leito úmido, se comparado ao leito seco, no qual a velocidade das partículas é de 3,440 cm/s. Esta redução se deve ao elevado ângulo de repouso do ABS ( $\Phi=43,7^\circ$ ), indicando a baixa escoabilidade da partícula. A Figura também revela que a taxa de circulação decresce com o aumento da umidade no interior do leito. No entanto, outros autores (Passos *et al* (1990) e Santana *et al* (1997)), estudando a influência da adição de líquido na fluidodinâmica do leito utilizaram glicerol como pasta e, como partícula inerte, esferas de vidro e “pellets” de plástico, respectivamente. Os mesmos realizaram medidas de velocidade mínima de jorro, queda de pressão estável, taxa de circulação da partícula e porosidade do leito a diferentes razões de ( $V_{líq} / V_{leito}$ ) e os resultados indicaram que essa taxa de circulação inicialmente aumenta com o aumento do conteúdo de líquido, até atingir um valor máximo, a partir do qual um ligeiro aumento no conteúdo de líquido provoca uma redução nesta taxa. Esse comportamento não é o mesmo verificado neste trabalho. Já alguns resultados de MEDEIROS (2001) mostram a redução de queda de pressão do leito devido à baixa

circulação das partículas no ânulo, com baixa porosidade nesta região e conseqüente aumento da porosidade na região do jorro. Portanto, o comportamento é dependente das propriedades físicas do material do leito e de interações de superfície entre a partícula e a suspensão. Ainda nesta Figura, pode-se verificar que a estabilização da velocidade de circulação das partículas no ânulo, da umidade de saída do ar e da queda de pressão do leito coincide em um mesmo tempo de processo. Deste modo, propõe-se o acompanhamento da queda de pressão do leito e/ou da umidade de saída do ar como parâmetro de controle indicando o momento em que o leito em processo de recobrimento atinge o regime de jorro estável.

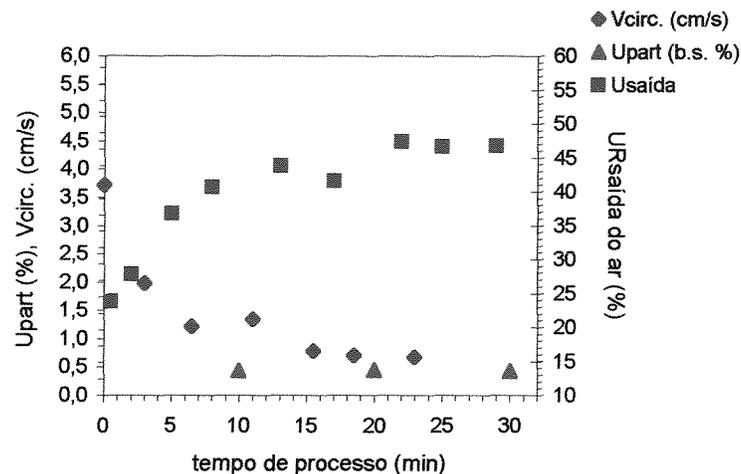


Figura 4.45: Velocidade de circulação das partículas no interior do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento-3 para os ensaio ABS-2.

A Figura 4.46 apresenta as partículas de ABS antes e após 30 minutos de ensaio (ABS-1, recobrimento-3).

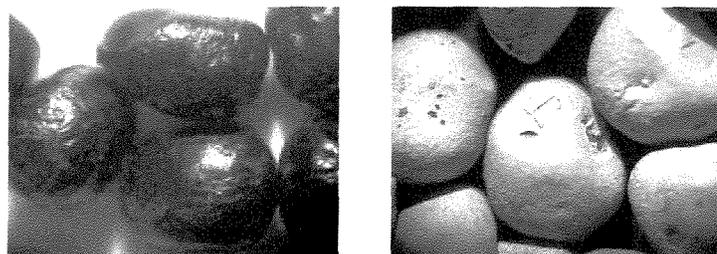


Figura 4.46 – Partículas de ABS® não recobertas e recobertas em microscópio óptico com ampliação de 40 x.

- **Esfera de vidro**

A esfera de vidro apresentou uma fluidodinâmica adequada durante todo o ensaio de recobrimento. Isto pode ser justificado pelas características físicas desta partícula, dentre as quais as mais relevantes são: a forma, apresentando uma superfície mais lisa e arredondada, o que minimiza os efeitos do atrito interpartícula; o baixo ângulo de repouso ( $\Phi=33^\circ$ ), o que indica uma boa escoabilidade; e o baixo ângulo de contato entre a superfície sólida e a suspensão ( $\theta = 40,3^\circ$ ). Sendo assim, a gota atomizada, ao atingir a superfície da partícula, tende a se espalhar de forma espontânea, proporcionando um molhamento mais completo da mesma. Por estas razões, a esfera de vidro apresentou um filme de recobrimento bem mais uniforme se comparado ao das demais partículas.

Foram testadas duas condições operacionais para o ensaio de recobrimento da esfera. Trabalhou-se com vazões de ar próximas às condições do mínimo jorro em leite seco ( $Q_{jm,o}$ ), que para a esfera é de 1,098 kg/min, utilizando-se uma carga mássica de 3300g. As Tabelas 4.12 e 4.13 apresentam os resultados obtidos nos quatro ensaios.

**Tabela 4.12: Condições operacionais e resultados para os ensaios de recobrimento-1 da esfera de vidro.**

Recobrimento -1	Esfera-1	Esfera--2
$Q_j / Q_{jm,o}$	1,032	1,044
$W_{suspensão}$ (ml/min)	12,5	12,5
$t_{processo}$ (min)	53	51,5
$\delta$ (%)	1,663	1,482
$\eta$ (%)	61,72	56,60
$H_{fonte}$ (cm)	6,3	7,3
$H_{ânulo}$ (cm)	16,1	16,0
$\Delta P_{leito}$ (mma)	165,00	165,90
$V_{circulação}$ (cm/s)	1,380	1,642
$U_{entrada}$ ar (%)	8,5	8,0
$U_{saída}$ ar (%)	33,3	14,7

**Tabela 4.13: Condições operacionais e resultados para os ensaios de recobrimento-2 da esfera de vidro.**

Recobrimento -2	Esfera-1	Esfera--2
$Q_j / Q_{jm,o}$	1,084	1,076
$W_{suspensão}$ (ml/min)	12,5	12,5
$t_{processo}$ (min)	30	30
$\delta$ (%)	0,974	0,942
$\eta$ (%)	76,33	75,90
$H_{fonte}$ (cm)	6,4	8,0
$H_{ânulo}$ (cm)	16,6	16,0
$\Delta P_{leito}$ (mma)	165,67	165,14
$V_{circulação}$ (cm/s)	2,082	1,836
$U_{entrada\ ar}$ (%)	17,4	16,2
$U_{saída\ ar}$ (%)	38,5	32,1

Pode-se verificar que, em ambas as condições se obteve uma boa reprodutibilidade quanto à fluidodinâmica, à eficiência e ao crescimento da partícula. No entanto, na primeira condição, na qual se pretendia realizar o recobrimento por um tempo de 60 minutos, ocorreu o entupimento do bico atomizador nos dois ensaios. Além disso, não se conseguiu reproduzir a umidade de saída do ar. Na segunda condição operacional, o tempo de recobrimento foi reduzido à metade e com isso, obtivemos uma melhor eficiência do processo, além da boa reprodutibilidade dos parâmetros fluidodinâmicos.

O estudo fluidodinâmico comparando os ensaios esfera-1 e esfera-2 do recobrimento-2 está apresentado nas Figuras 4.47, 4.48, 4.49, 4.50 e 4.51.

A Figura 4.47 mostra o acompanhamento da temperatura de entrada e de saída do ar, assim como da temperatura do ânulo. Como também observado para demais partículas, o ânulo apresenta o mesmo perfil de temperatura que o do ar de saída do leito. A temperatura de entrada em ambos os ensaios foi controlada em 60°C.

Na Figura 4.48, observa-se que a altura do leito, do ânulo e da fonte praticamente não variou, indicando assim, que o jorro se manteve estável durante todo o processo, em ambos os ensaios. A estabilidade do jorro pode ser verificada através do acompanhamento da queda de pressão do leito, que se manteve constante em torno de 165 mma (Figura 4.49). A queda de pressão em leito seco é de 177,50 mma. A diferença deste parâmetro em leito seco e em leito úmido é de apenas 7,5%, sendo inferior à das demais partículas, com densidade aparente menor.

Verifica-se na Figura 4.50 que a umidade de saída do ar aumenta no início do processo e, aos 10 minutos, se estabiliza em um patamar de equilíbrio. Na Figura 4.51, observa-se que o contrário ocorre com a velocidade de circulação das partículas na parede, ou seja, quando a umidade do leito é mais baixa, a circulação das partículas é maior. Com o passar do tempo, as partículas vão ficando mais pesadas e, conseqüentemente, mais lentas. Quando o equilíbrio é estabelecido, a velocidade não mais varia com o tempo. A velocidade de circulação das partículas em leito úmido sofreu uma redução de apenas 25% em relação ao leito seco. A grande capacidade do leito de esferas em suportar um aumento de umidade deve estar relacionada ao baixo ângulo de repouso da esfera, indicando uma boa escoabilidade. Na Figura 4.52, verifica-se que o filme da partícula é totalmente seco ao final do processo.

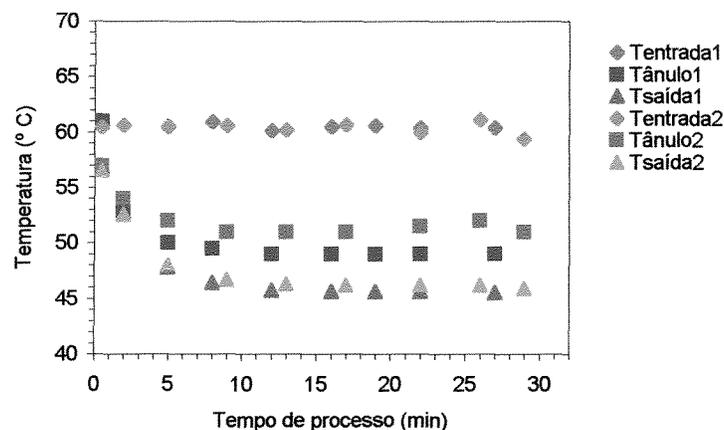


Figura 4.47: Temperatura de entrada e de saída do ar e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento-2 para os ensaios Esfera-1 e Esfera-2.

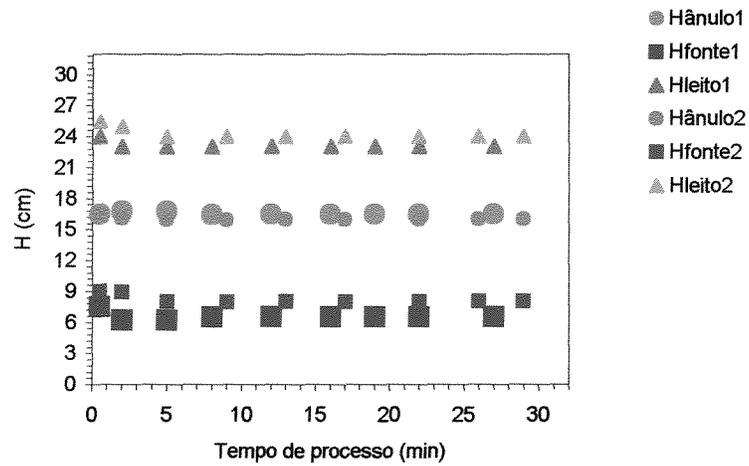


Figura 4.48: Altura do ânulo, do leito e da fonte em função do tempo de processo durante o recobrimento-2 para os ensaios Esfera-1 e Esfera-2.

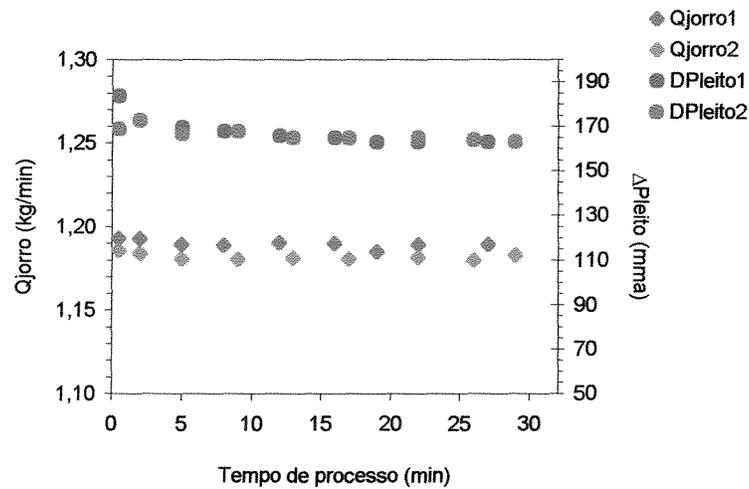


Figura 4.49: Vazão de ar de jorro e queda de pressão do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento-2 para os ensaios Esfera-1 e Esfera-2.

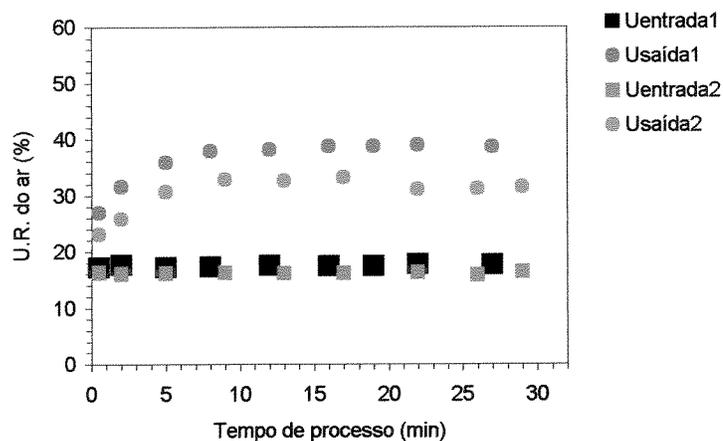


Figura 4.50: Umidade do ar de entrada e de saída do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento-2 para os ensaios Esfera-1 e Esfera-2.

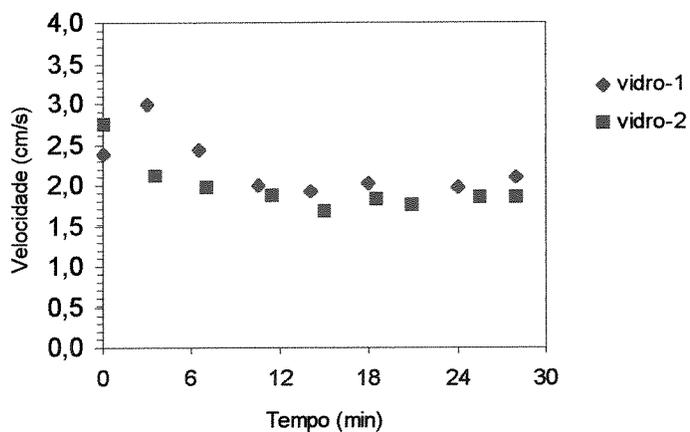


Figura 4.51: Velocidade de circulação das partículas no interior do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento-2 para os ensaios Esfera-1 e Esfera-2.

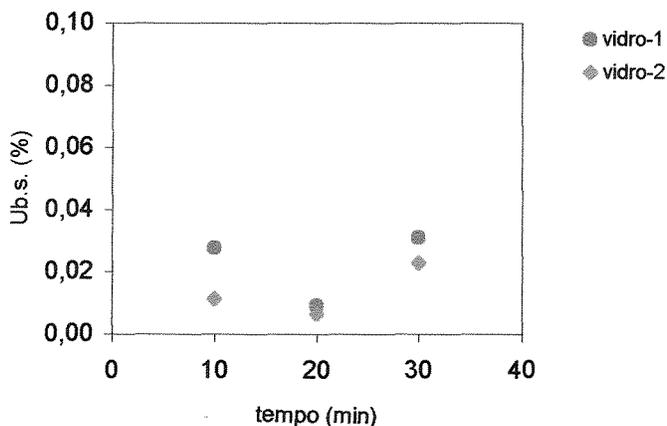


Figura 4.52: Umidade da partícula em base seca em função do tempo de processo durante o recobrimento-2 para os ensaios Esfera-1 e Esfera-2.

A Figura 4.53 apresenta as partículas de esfera de vidro antes e após 30 minutos de recobrimento (ensaio esfera-2 do recobrimento-2).

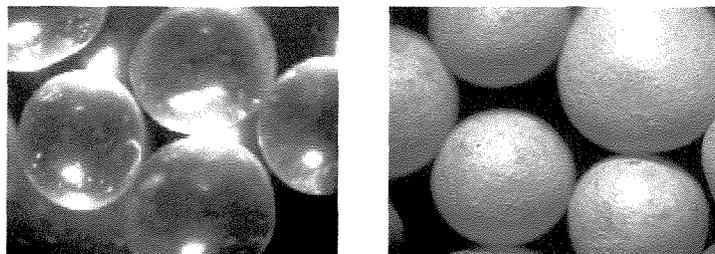


Figura 4.53 – Partículas de esfera de vidro não recobertas e recobertas em microscópio óptico com ampliação de 40 x.

- **Placebo**

Foram realizados dois ensaios de recobrimento com o placebo, os quais se mostraram reprodutíveis quanto à eficiência e ao crescimento da partícula, assim como também no que se refere à parte fluidodinâmica. Ambos apresentaram um regime de jorro estável durante todo o ensaio.

O placebo apresenta um elevado ângulo de repouso ( $\Phi = 43,75^\circ$ ), indicando que a partícula não possuiria uma boa escoabilidade. Todavia, observou-se uma boa circulação

das partículas no interior do leito. O placebo apresenta uma porosidade superficial de 18,64% o que permite que ele absorva a umidade inicial inerente a atomização da suspensão. No início do processo, o leito fica um pouco mais pesado, diminuindo a velocidade de circulação das partículas. A secagem das partículas pelo ar de jorro aquecido equilibra-se com o aumento da umidade devido à alimentação da suspensão. Em seguida, o regime de jorro estável é logo atingido.

O ângulo de contato entre a suspensão e a superfície do placebo ( $\theta = 74,0^\circ$ ) encontra-se em um valor intermediário, acima dos valores referentes à esfera e ao ABS, para os quais o recobrimento ocorre tipo filme; e abaixo dos valores referentes ao PEBD, PP e PS, para os quais verifica-se apenas uma secagem da suspensão.

A Tabela 4.14 apresenta as condições de operação, juntamente com os valores de eficiência ( $\eta$ ) e crescimento ( $\delta$ ) obtidos em ambos os ensaios de recobrimento com o placebo. A temperatura de entrada do ar foi mantida à  $60^\circ\text{C}$  e a pressão de atomização do ar à 20 psig, com carga mássica de partículas igual a 1800g, trabalhando-se na região cone-cilíndrica do leito. A vazão de ar na condição de jorro mínimo em leito seco à 20 psig ( $Q_{j,m,o}$ ) para o placebo é de 1,155 kg/min.

**Tabela 4.14: Condições operacionais e resultados para os ensaios de recobrimento-1 do placebo.**

Recobrimento -1	Placebo-1	Placebo-2
$Q_j / Q_{j,m,o}$	1,093	1,090
$W_{\text{suspensão}} \text{ (ml/min)}$	12,25	12,00
$t_{\text{processo}} \text{ (min)}$	30	30
$\delta \text{ (\%)}$	0,94	0,89
$\eta \text{ (\%)}$	41,23	39,21
$H_{\text{fonte}} \text{ (cm)}$	10,0	8,1
$H_{\text{ânulo}} \text{ (cm)}$	16,9	16,9
$\Delta P_{\text{leito}} \text{ (mma)}$	81,93	75,77

$V_{\text{circulação}}$ (cm/s)	1,653	1,693
$U_{\text{entrada ar}}$ (%)	11,3	10,8
$U_{\text{saída ar}}$ (%)	33,3	33,5

A baixa eficiência obtida nos ensaios Placebo-1 e Placebo-2 do recobrimento-1 se justifica pela perda de massa da partícula durante o recobrimento em virtude do grande atrito interpartícula. Como o crescimento do filme é baixo, uma pequena variação de massa da partícula recoberta em relação à partícula inerte acarreta em grande erro na determinação da eficiência do processo. No entanto, pode-se verificar a partir da microscopia óptica de partículas do placebo recobertas e não recobertas que o recobrimento se mostrou bastante eficiente e uniforme. A Figura 4.60 é ilustrativa da partícula antes e após o recobrimento.

As Figuras 4.54, 4.55, 4.56, 4.57, 4.58 e 4.59 apresentam o estudo fluidodinâmico comparativo entre os dois ensaios de recobrimento do placebo. Na Figura 4.54, observa-se que as curvas de acompanhamento das temperaturas do ar de saída do leito assim como das partículas no ânulo apresentam uma tendência decrescente no início do processo devido ao aumento de umidade pela atomização de suspensão e, em seguida, se estabilizam em torno de uma média atingindo o regime permanente.

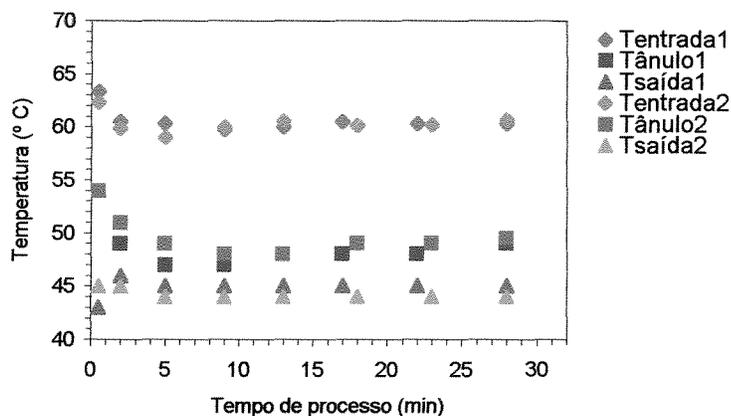


Figura 4.54: Temperatura de entrada e de saída do ar e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento-1 para os ensaios Placebo-1 e Placebo-2.

Na Figura 4.55, tem-se as curvas de acompanhamento das alturas do ânulo, fonte e leito para ambos os ensaios, onde se observa a boa reprodutibilidade dos ensaios quanto à parte fluidodinâmica. Há uma ligeira redução na altura da fonte após o início do processo devido ao início da atomização, estabilizando-se em seguida em um patamar. Não se verifica, no entanto, alteração na altura do ânulo. Os valores médios destas alturas encontram-se na Tabela 4.14.

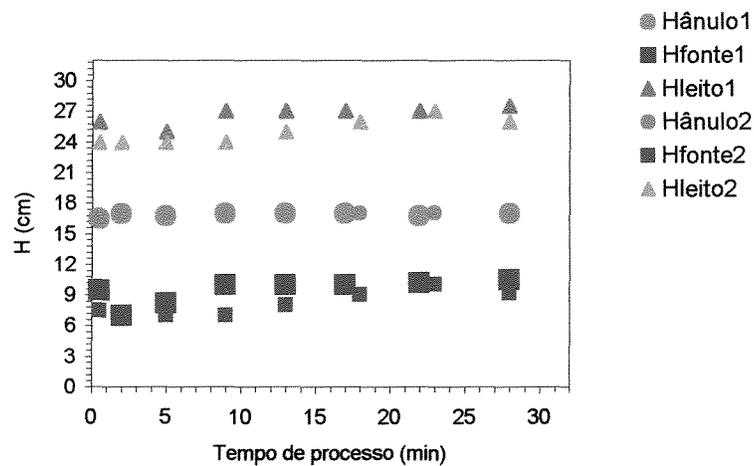


Figura 4.55: Altura do ânulo, do leito e da fonte em função do tempo de processo durante o recobrimento-1 para os ensaios Placebo-1 e Placebo-2.

Conforme mostra a Figura 4.56, a vazão de ar jorro se manteve constante durante todo o ensaio, trabalhando com uma vazão 9% acima do jorro mínimo em ambos os ensaios. A curva de queda de pressão do leito apresenta uma tendência decrescente no início do processo devido ao aumento de umidade no interior do leito, estabilizando-se após 8 minutos em torno de 81,90 mma. A queda de pressão em leito seco é de 92,70 mma.

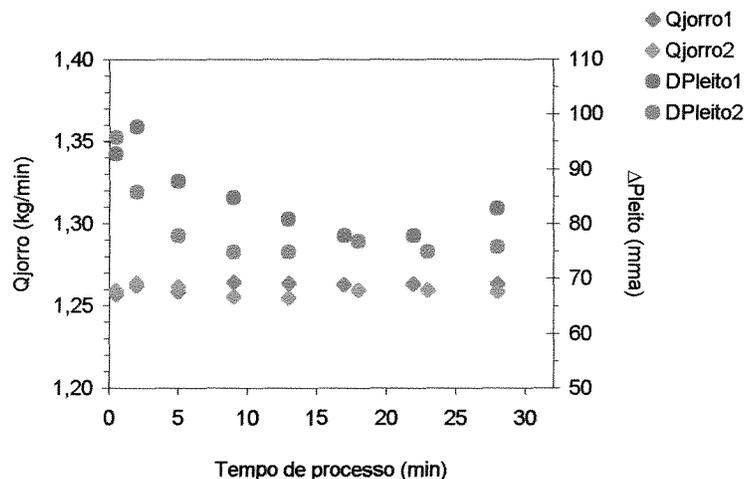


Figura 4.56: Vazão de ar de jorro e queda de pressão do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento-1 para os ensaios Placebo-1 e Placebo-2.

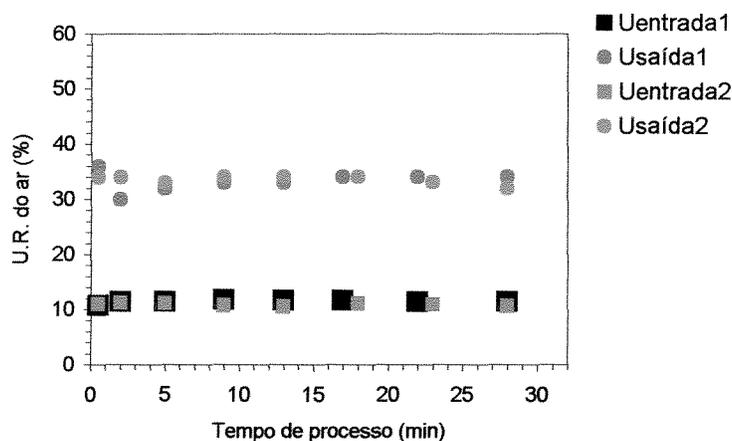


Figura 4.57: Umidade do ar de entrada e saída do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento-1 para os ensaios Placebo-1 e Placebo-2.

A velocidade de circulação das partículas na parede do ânulo após 3 minutos do processo, Figura 4.58, sofreu uma redução de aproximadamente 60% em relação ao leito seco. Isto pode estar relacionado ao elevado ângulo de repouso da partícula. A porosidade do placebo facilita a absorção desta umidade inicial, o que torna a partícula mais pesada, diminuindo sua mobilidade no leito. Observa-se para o ensaio-2 uma estabilização desta velocidade após os 6 minutos de processo.

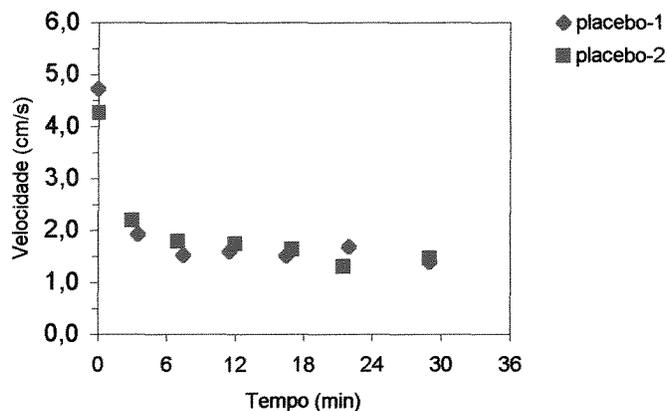


Figura 4.58: Velocidade de circulação das partículas no interior do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento-1 para os ensaios Placebo-1 e Placebo-2.

O placebo, possuindo uma porosidade relativamente alta, apresentou um filme com umidade bem acima das obtidas para as demais partículas, que quase não têm porosidade. O placebo utilizado em ambos os ensaios provinha do mesmo lote, de forma que a umidade inicial do inerte é a mesma para os dois ensaios. O filme de recobrimento formado no placebo, sendo este bem uniforme, impediu a liberação da água presente no interior da partícula. Deste modo, realizou-se a secagem das partículas em estufa à vácuo à 105°C e à 25 inHg até que não houvesse mais variação da massa da partícula.

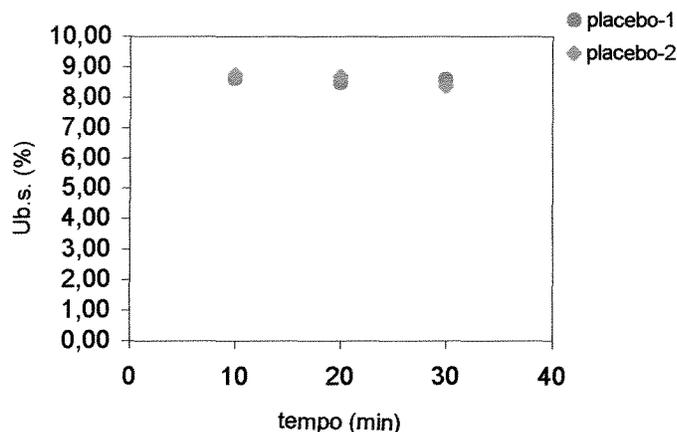


Figura 4.59: Umidade da partícula em base seca em função do tempo de processo durante o recobrimento-1 para os ensaios Placebo-1 e Placebo-2.

A Figura 4.60 apresenta, respectivamente, o placebo sem recobrimento e o placebo após 30 minutos de processo para o ensaio—1do recobrimento-1.

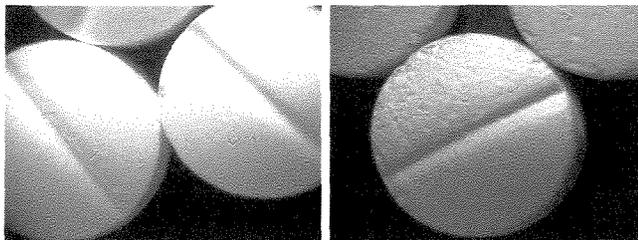


Figura 4.60: Partículas do placebo não recobertas e recobertas em microscópio óptico com ampliação de 40 x.

#### 4.6. Determinação da vazão máxima de suspensão

A vazão máxima de suspensão a ser alimentada nos ensaios de recobrimento foi determinada segundo metodologia descrita no item 3.5.5. O grau de saturação também foi determinado de acordo com as Equações 32, 33, 34, 35 e 36 para cada vazão utilizada, e tempo de processo em cada ensaio. O tempo estabelecido de processo foi de 30 minutos para todas as partículas, de acordo com estudo anterior descrito no item 4.5. No entanto, em alguns ensaios, este tempo foi inferior a 30 minutos devido ao colapso total do leito. Vale ressaltar que não foram observados aglomerados durante o recobrimento. O leito colapsou com o aumento da vazão de suspensão alimentada devido à capacidade de secagem do leito. As partículas ficam tão pesadas com o aumento da umidade que a vazão de ar de jorro utilizada é insuficiente para manter o jorro, ocorrendo, assim, o colapso.

As Tabelas 4.15, 4.16 e 4.17 apresentam um resumo das condições operacionais, dados fluidodinâmicos, eficiência e crescimento do filme para os ensaios realizados para as partículas ABS®, esfera de vidro e placebo a diferentes vazões de suspensão. A temperatura do ar de entrada foi mantida à 60°C. A vazão de ar de jorro foi alimentada cerca de 10% acima da vazão de jorro mínimo. A suspensão foi atomizada à pressão de 20 psig, de modo a manter todas as condições constantes, variando-se apenas a vazão de suspensão atomizada. A Tabela 4.18 apresenta o intervalo no qual se encontra a máxima vazão de suspensão determinada para cada partícula. As Figuras referentes ao estudo fluidodinâmico se encontram no ANEXO C.

**Tabela 4.15 – Resumo dos ensaios de recobrimento para o ABS®.**

Ensaio	ABS-1	ABS-2	ABS-3	ABS-4
$Q_j/Q_{jm,o}$	1,09	1,09	1,09	1,11
$W_{susp}$ (ml/min)	12,0	14,0	15,0	17,0
$S'$ ( $\text{min}^{-1}$ )	0,0107	0,0125	0,0138	0,0151
t (min)	30	19	15	10,3
$\delta$ (%)	2,186	1,660	1,313	1,120
$\eta$ (%)	77,45	87,18	84,06	80,57
$H_{\text{fonte}}$ (cm)	5,2	5,6	6,4	8,4
$H_{\text{ânulo}}$ (cm)	16,7	16,5	16,5	16,3
$\Delta P_{\text{leito}}$ (mma)	58,18	59,52	61,72	57,93
$V_{\text{circulação}}$ (cm/s)	0,724	0,698	0,693	0,538
$U_{\text{entrada ar}}$ (%)	15,4	16,1	15,3	15,8
$U_{\text{saída ar}}$ (%)	51,3	63,5	68,9	63,3

**Tabela 4.16 – Resumo dos ensaios de recobrimento para a esfera de vidro.**

Ensaio	Esfera-1	Esfera -2	Esfera -3	Esfera -4
$Q_j/Q_{jm,o}$	1,08	1,09	1,09	1,09
$W_{susp}$ (ml/min)	12,5	16,5	20,0	22,0
$S'$ ( $\text{min}^{-1}$ )	0,0106	0,0140	0,0170	0,0187
t (min)	30	30	30	19,5
$\delta$ (%)	0,974	1,364	1,829	1,159
$\eta$ (%)	76,33	93,11	92,95	85,29
$H_{\text{fonte}}$ (cm)	6,4	9,6	7,0	8,6

$H_{\text{ânulo}}$ (cm)	16,6	16,6	17,1	16,9
$\Delta P_{\text{leito}}$ (mma)	165,67	161,00	169,83	161,16
$V_{\text{circulação}}$ (cm/s)	2,082	1,461	1,287	1,522
$U_{\text{entrada ar}}$ (%)	17,4	16,9	18,1	16,1
$U_{\text{saída ar}}$ (%)	38,5	68,6	78,2	77,6

Tabela 4.17 – Resumo dos ensaios de recobrimento para o Placebo.

Ensaio	Placebo-1	Placebo-2	Placebo-3	Placebo-4	Placebo-5	Placebo-6
$Q_j/Q_{j,m,o}$	1,09	1,11	1,11	1,11	1,10	1,11
$W_{\text{susp}}$ (ml/min)	12,25	16,0	18	20	21	22
$S'$ ( $\text{min}^{-1}$ )	0,0117	0,0152	0,0171	0,0190	0,0200	0,0209
$t$ (min)	30	30	30	30	30	7,5
$\delta$ (%)	0,94	1,91	2,00	2,48	2,89	0,58
$\eta$ (%)I	41,40	60,25	55,71	64,25	70,14	54,72
$H_{\text{fonte}}$ (cm)	10	11,5	9,3	8,2	6,4	7,5
$H_{\text{ânulo}}$ (cm)	16,9	16,5	16,5	17,0	17,5	16,5
$\Delta P_{\text{leito}}$ (mma)	81,93	77,75	74,61	75,08	72,76	75,74
$V_{\text{circulação}}$ (cm/s)	1,653	1,512	1,409	1,258	1,303	1,178
$U_{\text{entrada ar}}$ (%)	11,3	12,4	12,8	12,4	11,2	13,2
$U_{\text{saída ar}}$ (%)	33,3	33,7	39,4	46	53,4	34,3

**Tabela 4.18 - Vazão Máxima de suspensão.**

Partícula	$W_{\text{susp},M}$ (ml/min)
ABS	$12,0 < W_{\text{susp},M} < 14,0$
Esfera de vidro	$20,0 < W_{\text{susp},M} < 22,0$
Placebo	$21,0 < W_{\text{susp},M} < 22,0$

Nos ensaios de recobrimento ABS-2, ABS-3 e ABS-4 ocorreram colapsos nos instantes 19, 15 e 10,3 minutos de processo, respectivamente, além de apresentarem sinais de instabilidade como aumento da altura de fonte. A taxa de circulação das partículas também decresce com o aumento de umidade no interior do leito. As partículas ficam mais pesadas, dificultando sua mobilidade.

Para a esfera de vidro, verificou-se a maior capacidade do leito para suportar um aumento na quantidade de suspensão alimentada. Apenas no ensaio de recobrimento ESFERA-4 ocorreu um colapso após 19,5 minutos de processo. Nos três primeiros ensaios, observou-se um bom comportamento fluidodinâmico do leito com velocidades de circulação de partículas bem superior às das demais partículas. Obteve-se um aumento do crescimento do filme e da eficiência do processo com o aumento da vazão de suspensão, excetuando-se o ensaio ESFERA-4 que não atingiu o tempo de processo estabelecido.

SCHNEIDER e BRIDGWATER (1993) estudaram o efeito da densidade da partícula comparando os resultados obtidos com esferas de vidros e de resina acrílica, ambas com 5 mm de diâmetro. Os autores verificaram que os leitos de esferas de vidro, partículas mais densas, poderiam ser operados com um volume de líquido de 1,5 a 2 vezes maior que os leitos de esferas de acrílico. O mesmo comportamento foi observado neste trabalho usando partículas de ABS® e esferas de vidro, ambas de forma arredondada e diâmetros similares. O leito de esferas de vidro foi operado com uma vazão de até 70% maior que o leito de partículas de ABS® sem apresentar sinais de instabilidade.

O leito de placebos também apresentou uma boa capacidade de operação em vazões mais elevadas de suspensão. O intervalo no qual se obteve a máxima vazão de suspensão para esta partícula, mantendo constante as demais condições operacionais, está dentro do intervalo obtido para a esfera de vidro. O placebo possui um valor de densidade intermediário entre o ABS e a esfera. No entanto, a grande porosidade da partícula (18,64%) favorece a absorção de uma maior quantidade de suspensão. Em virtude da boa escoabilidade do placebo, o movimento cíclico das partículas não foi prejudicado pelo aumento de umidade no interior do leito, como no caso do ABS. Somente no ensaio PLACEBO-5 observou-se alguns sinais de instabilidade ao final do processo, culminando no colapso total aos 7,5 minutos de processo ocorrido no ensaio seguinte (PLACEBO-6) com uma vazão superior.

Verificou-se também a tendência decrescente da velocidade de circulação das partículas à medida que a vazão era aumentada. Embora a determinação do crescimento do filme e da eficiência do processo tenha sido prejudicada em função do desgaste sofrido pela partícula, verificou-se que, com exceção do ensaio PLACEBO-6, que colapsou antes do tempo estabelecido, obteve-se um aumento do crescimento do filme com o aumento da vazão de suspensão alimentada. A máxima eficiência foi obtida no ensaio PLACEBO-5, com uma vazão de 21,0 ml/min de suspensão alimentada.

Além da densidade da partícula, o ângulo de contato entre a suspensão e a superfície da partícula também influenciam no desempenho do processo. O ABS apresenta um ângulo de contato superior ao da esfera. Assim, espera-se um melhor desempenho por parte da esfera de vidro, conforme pode ser verificado na Tabela 4.18. O placebo apresenta um ângulo de contato superior ao da esfera e do ABS. No entanto, o leito de placebos suporta uma vazão de suspensão semelhante ao do leito de esferas de vidro. Neste caso, a influência da porosidade inicial da partícula prevalece à influência do ângulo de contato.

#### 4.7. Estudo Fluidodinâmico em função da Saturação do leito

As Figuras 4.61, 4.62 e 4.63 apresentam o comportamento da altura da fonte com o aumento do grau de saturação do leito durante o recobrimento para o ABS, a esfera e o placebo, respectivamente. Observa-se que, em  $S'=0$ , ou seja, em leito seco, a fonte apresenta uma altura elevada. A altura da fonte durante o recobrimento é menor se comparada ao do leito seco. Em seguida, a fonte tende a aumentar com o aumento do grau de saturação, ou melhor, com o aumento da vazão de suspensão alimentada, conforme mostra a Figura 4.61. Isto comprova que leitos mais úmidos, um dos sinais de instabilidade do leito é a fonte elevada e diferenciada, visto que os ensaios ABS-2, ABS-3 e ABS-4 sofreram um colapso total nos instantes 19, 15 e 10,3 minutos de processo, respectivamente.

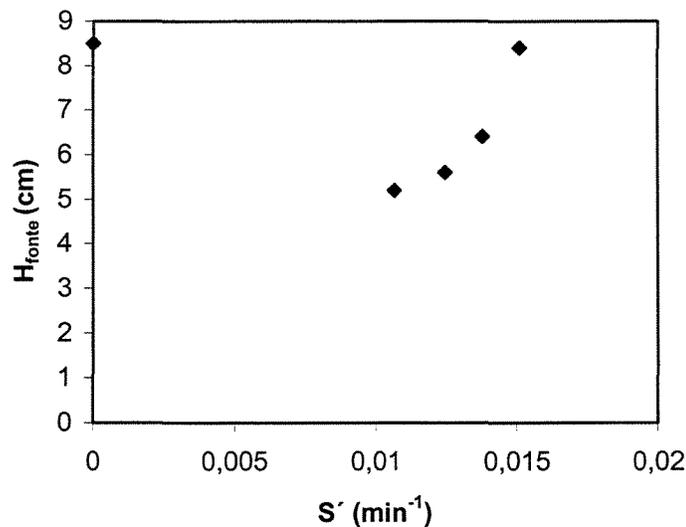


Figura 4.61:  $H_{\text{fonte}}$  em função de  $S'$  para o ABS.

Na Figura 4.62 verifica-se durante o recobrimento o aumento da altura da fonte com o aumento do grau de saturação até atingir um valor máximo ( $S'=0,0140 \text{ min}^{-1}$ ), a partir do qual a altura da fonte decresce. O aumento da fonte se deve inicialmente à instabilidade. Em seguida, esta fonte decresce devido ao colapso do leito, como no ensaio ESFERA-4 ( $S'=0,0187 \text{ min}^{-1}$ ). Os ensaios ESFERA-1 ( $S=0,0106 \text{ min}^{-1}$ ) e ESFERA-3 ( $S=0,0170 \text{ min}^{-1}$ ) apresentaram regime de jorro estável durante todo o tempo de processo.

O ensaio ESFERA-4 ( $S=0,365$ ) sofreu um colapso aos 19,5 minutos de processo, além de apresentar sinais de instabilidade em virtude da elevada vazão de suspensão alimentada ( $W_{\text{susp}}=22,0$  ml/min).

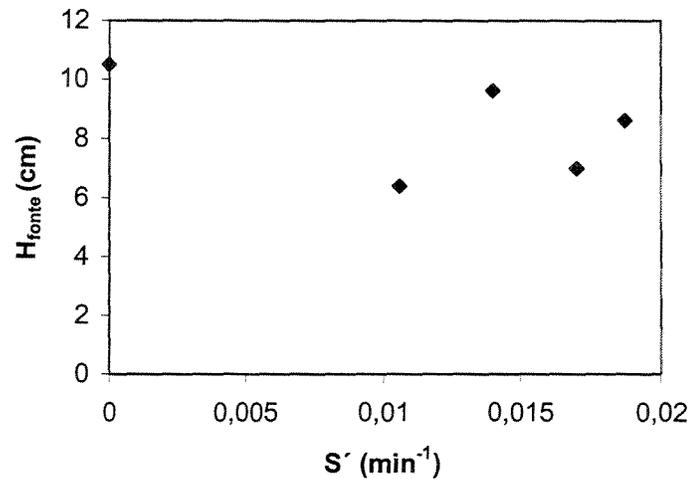


Figura 4.62:  $H_{\text{fonte}}$  em função de  $S'$  para a esfera de vidro.

Um comportamento similar ao da esfera pode ser verificado para o placebo. Verifica-se um aumento da altura da fonte do ensaio PLACEBO-2 ( $S'=0,0152$   $\text{min}^{-1}$ ) em relação ao ensaio PLACEBO-1 ( $S'=0,0117$   $\text{min}^{-1}$ ). A partir daí, a altura da fonte diminui com o aumento do grau de saturação, ocorrendo um colapso no ensaio PLACEBO-6 ( $S'=0,0209$   $\text{min}^{-1}$ ).

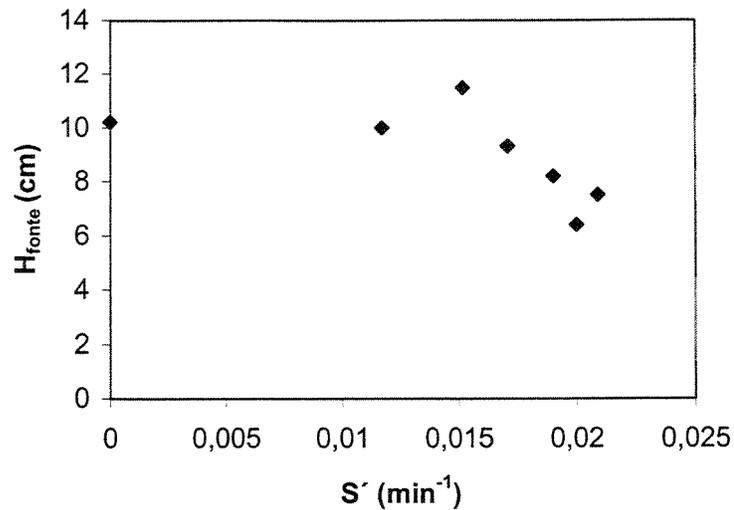


Figura 4.63:  $H_{\text{fonte}}$  em função de  $S'$  para o placebo.

Na Figura 4.64, verifica-se uma tendência decrescente da queda de pressão do leito com o aumento do grau de saturação. O mesmo comportamento também foi verificado por demais autores (Patel *et al* (1986), Schneider e Bridgwater (1993), Cunha *et al* (1999) e Medeiros (2001)) em secagem de pastas em leito de jorro, onde a redução na queda de pressão significava um indicativo de instabilidade fluidodinâmica.

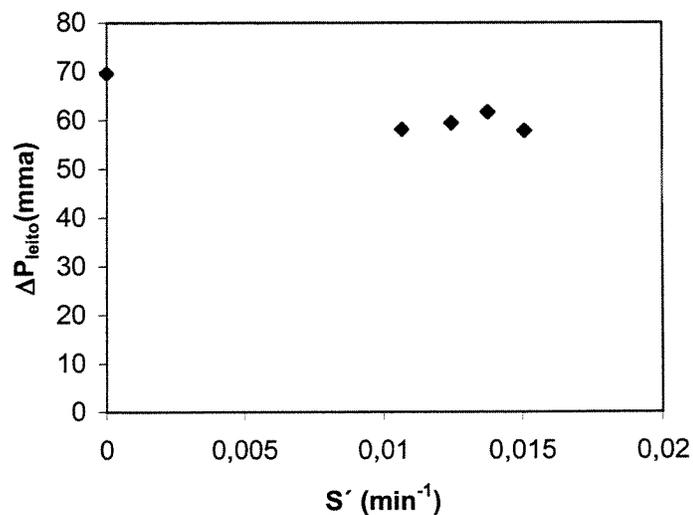


Figura 4.64:  $\Delta P_{\text{leito}}$  em função de  $S'$  para o ABS.

Na Figura 4.65, verifica uma redução da queda de pressão do leito úmido em relação ao leito seco. Durante o recobrimento, os ensaios realizados com a esfera apresentaram valores de queda de pressão muito próximos, ou seja, o aumento do grau de saturação de um ensaio para outro não teve influência significativa para este parâmetro.

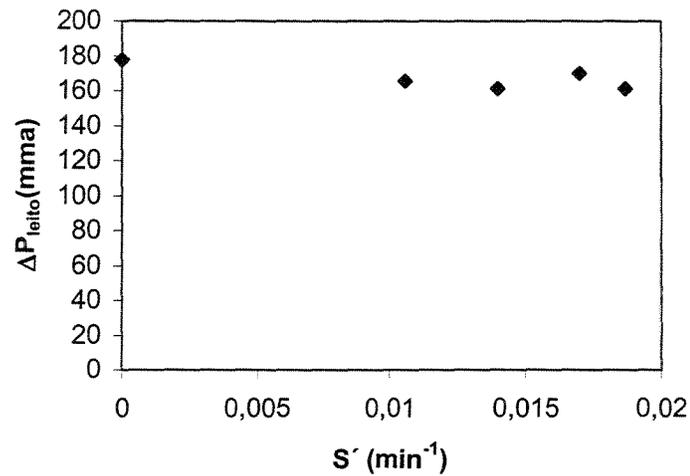


Figura 4.65:  $\Delta P_{\text{leito}}$  em função de  $S'$  para a esfera de vidro.

Na Figura 4.66, verifica-se uma tendência decrescente da queda de pressão do leito com o aumento do grau de saturação do leito de placebos, como também verificado para as demais partículas.

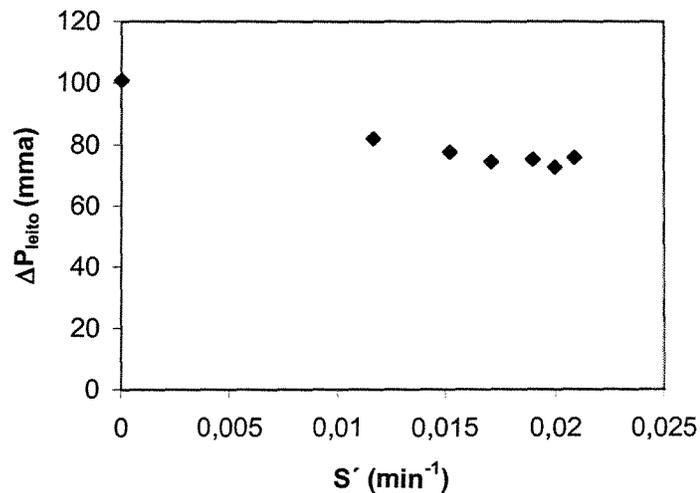


Figura 4.66:  $\Delta P_{\text{leito}}$  em função de  $S'$  para o placebo.

As Figuras 4.67, 4.68 e 4.69 apresentam a variação da velocidade média de circulação das partículas no ânulo durante o recobrimento com o aumento do grau de saturação do leito para as três partículas estudadas. Para o ABS (Figura 4.67), a velocidade de circulação das partículas decresce sensivelmente no leito úmido se comparado a do leito seco. Para os ensaios com recobrimento, o aumento do grau de saturação reduz a velocidade de circulação das partículas. Esta tendência decrescente da velocidade também foi verificada para a esfera de vidro (Figura 4.68) e para o placebo (Figura 4.69).

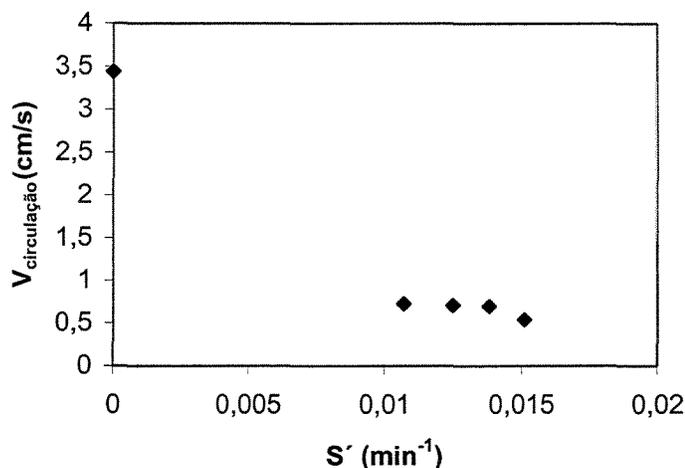


Figura 4.67:  $V_{\text{circulação}}$  em função de  $S'$  para o ABS.

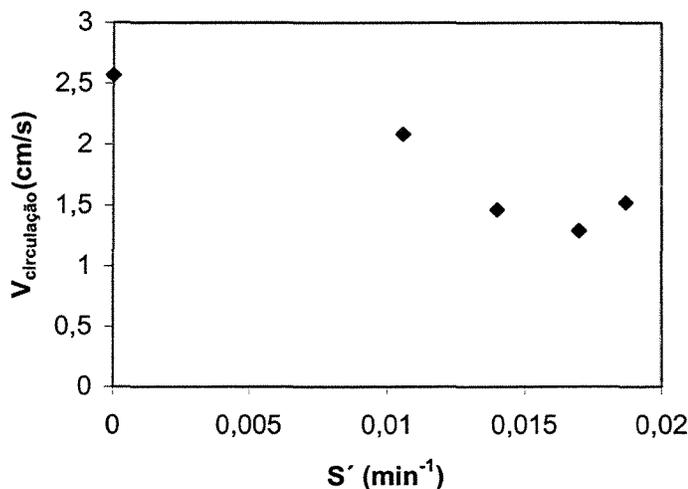


Figura 4.68:  $V_{\text{circulação}}$  em função de  $S'$  para a esfera de vidro.

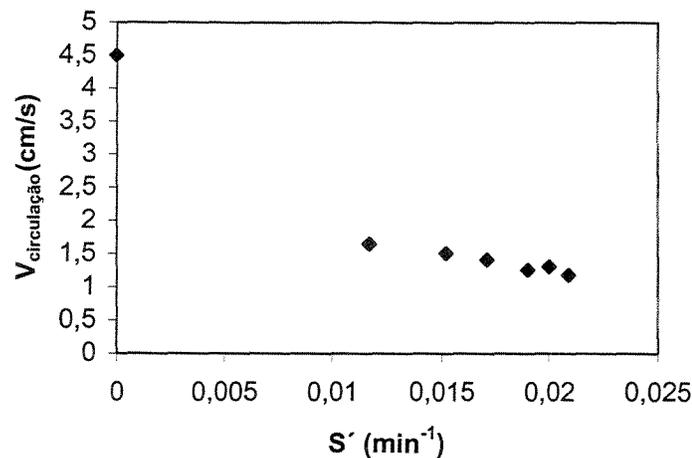


Figura 4.69:  $V_{\text{circulação}}$  em função de  $S'$  para o placebo.

A partir do estudo fluidodinâmico destas três partículas em função da saturação do leito, pode-se concluir que:

- Para a altura da fonte, verificou-se que o aumento da mesma está relacionado com o aumento de instabilidade do leito.
- Para a queda de pressão do leito durante o recobrimento, verificou-se uma tendência decrescente deste parâmetro com o aumento do grau de saturação do leito em virtude da maior instabilidade do leito nesta condição.
- Para a velocidade de circulação das partículas no ânulo durante o recobrimento, verificou-se uma redução da mesma com o aumento do grau de saturação. O aumento da umidade no leito torna as partículas mais pesadas, o que reduz a sua mobilidade no interior do leito, além do aumento das forças interpartículas, dentre elas a força de coesão entre partículas de um aglomerado. O leito de esferas de vidro foi o que mais suportou o aumento de umidade, apresentando uma redução de apenas 25% da velocidade de circulação das partículas em leito úmido ( $S^{-1} = 0,0106 \text{ min}^{-1}$ ) em relação ao leito seco. Isto deve estar relacionado aos baixos ângulos de repouso e de contato e à elevada densidade da partícula. Além disso, o leito de esferas apresenta um menor atrito entre as partículas em razão de sua forma geométrica.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES

#### 5.1. Conclusões

Baseado nos resultados apresentados neste trabalho pode-se concluir que:

- A determinação da densidade aparente de partículas com baixa porosidade como polímeros e esferas de vidro por picnometria fornece resultados consistentes se comparados aos obtidos por porosimetria de mercúrio.
- Partículas que apresentam um elevado ângulo de contato da suspensão (a partir de 80°) como o polipropileno, o polietileno de baixa densidade e o poliestireno não são recobertas pela suspensão de HEC utilizada neste estudo, de forma que esta é seca e todo o pó, elutriado, não havendo, portanto, a adesão da suspensão sobre a superfície da partícula.
- As curvas fluidodinâmicas a seco obtidas apresentam perfis típicos aos encontrados na literatura.
- A vazão de jorro mínimo determinada visualmente pelo desaparecimento da fonte é sempre maior ou igual à vazão de jorro mínimo obtida a partir da curva característica para as partículas estudadas. A vazão de jorro mínimo é melhor determinada a partir do acompanhamento da altura do ânulo.
- Partículas com densidade superior à 1100 kg/m<sup>3</sup> e ângulo de repouso superior à 40° apresentaram uma diferença significativa entre as velocidades de jorro mínimo obtidas pela curva fluidodinâmica característica e pela altura do ânulo.
- As pressões de atomização de 10 e 20 psig não influenciaram no valor da velocidade de jorro mínimo obtido para as partículas testadas. Verificou-se uma variação no comportamento fluidodinâmico para a pressão de 30 psig.

- Verificou-se uma redução da queda de pressão de jorro estável com o aumento de umidade no interior do leito para as partículas testadas.
- A queda de pressão de jorro estável em leito seco é superior à da do leito úmido, sendo que esta diferença é mais significativa nas partículas com densidade próximas à  $1100 \text{ kg/m}^3$ .
- Problemas observados durante o recobrimento tais como o colapso do leito e o entupimento do bico atomizador podem ser verificados através do acompanhamento da curva de umidade do ar de saída.
- Uma superfície mais plana da partícula reduz o atrito sofrido pela mesma durante o recobrimento resultando na formação de um filme mais homogêneo.
- O aumento na altura da fonte representa instabilidade do regime de jorro.
- A adição de suspensão influencia no comportamento do leito, podendo reduzir a velocidade de jorro mínimo em relação à do leito seco.
- A velocidade de circulação das partículas no ânulo decresce com o aumento de umidade no interior do leito, mantendo-se todas as condições operacionais durante o processo.
- O tempo de processo em que ocorre a estabilização da velocidade de circulação das partículas no ânulo, da umidade de saída do ar e da queda de pressão do leito coincide. Sugere-se, portanto, o acompanhamento da queda de pressão do leito e/ou da umidade de saída do ar como parâmetro de controle indicando o momento em que o leito atinge o regime de jorro estável.
- A esfera de vidro, o ABS<sup>®</sup> e o placebo são recobertos pela suspensão de HEC, apresentando valores satisfatórios de eficiência nas condições analisadas. O desgaste sofrido pelo placebo durante o recobrimento prejudicou a determinação do crescimento do filme e da eficiência do processo para esta partícula.
- A máxima vazão de suspensão alimentada foi determinada para as partículas ABS<sup>®</sup>, esfera de vidro e placebo, as quais apresentam um recobrimento tipo filme. O intervalo no

qual se encontra a máxima vazão de suspensão determinada para cada partícula em ml/min é de:

$$\text{ABS: } 12,0 < W_{\text{susp},M} < 14,0$$

$$\text{Esfera: } 20,0 < W_{\text{susp},M} < 22,0$$

$$\text{Placebo: } 21,0 < W_{\text{susp},M} < 22,0$$

- O leito de esferas de vidro assim como o de placebos apresentaram maior capacidade para suportar um aumento na quantidade de suspensão alimentada. A elevada densidade da esfera e a alta porosidade inicial do placebo, além da boa escoabilidade e baixo ângulo de contato de ambas as partículas são fatores que influenciaram no desempenho do processo.
- O aumento do grau de saturação do leito acarreta em instabilidade do mesmo.
- A queda de pressão do leito decresce com o aumento de grau de saturação do leito.
- A velocidade de circulação das partículas no ânulo é menor quanto maior for o grau de saturação do leito em virtude da menor mobilidade das mesmas no interior do leito, além do aumento das forças interpartículas.
- Propriedades físicas que influenciam no recobrimento:
  - ângulo de contato: o baixo ângulo de contato representa a maior adesão da suspensão pela partícula.
  - ângulo de repouso: o baixo ângulo de repouso indica a boa escoabilidade da partícula no leito, de forma que o aumento de umidade no leito inerente à atomização de suspensão não prejudica de forma significativa a circulação das partículas no ânulo.
  - densidade: partículas mais densas suportam uma maior vazão de suspensão alimentada sem apresentar sinais de instabilidade, proporcionando um maior crescimento do filme.

- forma: a forma geométrica da partícula tem influência significativa na eficiência do processo. Partículas com superfície mais uniforme e arredondada apresentam uma maior eficiência de recobrimento.
- porosidade: a porosidade da partícula permite que esta absorva a suspensão atomizada, sem que a circulação seja prejudicada.

## 5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Dando continuidade ao estudo fluidodinâmico das partículas durante o recobrimento em leito de jorro, têm-se as seguintes sugestões para futuros trabalhos:

- Utilização de outras suspensões poliméricas de recobrimento, variando-se as formulações quanto à densidade, tensão superficial, reologia e molhabilidade com o sólido (ângulo de contato), a fim de se estudar a influência destas propriedades na fluidodinâmica do leito.
- Correlacionar as propriedades das partículas e das suspensões com o grau de saturação do leito no decorrer do tempo, com a eficiência do processo e com o crescimento do filme recoberto.
- Estabelecer um valor limite para o produto da tensão superficial da suspensão e do cosseno do ângulo de contato (PONT *et al*, 2001), a partir do qual pode-se determinar se a partícula será recoberta pela suspensão a ser utilizada e se o processo terá uma eficiência satisfatória.
- Estudar o mecanismo de adesão entre a gota atomizada e a superfície do sólido, além de todas as forças de ligação interpartículas envolvidas no recobrimento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, C. Recobrimento de sementes de brócolos em leito de jorro e leito fluidizado. Tese de Doutorado. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, 2002.
- ATAÍDE, C. H. Estudo do recobrimento de comprimidos em leito de jorro e jorro-fluidizado. Tese de Doutorado. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, p. 188, 1996.
- AYUB, G. E.. Recobrimento de comprimidos em leito de jorro bidimensional: Análise do crescimento e transferência de calor gás-partícula. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, 1993.
- AYUB, G. E.. Recobrimento de uréia com enxofre em leito de jorro bidimensional. Tese de Doutorado. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, 1997.
- BARRET, N.; FANE, A. Drying of liquid material in a spouted bed. In: MUJUMDAR, A. S. and ROQUES, M. A. Drying' 89. Hemisphere Publishing Corporation, New York, p. 415-420, 1990.
- BECKER, H. A. An investigation of laws governing the spouting of coarse particles. Chem. Eng. Sci. 13, 245, 1961. apud MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. Spouted Beds. Academic Press, 1974.
- BERRUTI, F.; MUIR, J. R. and BEHIE, L. A. Solids circulation in a spout-fluid bed with draft tube. Can. J. Chem. Eng. vol 66, p. 919-923, 1988.
- CASTELLAN, G. Fundamentos de Físico-Química. Editora LTC, p. 441-446, Rio de Janeiro - RJ, 1996.
- CUNHA, F. O.; SPITZNER NETO, P. I. e FREIRE, J. T. Estudo da influência da alimentação de pasta na velocidade mínima de jorro. Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, p.195-202, Gráfica da EPUSP, São Paulo - SP, 1999.
- CUNHA, F. O.; SPITZNER NETO, P. I. e FREIRE, J. T. Estudo da secagem de pastas: Influência da presença da pasta. Anais do XXVI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, p.323-329, Gráfica da UFRRJ, Rio de Janeiro - RJ, 1998.
- CUNHA, F. O. Contribuições à análise da secagem de pastas em leito de jorro com partículas inertes. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos - SP, 1999.
- CUNHA, R. L.; MAIALLE, K. G.; MENEGALLI, F. C. Evaluation of the drying process in spouted bed and spouted fluidized bed of xanthan gum; focus on product quality. Powder Technology, vol. 107, n° 3, p. 234-242, 2000.

DONIDA, M. W. Recobrimento polimérico de uréia em leito de jorro bidimensional. Dissertação de Mestrado, Campinas: Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, 2000.

ELPERIN, I. T.; YEFRENTSEV, V. S.; DOLIDOVICH, A. F. The effect of velocity pulsations on the interfacial heat transfer and structure of a spouting bed. *Heat Transfer Sov. Res.*, vol. 1, p. 23-28, 1969. apud PIANAROSA, D. L.; FREITAS, L. A. P.; LIM, C. J.; GRACE, J. R. and DOGAN, O. M.. Voidage and particle velocity profiles in a spout-fluid bed. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 78, nº 1, p. 132-142, 2000.

EPSTEIN, N.; GRACE, J. R. Spouting of particulate solids. In L. Otten, & M. E. Fayed (Eds.), *Handbook of powder science and technology*, New York: Van Nostrand Reinhold (Chapter 11), 1984. apud OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M. J.; IZQUIERDO, M. A.; DE SALAZAR, A. O.. Effect of operating conditions on solids velocity in the spout, annulus and fountain of spouted beds. *Chemical Engineering Science*, vol. 56, nº 11, p. 3585-3594, 2001.

FREIRE, J. T. Secagem de pastas em leito de jorro. Em FREIRE, J. T.; SARTORI, D. J. M (Ed.) *Tópicos especiais em secagem*. Gráfica da UFSCar, São Carlos, p. 41-85, 1992.

FREITAS, L. A. P.; FREIRE, J. T. Experimental study on the dynamics of a spouted bed with particle feed through the base. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 14, nº 3, p. 260-280, Sep 1997.

FREITAS, L. A. P.; FREIRE, J. T.. Analysis of the fluid dynamics in a spouted bed with continuous solids feeding. *Proceedings of the Inter-American Drying Conference (IADC)*, Itu-SP, Brazil, Vol. A, p. 173-180, Jul 1997.

GELDART, D. "Gas fluidization technology", John Wiley & Sons, Inc. New York, 1986.

GHOSH, B. A study on a spouted bed - A theoretical analysis. *Indian Chem. Engr.* 7, 16, 1965. apud MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. *Spouted Beds*. Academic Press, 1974.

GLICKSMAN, L. R. Scaling relationships for fluidized beds. *Chemical Engineering Science*, vol. 39, p. 1373-1379, 1984. apud HE, Y. L.; LIM, C. J.; GRACE, J. R.. Scale-up studies of spouted beds. *Chem. Eng. Sci.*, vol. 52, nº 2, p. 329-339, 1997.

GOLTSIKER, A. D.. PhD Thesis, Lensovet Technol. Instit., Leningrad, U. S. S. R. , 1967. apud PIANAROSA, D. L.; FREITAS, L. A. P.; LIM, C. J.; GRACE, J. R. and DOGAN, O. M. Voidage and particle velocity profiles in a spout-fluid bed. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 78, nº 1, p. 132-142, 2000.

GRBAVCIC, Z. B.; VUKOVIC, D. V.; JOVANOVIC, S. Dj.; GARIC, R. V.; HADZISMAJLOVIC, Dz. E.; LITTMAN, H. and MORGAN, M. H. III. Fluid flow pattern and solids circulation rate in a liquid phase spout-fluid bed with draft tube. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 70, nº 5, p. 895-904, Oct 1992.

GRBAVCIC, Z. B.; VUKOVIC, D. V.; JOVANOVIC, S. Dj.; GARIC, R. V.; HADZISMAJLOVIC, Dz. E.; LITTMAN, H. and MORGAN, M. H. III. Hydrodynamics of vertical liquid-solids flow. *Powder Technol.*, 1991a.

HAJI-ZAINALI, M. Solids size reduction in a spouted bed. B. A. Sc. Thesis, Univ. of Brit. Columbia. Vancouver. Can., 1970. apud MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. *Spouted Beds*. Academic Press, 1974.

HATTORI, H.; NAGAI, T.; OHSHIMA, Y.; YOSHIDA, M. and NAGATA, A. Solids circulation rate in screen-bottomed spouted bed with draft-tube. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, vol. 31, nº 4, p. 633-635, Aug 1998.

HE, Y. L.; LIM, C. J.; GRACE, J. R. Scale-up studies of spouted beds. *Chem. Eng. Sci.*, vol. 52, nº 2, p. 329-339, 1997.

IJICHI, K.; TANAKA, Y.; UEMURA, Y.; HATATE, Y. and YOSHIDA, K. Solids-circulation rate and holdup in the draft tube of a spouted bed. *International Chemical Engineering*, vol. 34, nº 3, p. 370-376, July 1994.

KACHAN, G. C. e CHIAPPETA, E. Desidratação da pasta de tomate em um secador de leite de jorro. *Anais do VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, COBEQ, São Paulo*, vol. 2, p.510-523, 1988.

KALWAR, M. I.; RAGHAVAN, G. S. V. and MUJUMDAR, A. S. Circulation of particles in two-dimensional spouted beds with draft plates. *Powder Technology*, vol. 77, nº 3, p. 233-242, Dec 1993.

KUCHARSKI, J. e KMIÉC, A. Hydrodynamics heat and mass transfer during coating of tablets in a spouted bed – *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 61, pp.435-439, 1983.

KUCHARSKI, J. e KMIÉC, A. The effect of process parameters on mass distributions and the efficiency of tablets coatings in a spouted bed – *Drying'88*, vol. II, pp.27-31, 1988.

KUCHARSKI, J. e KMIÉC, A. Heat and mass transfer during coating of tablets in a spouted bed – Apresentado no 3<sup>rd</sup> International Symposium in Spouted Beds, Vancouver, Canadá, 1991.

MANURUNG, F. Studies in the spouted bed technique with particular reference to low temperature coal carbonization. Ph. D. thesis, Univ. of New South Wales, Kensington, Australia, 1964. apud MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. *Spouted Beds*. Academic Press, 1974.

MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. *Spouted Beds*. Academic Press, 1974.

MATHUR, K. B.; GISHLER, P. E. A study of the application of the spouted bed technique to wheat drying. *J. Appl. Chem.* 5. 624 ,1955. apud MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. *Spouted Beds*. Academic Press, 1974.

- MEDEIROS, M. F. D. Influência das propriedades dos materiais na secagem de polpas de frutas em leito de jorro. Tese de Doutorado, Campinas: Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, 2001.
- MIKHAILIK, V. D. e ANTANISHIN, M. V. The speed of particles and voidages in the core of the spouted bed. *Vesti Akad. Nauk. B. S. S. R., Minsk Ser. Fiz. Takhn. Nauk.* 3,81-86, 1967. apud PIANAROSA, D. L.; FREITAS, L. A. P.; LIM, C. J.; GRACE, J. R. and DOGAN, O. M.. Voidage and particle velocity profiles in a spout-fluid bed. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 78, n° 1, p. 132-142, 2000.
- NÉMETH, J.; PALLAI, I. Spouted bed technique and its application. *Maggy. Kem. Lapja.* 25. 74, 1970. apud MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. Spouted Beds. Academic Press, 1974.
- OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M. J. ; IZQUIERDO, M. A.; DE SALAZAR, A. O. Effect of operating conditions on solids velocity in the spout, annulus and fountain of spouted beds. *Chemical Engineering Science*, vol. 56, n° 11, p. 3585-3594, 2001.
- OLIVEIRA, W. P. Estudo de secagem de pastas em leito de jorro cônico. Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos - SP, 1996.
- OWER, E. E PANKHURST, R. C. The Measurement of Air. Pergamon Presse, 5 ed., p. 362, 1977.
- PASSOS, M. L.; MASSARANI, G. Análise das forças coesivas interpartículas em Leitos Fluidizados. *Anais do XXVIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*, p.141-148, Gráfica da UFRJ, Rio de Janeiro - RJ, 2000.
- PASSOS, M. L.; MUJUMDAR, A. S. Effect of cohesive forces on fluidized and spouted beds of wet particles. *Powder Technol.*, vol 110, n° 3, p. 222-238, 2000.
- PASSOS, M. L.; MUJUMDAR, A. S.; RAGHAVAN, G. S. V. Spouting and spout-fluidization of dry-wet particles in a two dimensional bed, in: MUJUMDAR, A. S. (Ed.), *Drying of solids*, Sarita Prakashan, New Delhi, p. 211-220, 1990.
- PATEL, K.; BRIDGMATER, J.; BAKER, C. G. J. and SCHNEIDER, T. Spouting behaviour of wet solids. In: MUJUMDAR, A. S. and ROQUES, M. A. *Drying' 86*. Hemisphere Publishing Corporation, New York, p. 183-189, 1986.
- PEÇANHA, R.P. e MASSARINI, G. Dimensão característica e forma de partículas – *Anais do XIV Encontro sobre Meios Porosos*, Campinas, 1986.
- PHAM, Q. T. Behaviour of a conical spouted-bed dryer for animal blood. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 61, n° 3, p. 426-434, 1983.
- PIANAROSA, D. L.; FREITAS, L. A. P.; LIM, C. J.; GRACE, J. R. and DOGAN, O. M. Voidage and particle velocity profiles in a spout-fluid bed. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 78, n° 1, p. 132-142, 2000.

- PONT, V.; STEINMETZ, D. and HÉMATI, M. Influence of the physicochemical properties on the growth of solids particles by granulation in fluidized bed. *Powder Technology*, vol. 120, p. 97-104, 2001.
- QUEIROZ FILHO, A. V. Análise do recobrimento de comprimidos em leito de jorro bidimensional para três posições de atomização de suspensão. Dissertação de Mestrado, Campinas: Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, p. 107, 1997.
- QUEIROZ FILHO, A. V., PICOCOLO, S.V. e ROCHA, S. C. S. Análise do recobrimento de comprimidos em leito de jorro bidimensional para três posições de atomização de suspensão. *Anais do XXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*, vol. 1, p. 87-92, 1996.
- RÉ, M. I., FREIRE, J. T. Drying of pastelike materials in spouted beds. *Anais of Sixth Drying Simposium. Versailles*, p. 426-431, 1988.
- RÉ, M. I., FREIRE, J. T. Secagem de sangue animal em leito de jorro. *Anais do XIV Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos- ENEMP*, Campinas, vol. 1, p.85-98, 1986.
- ROCHA, S. C. S. Recobrimento de partículas. *Notas particulares*, 2001.
- ROCHA, S. C. S. Recobrimento de Comprimidos. Em FREIRE, J. T.; SARTORI, D. J. M (Eds.) *Tópicos especiais em secagem. Gráfica da UFSCar, São Carlos*, p. 297-330, 1992.
- ROCHA, S. C. S. e TARANTO, O. P. Fluidodinâmica do leito de jorro bi-dimensional para partículas não esféricas. Apresentado no 9º Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Salvador, 1992.
- ROGER, E. O. et al., *J. Appl. Chem. USSSR.*, vol. 40, 2198 (1967). In: SCHNEIDER, T.; BRIDGWATER, J. Drying of solutions and suspensions in spouted beds. *Drying' 89*. In: MUJUMDAR, A. S. and ROQUES, M. A. *Drying' 86*. Hemisphere Publishing Corporation, New York, p. 421-425, 1990.
- RUMPF, H. *Methoden des Granulieren. Chemical Engineering Technology*, vol. 30, p.144, 1958.
- SANTANA, J. D. A. M.; CHARBEL, A. L. T.; PASSOS, M. L. and MASSARANI, G. Effect of interparticle forces on the spouted bed flow behaviour. *Proceedings of the Inter-American Drying Conference (IADC)*, Itu-SP, Brazil, Vol. A, p. 135-142, Jul 1997.
- SCHNEIDER, T.; BRIDGWATER, J. The stability of wet spouted beds. *Drying Technology*, vol 11, nº 2, p. 277-301, 1993.
- SCHNEIDER, T.; BRIDGWATER, J. Drying of solutions and suspensions in spouted beds. *Drying' 89*. In: MUJUMDAR, A. S. and ROQUES, M. A. *Drying' 86*. Hemisphere Publishing Corporation, New York, p. 421-425, 1990.

- SHELUKAR, S.; HO, J.; ZEGA, J.; ROLAND, E.; YEH, N.; QUIRAM, D. and NOLE, A. Identification and characterization of factors controlling tablet coating uniformity in a Wurster coating process. *Powder Technology*, vol. 110, nº 1, p. 29-36, 2000.
- SILVA, O. S.; ROCHA, S. C. S.; Analysis of the growth and agglomerate formation in the granules coating process. *Drying 2002. Proceedings of the 13th International Drying Symposium (IDS`2002)*, Beijing, China, vol. B, p. 1069-1078.
- SPITZNER NETO, P. I.. Estudo da secagem de pastas e da fluidodinâmica do leito de jorro na presença de pastas e líquidos. Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos –SP, 284p. (2001)
- SPITZNER NETO, P. I., FREIRE, J. T.. Estabilidade do leito de jorro na secagem de pastas. *XXIX Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*, São João Del Rei, 2001.
- SPITZNER NETO, P. I.; FREIRE, J. T. Medida do grau de saturação de pasta em um leito de jorro. *Anais do XXVIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*, p.149-156, Gráfica da UFRJ, Rio de Janeiro - RJ, 2000.
- SPITZNER NETO, P. I.; FREIRE, J. T. Análise da presença da pasta na secagem em leito de jorro. *Anais do XXV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*, p.520-525, Gráfica da UFSCar, São Carlos - SP, 1997.
- SULLIVAN, C.; BENKRID, A.; CARAM, H. Prediction of solids circulation patterns in a spouted bed. *Powder Technology*, vol. 53, nº 3, p. 257-271, 1987.
- TARANTO, O. P. , ROCHA, S. C. S. e RAGHAVAN, G. S. V. Recobrimento de partículas em leito de jorro bidimensional: crescimento e coeficiente de transferência de calor gás-partícula. *Anais do XXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*, vol 1, p.93-98, 1996.
- UEMAKI, O.; TSUJI, T. Particle velocity and solids circulation rate in a jet-spouted bed. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 70, nº 5, p. 925-929, Oct 1992.
- WEISS, P. J. e MEISEN, A. Laboratory Studies on Sulphur Coating Urea by the Spouted Bed Process. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 61, nº 3, p. 440-447, 1983.
- WERTHER, J. Measurement techniques in fluidized beds. *Powder Technology*, vol. 102, p. 15-36, 1999.

## ANEXO A

## ➤ Curvas Fluidodinâmicas a seco sem pressão de atomização

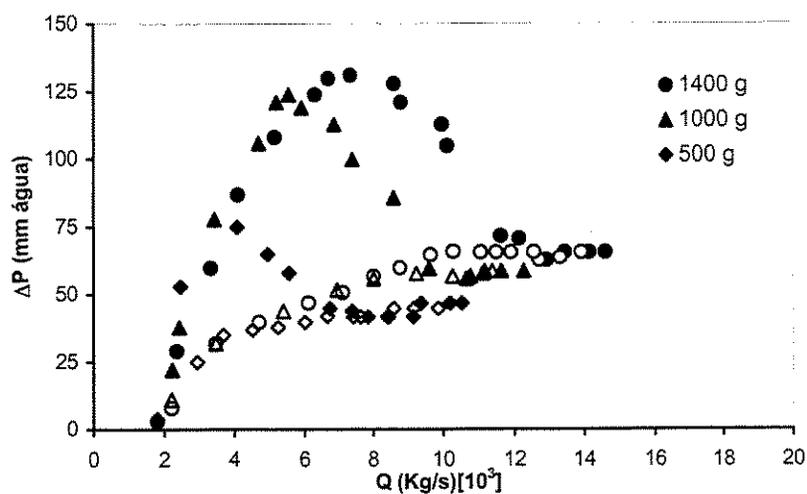
Curvas Fluidodinâmicas a seco para o ABS

Figura A.1.- Curva Fluidodinâmica a seco do ABS para as cargas mássicas de 500g, 1000g e 1400g.

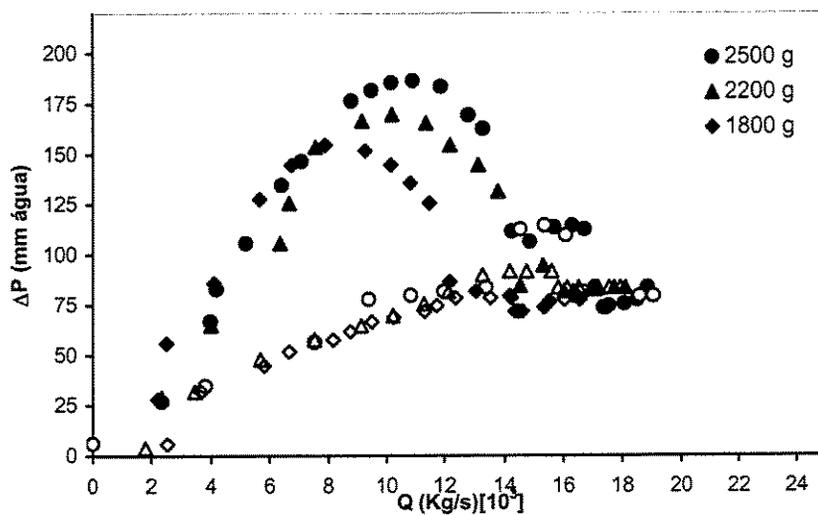


Figura A.2.- Curva Fluidodinâmica a seco do ABS para as cargas mássicas de 1800g, 2200g e 2500g.

Curvas Fluidodinâmicas a seco para o Poliestireno

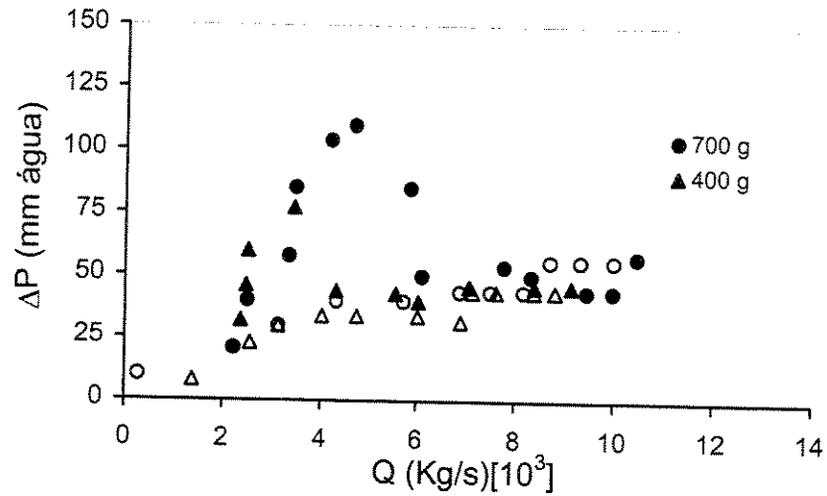


Figura A.3.- Curva Fluidodinâmica a seco do PS para as cargas mássicas de 400g e 700g.

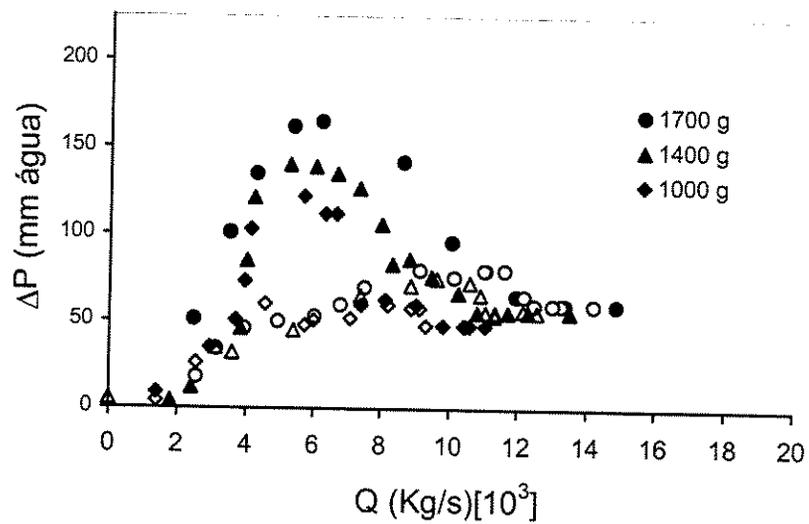


Figura A.4.- Curva Fluidodinâmica a seco do PS para as cargas mássicas de 1000g, 1400g e 1700g.

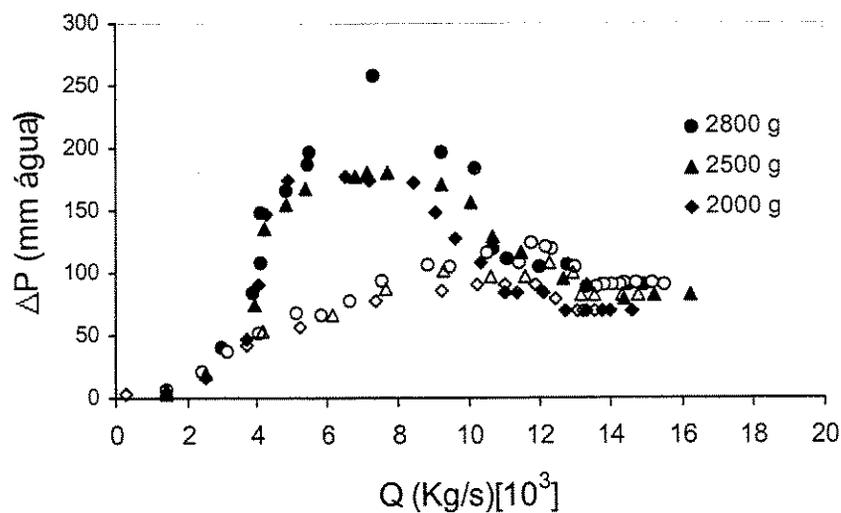


Figura A.5.- Curva Fluidodinâmica a seco do PS para as cargas mássicas de 2000g, 2500g e 2800g.

Curvas Fluidodinâmicas a seco para o Polietileno de baixa densidade

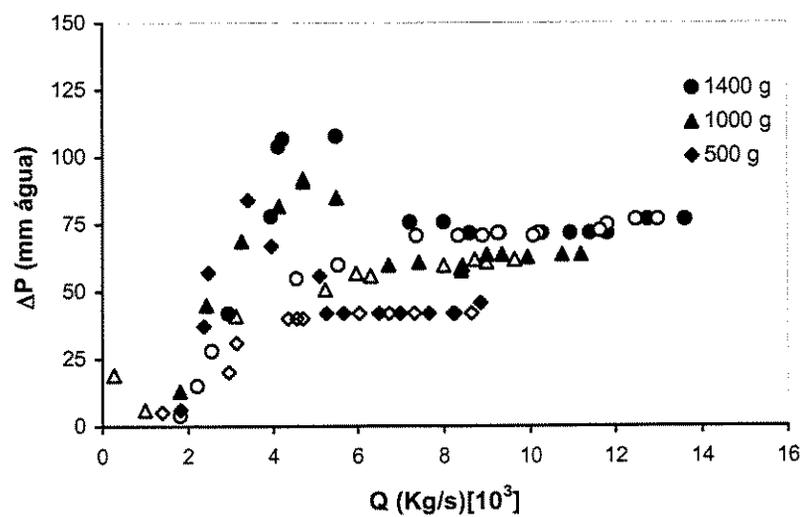


Figura A.6.- Curva Fluidodinâmica a seco do PEBD para as cargas mássicas de 500g, 1000g e 1400g.

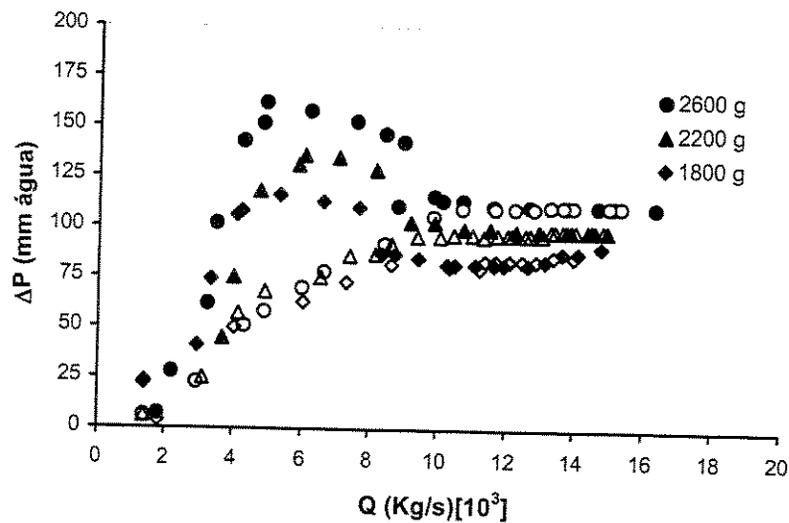


Figura A.7.- Curva Fluidodinâmica a seco do PEBD para as cargas mássicas de 1800g, 2200g e 2600g.

#### Curvas Fluidodinâmicas a seco para o Polipropileno

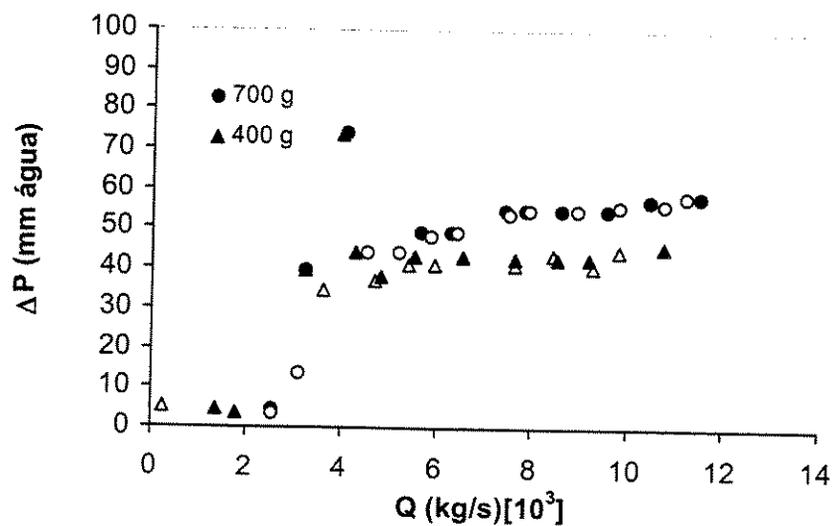


Figura A.8.- Curva Fluidodinâmica a seco do PP para as cargas mássicas de 400g e 700g.

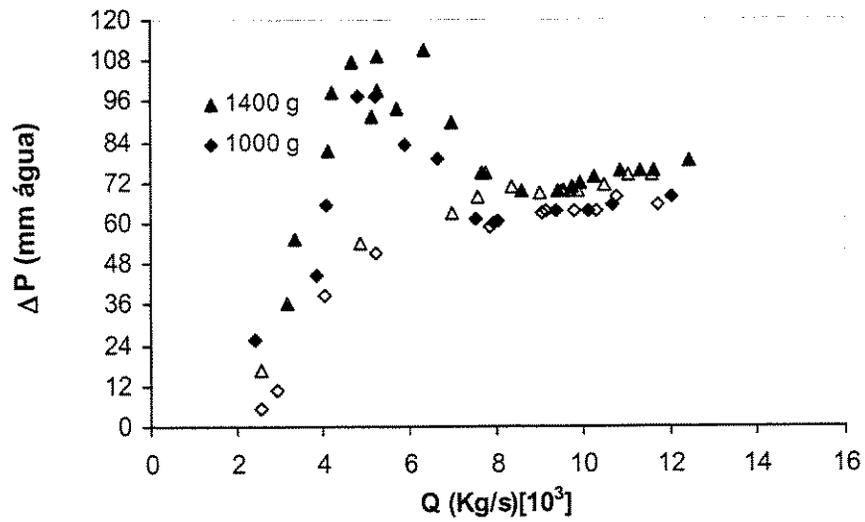


Figura A.9.- Curva Fluidodinâmica a seco do PP para as cargas mássicas de 1000g e 1400g.

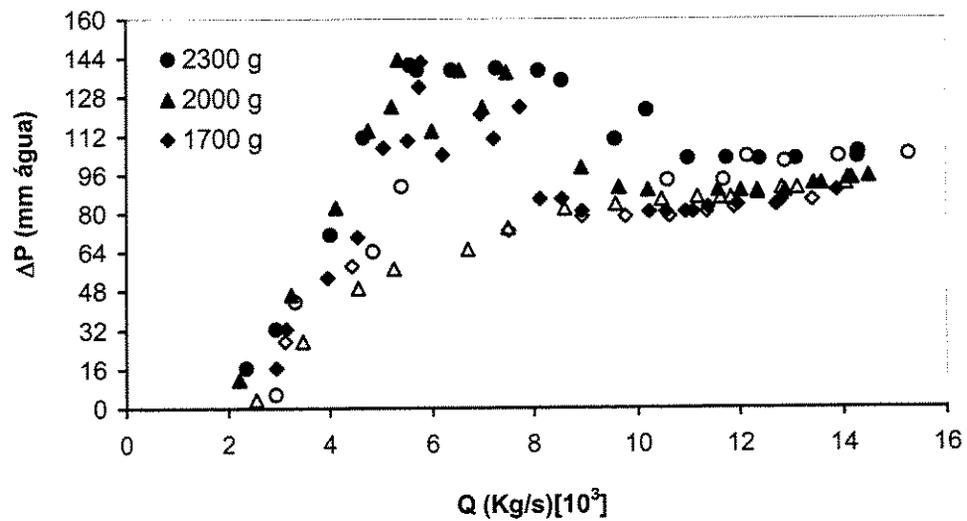


Figura A.10.- Curva Fluidodinâmica a seco do PP para as cargas mássicas de 1700g, 2000g e 2300g.

Curva Fluidodinâmica a seco para o Placebo

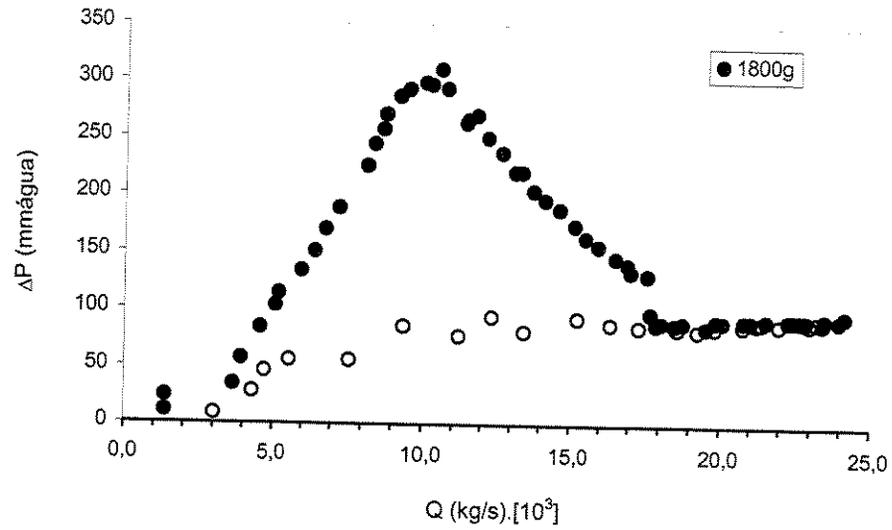


Figura A.11.- Curva Fluidodinâmica a seco do Placebo para a carga mássica de 1800g.

Curva Fluidodinâmica a seco para a Esfera de vidro

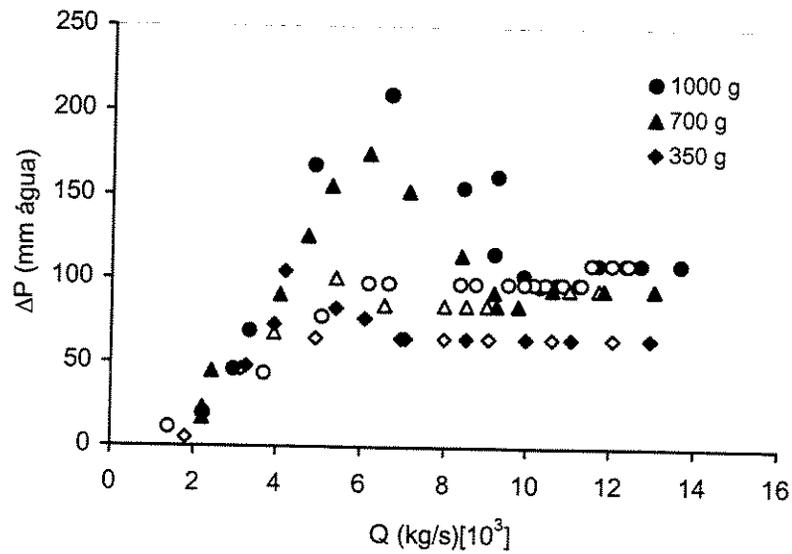


Figura A.12.- Curva Fluidodinâmica a seco da Esfera de vidro para as cargas mássicas de 350g, 700g e 1000g.

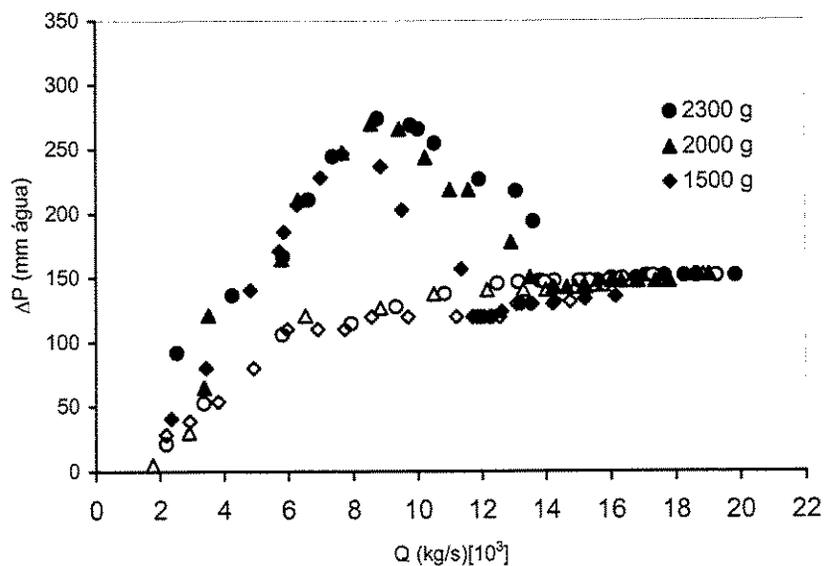


Figura A.13.- Curva Fluidodinâmica a seco da Esfera de vidro para as cargas mássicas de 1500g, 2000g e 2300g.

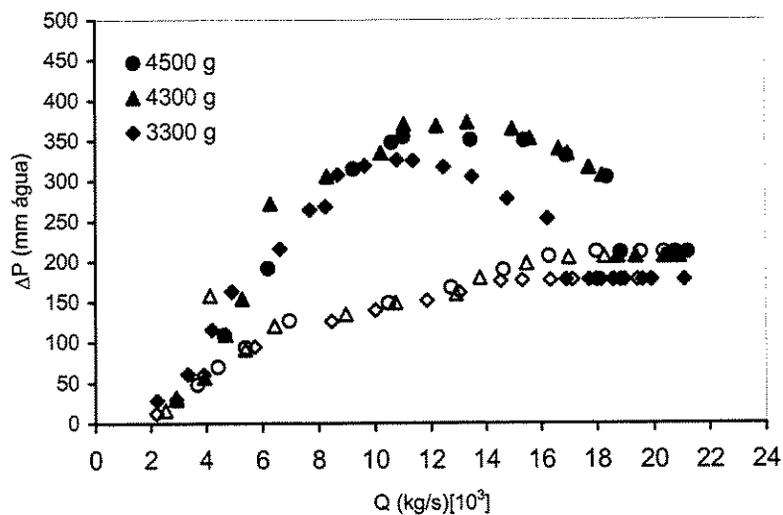


Figura A.14.- Curva Fluidodinâmica a seco da Esfera de vidro para as cargas mássicas de 3300g, 4300g e 4500g.

## ANEXO B

➤ Curvas Fluidodinâmicas a seco sem pressão de atomização

- ABS

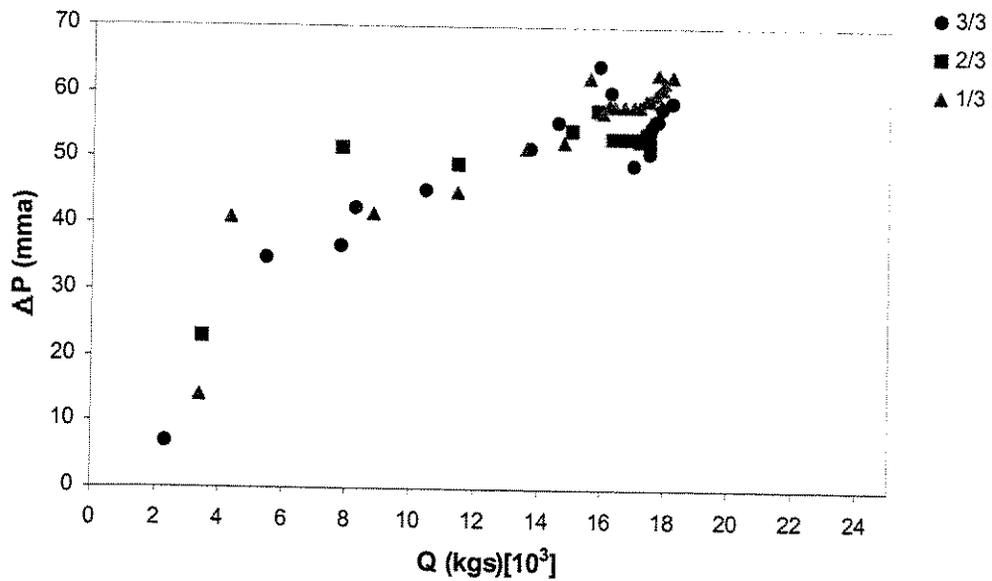


Figura B.1: Curva de queda de pressão do leito *versus* vazão de ar para o ABS.

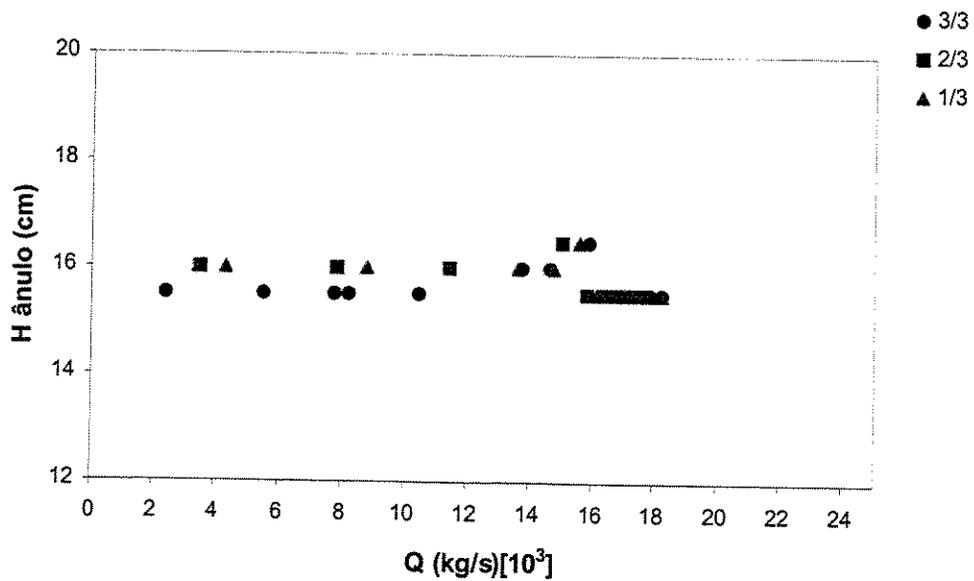


Figura B.2: Curva de altura do ânulo em leito seco para o ABS.

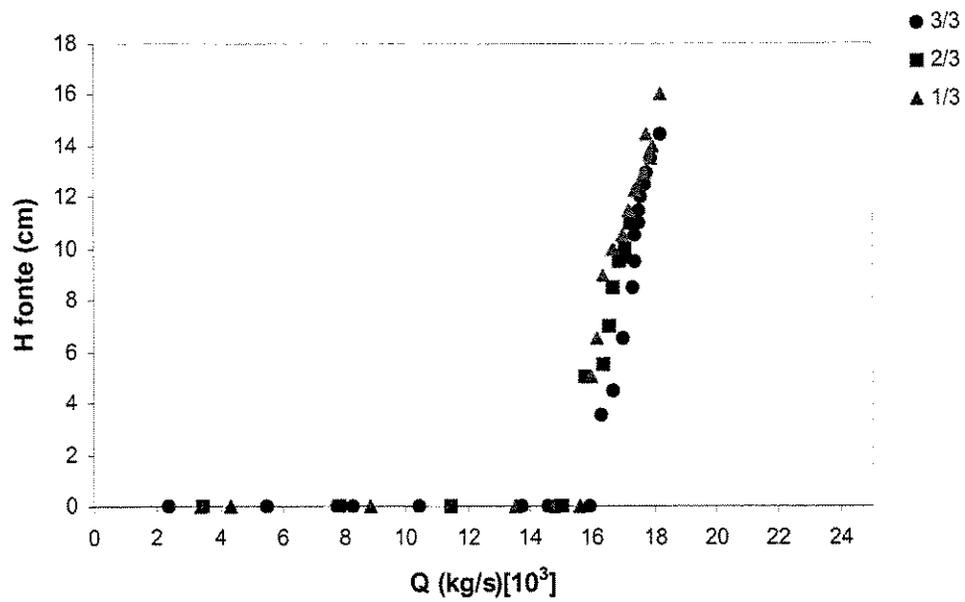


Figura B.3: Curva de altura de fonte *versus* vazão de ar para o ABS.

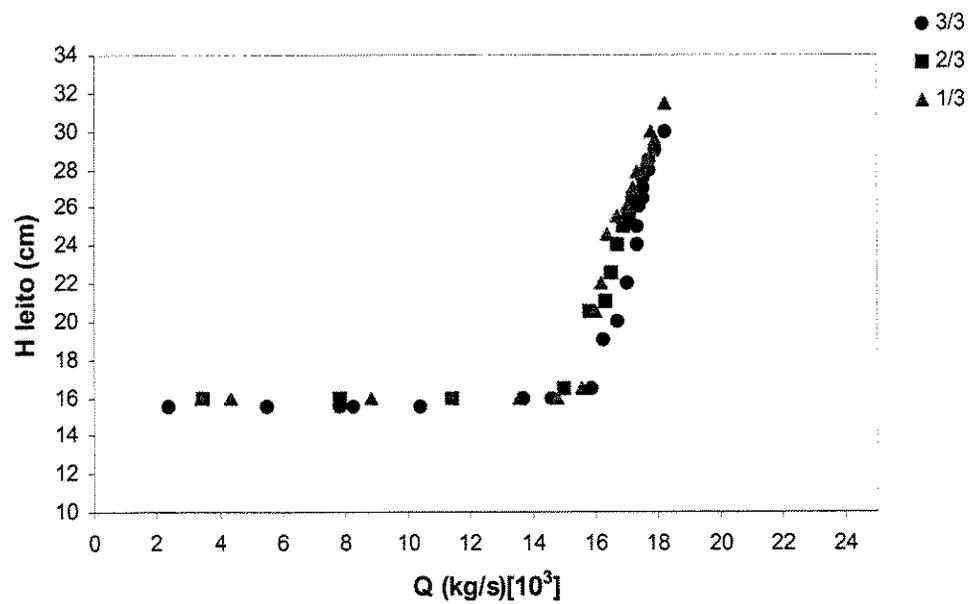


Figura B.4: Curva de altura de leito *versus* vazão de ar para o ABS.

- PS

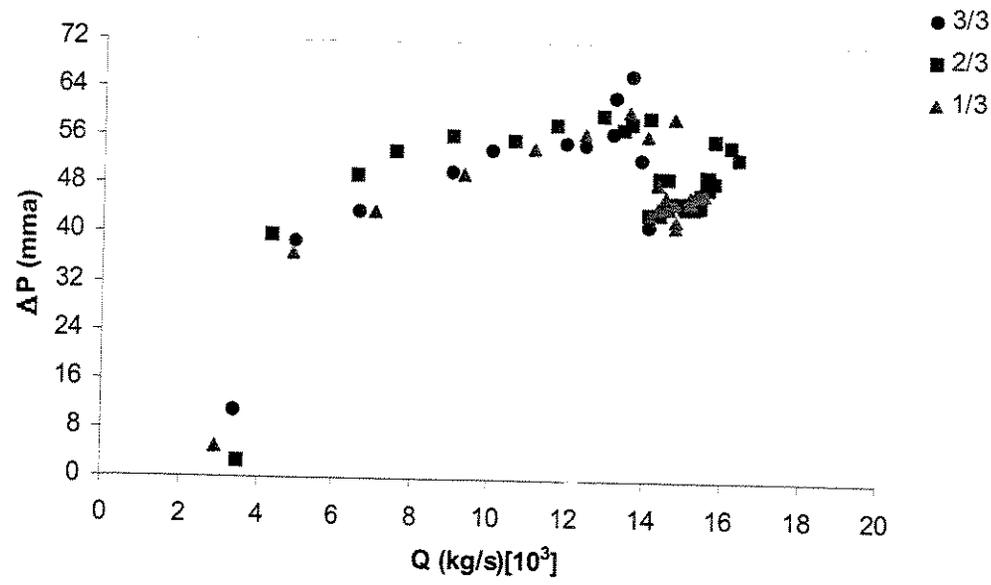


Figura B.5: Curva de queda de pressão do leito versus vazão de ar para o PS.

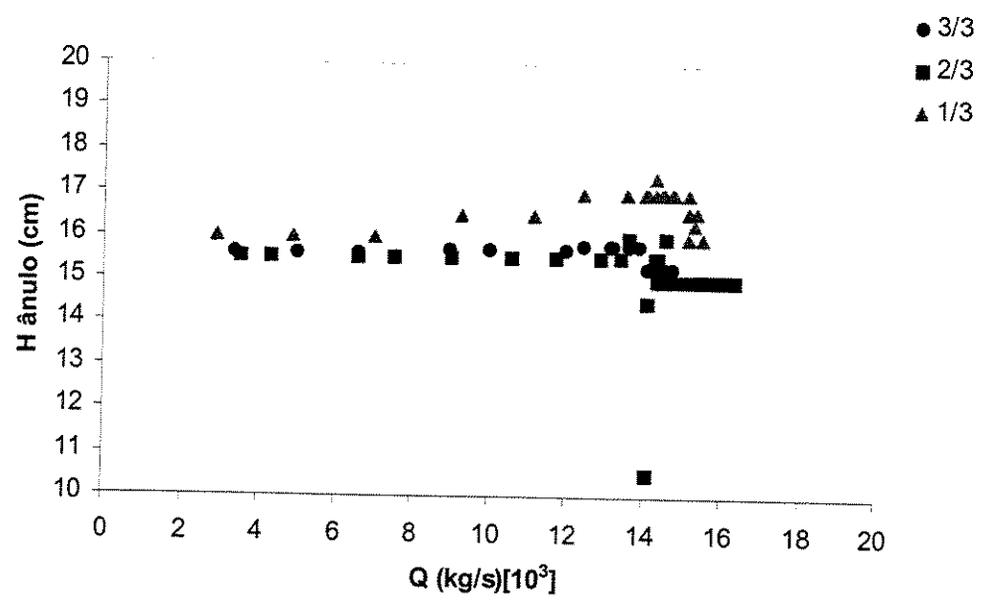


Figura B.6: Curva de altura do ânulo em leito seco para o PS.

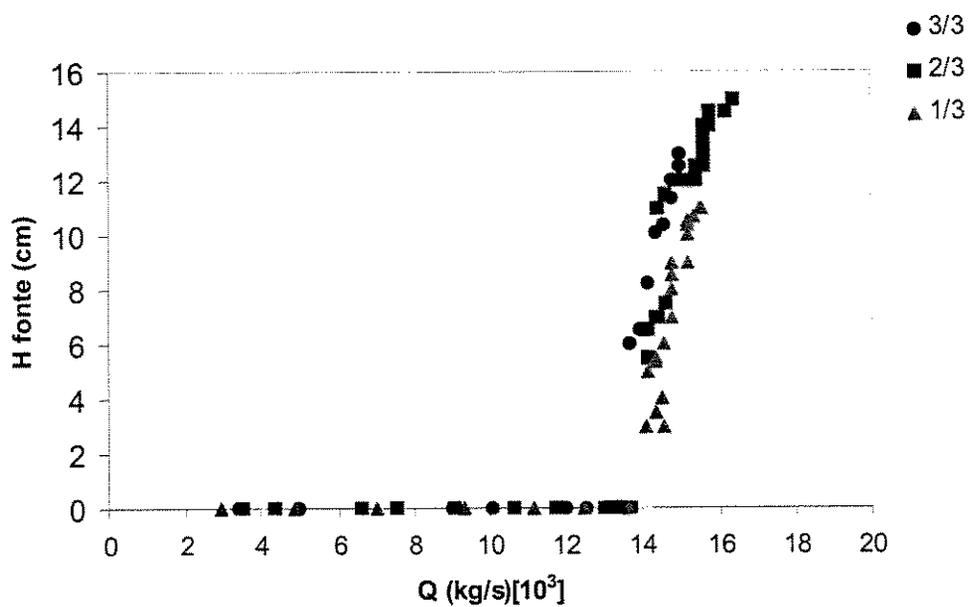


Figura B.7: Curva de altura de fonte *versus* vazão de ar para o PS.

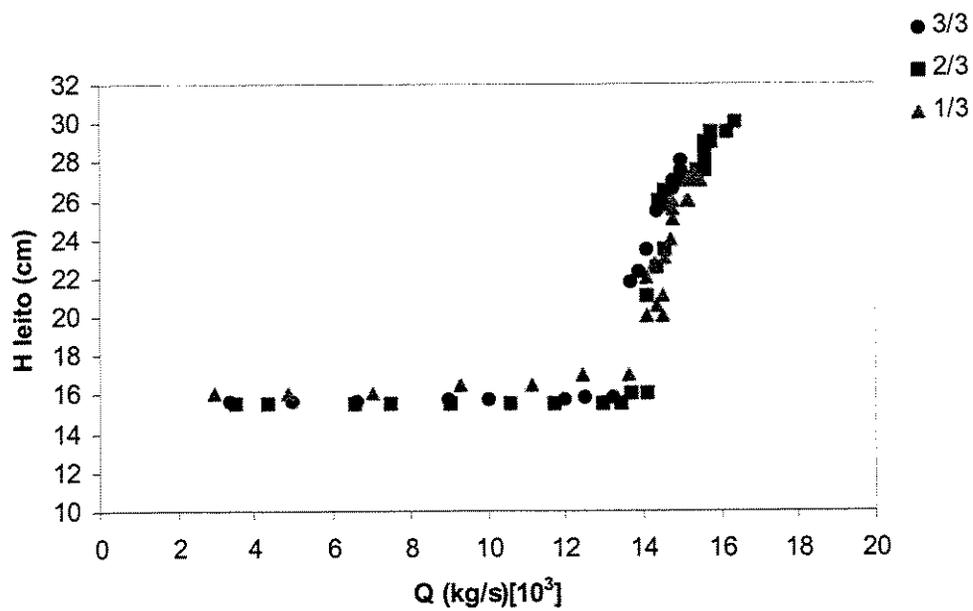


Figura B.8: Curva de altura de leito *versus* vazão de ar para o PS.

- PEBD

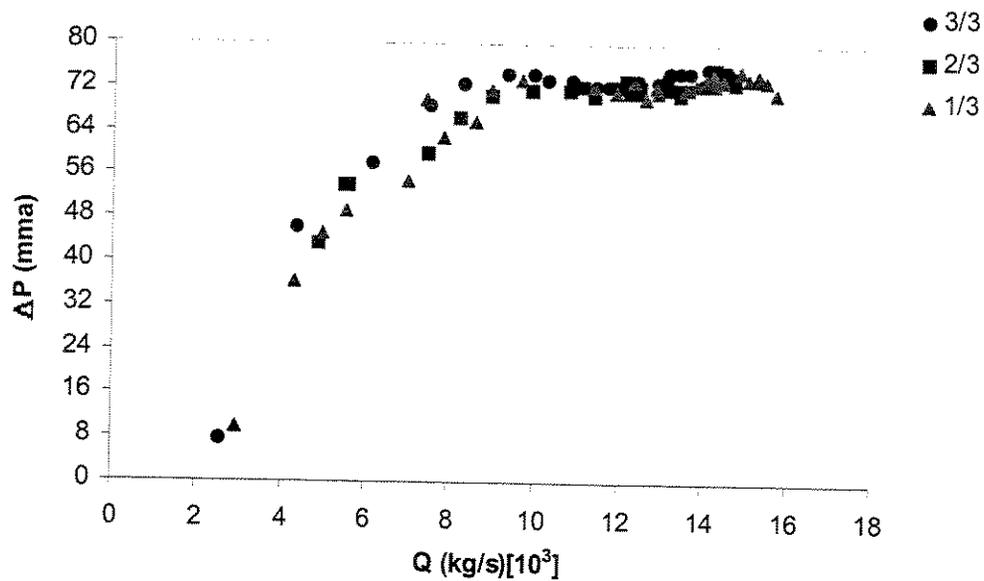


Figura B.9: Curva de queda de pressão do leito *versus* vazão de ar para o PEBD.

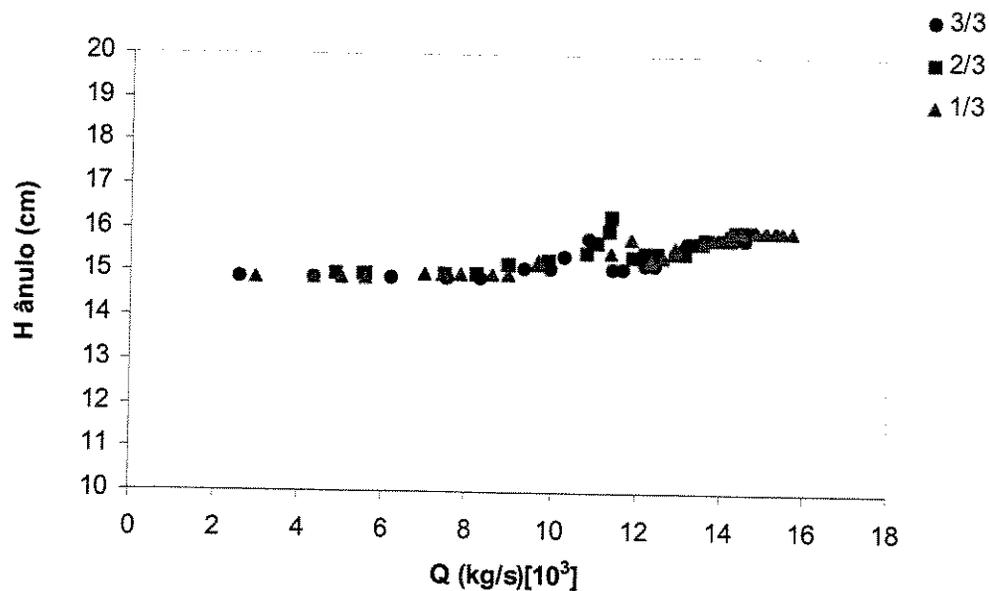


Figura B.10: Curva de altura do ânulo em leito seco para o PEBD.

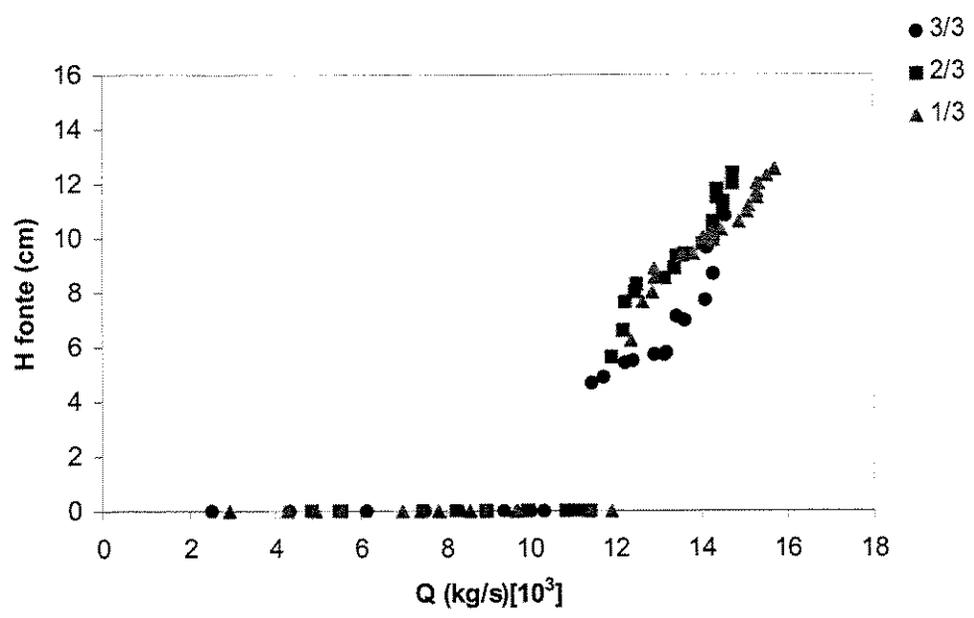


Figura B.11: Curva de altura de fonte *versus* vazão de ar para o PEBD.

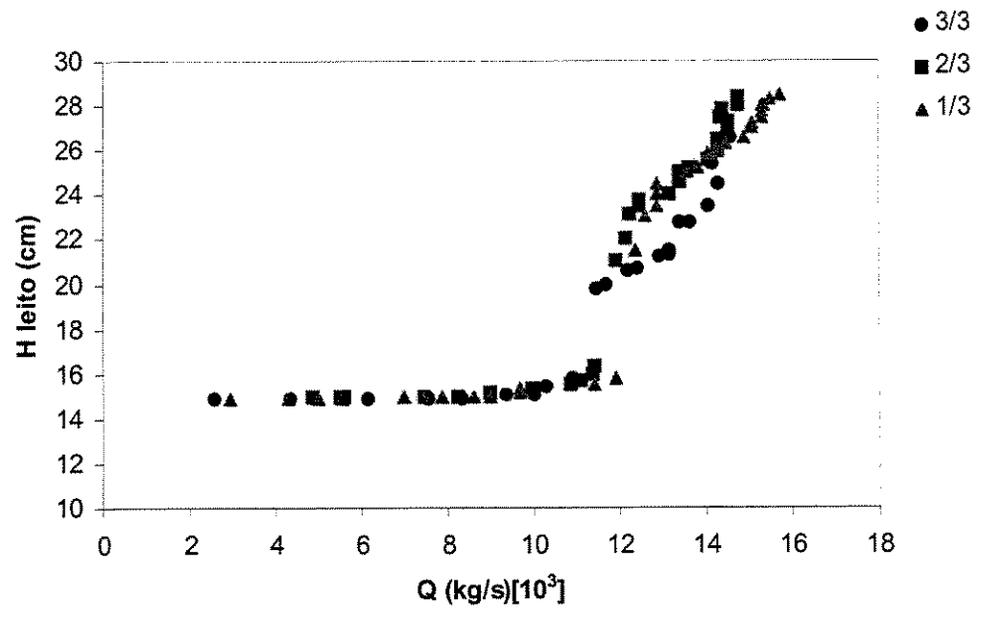


Figura B.12: Curva de altura de leito *versus* vazão de ar para o PEBD.

- PP

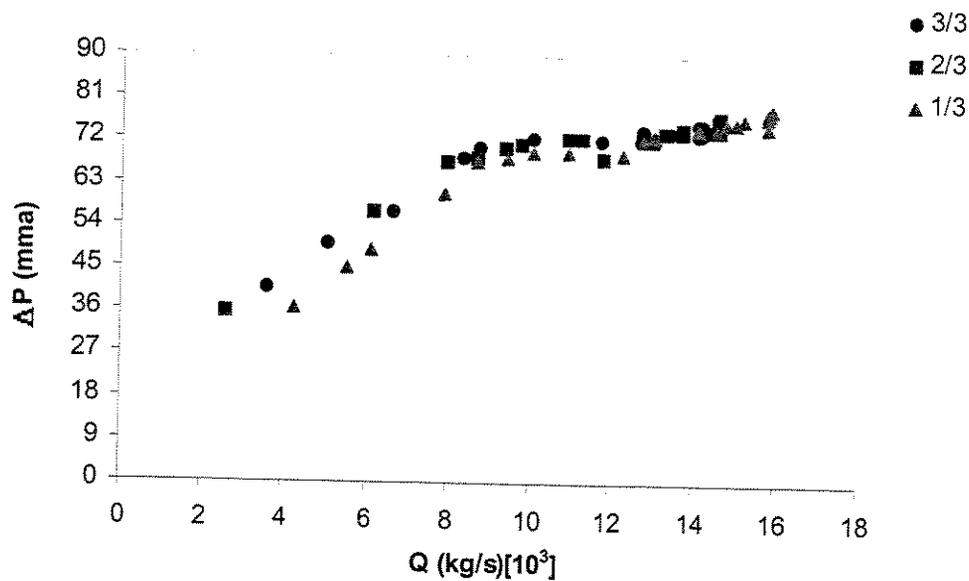


Figura B.13: Curva de queda de pressão do leito *versus* vazão de ar para o PP.

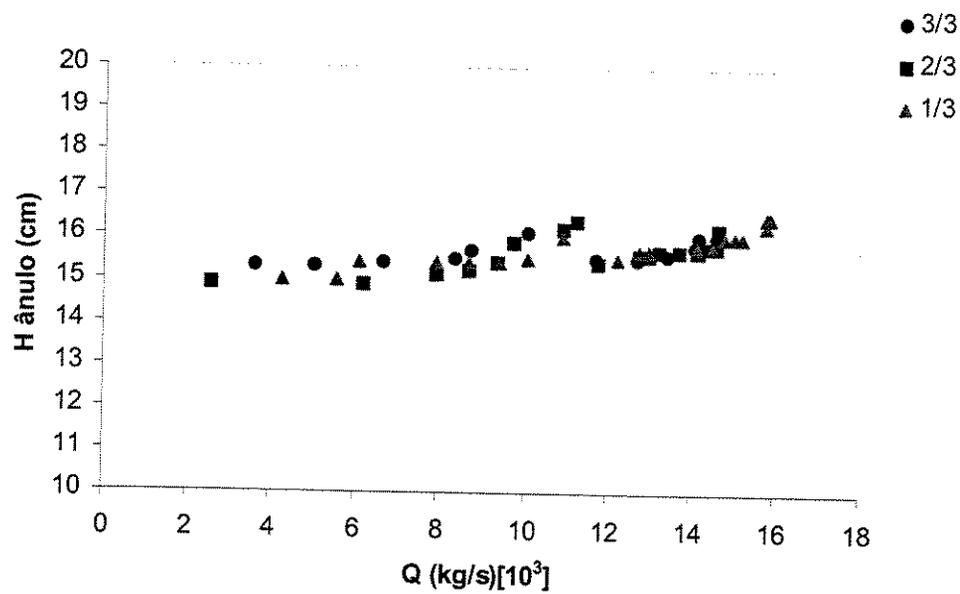


Figura B.14: Curva de altura do ânulo em leito seco para o PP.

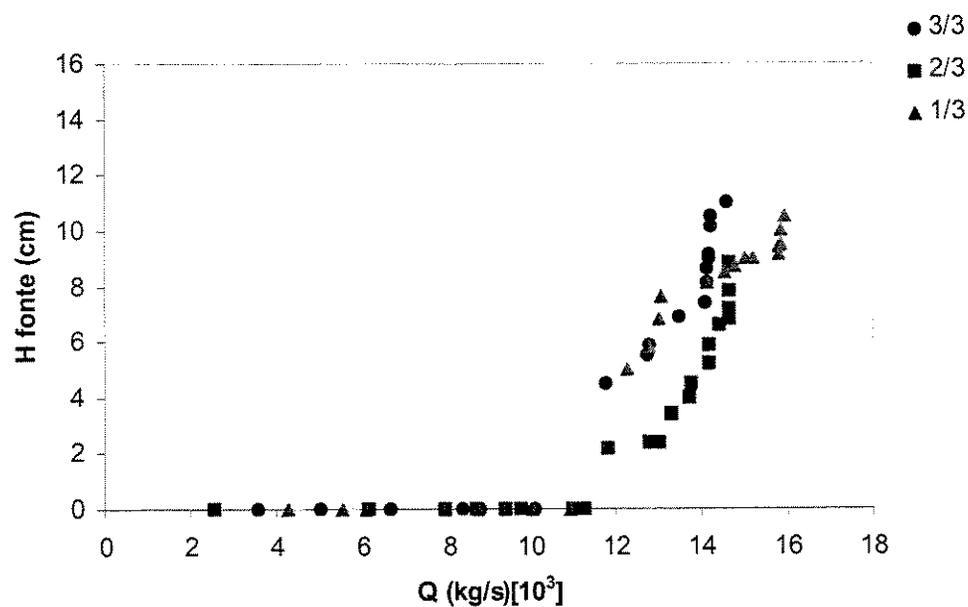


Figura B.15: Curva de altura de fonte *versus* vazão de ar para o PP.

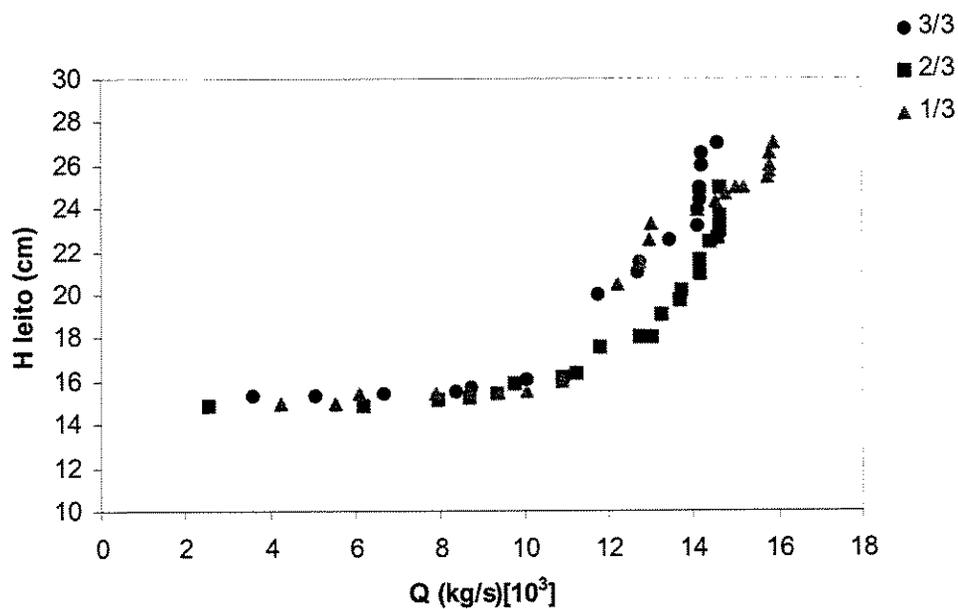


Figura B.16: Curva de altura de leito *versus* vazão de ar para o PP.

- Placebo

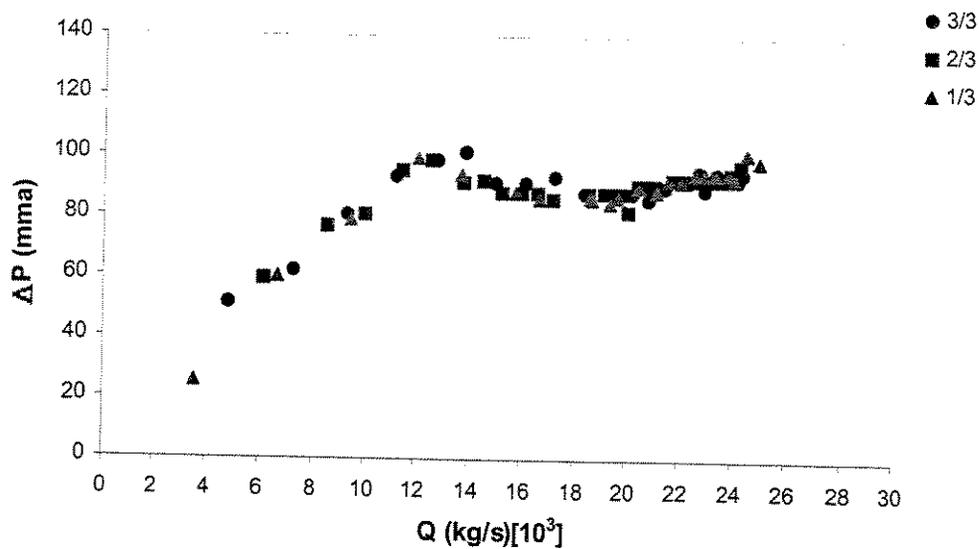


Figura B.17: Curva de queda de pressão do leito *versus* vazão de ar para o Placebo.

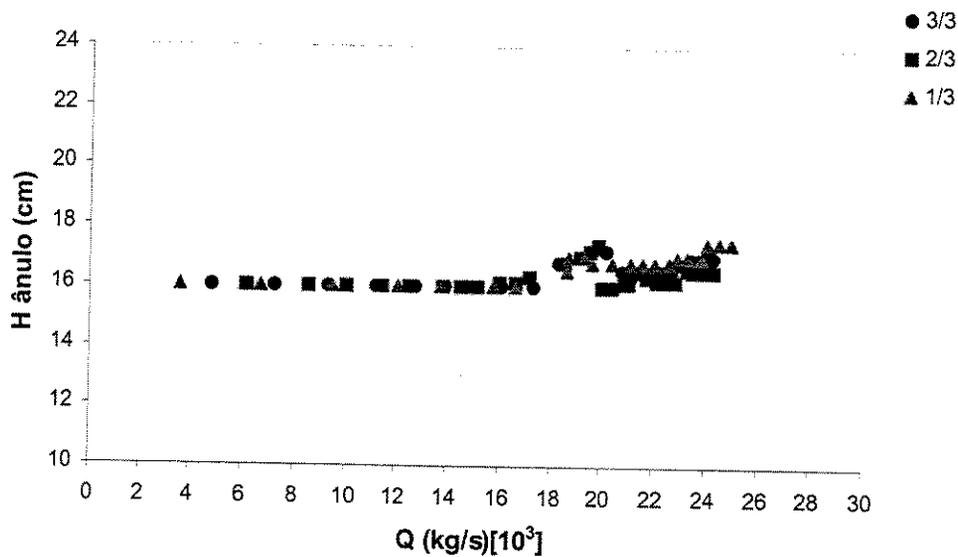


Figura B.18: Curva de altura do ânulo em leito seco para o Placebo.

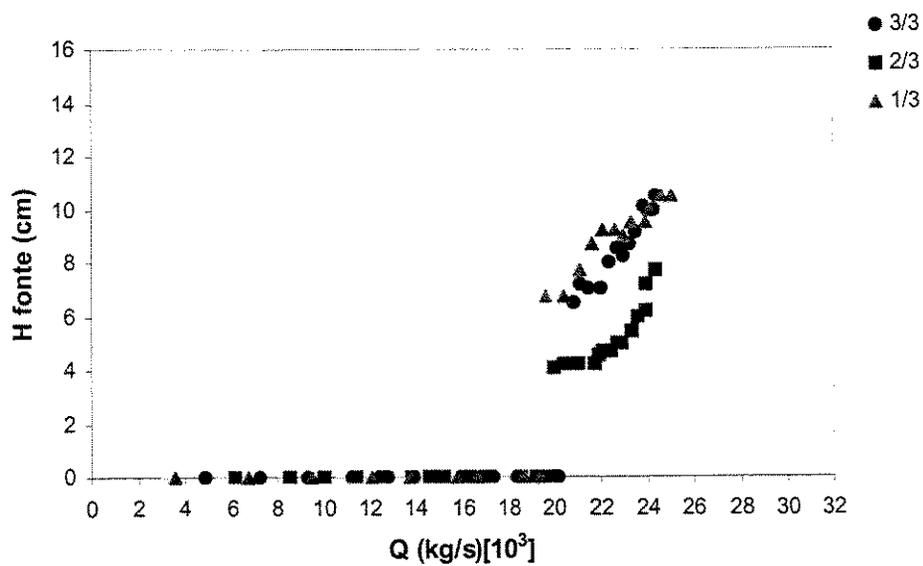


Figura B.19: Curva de altura de fonte *versus* vazão de ar para o Placebo.

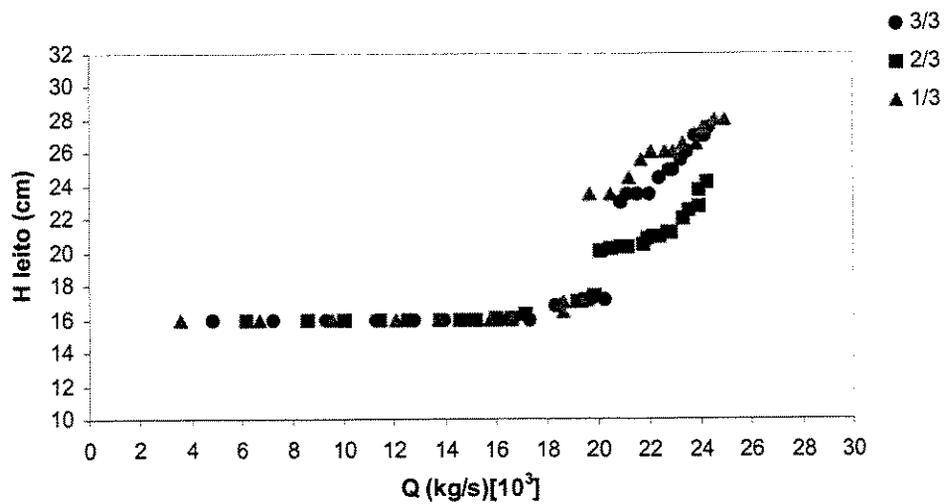


Figura B.20: Curva de altura de leito *versus* vazão de ar para o Placebo.

- Esfera de vidro

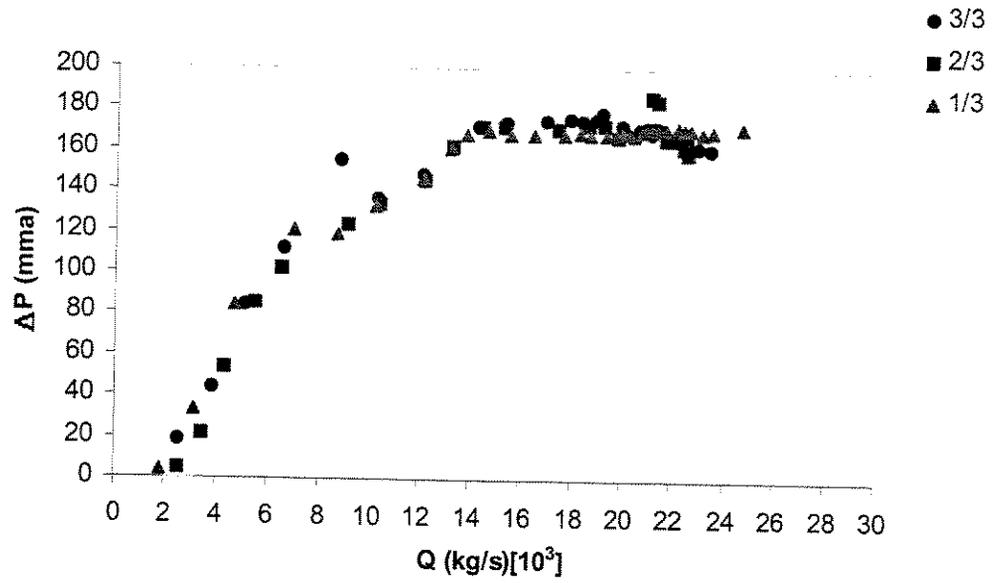


Figura B.21: Curva de queda de pressão do leito *versus* vazão de ar para a Esfera de vidro.

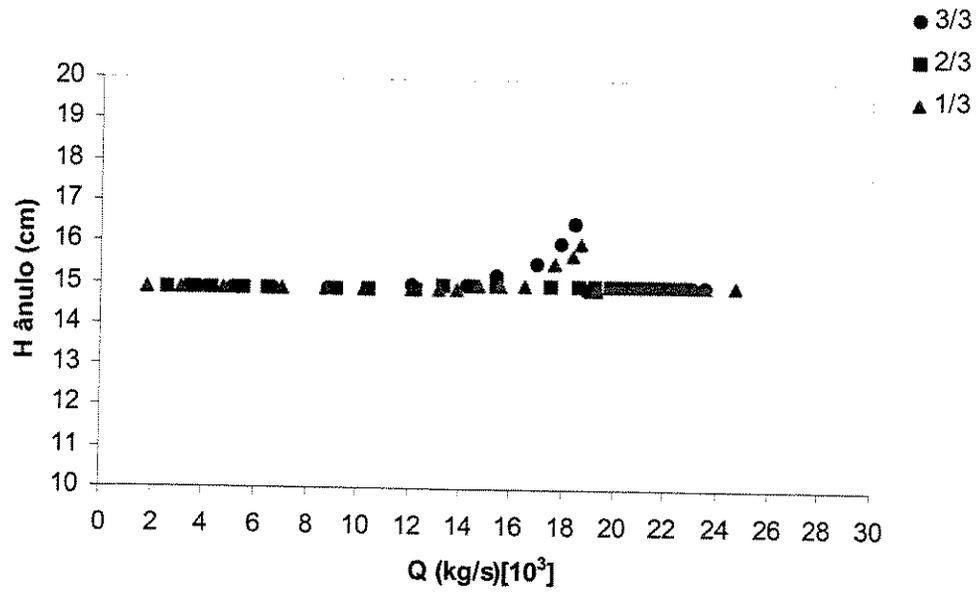


Figura B.22: Curva de altura do ânulo em leito seco para a Esfera de vidro.

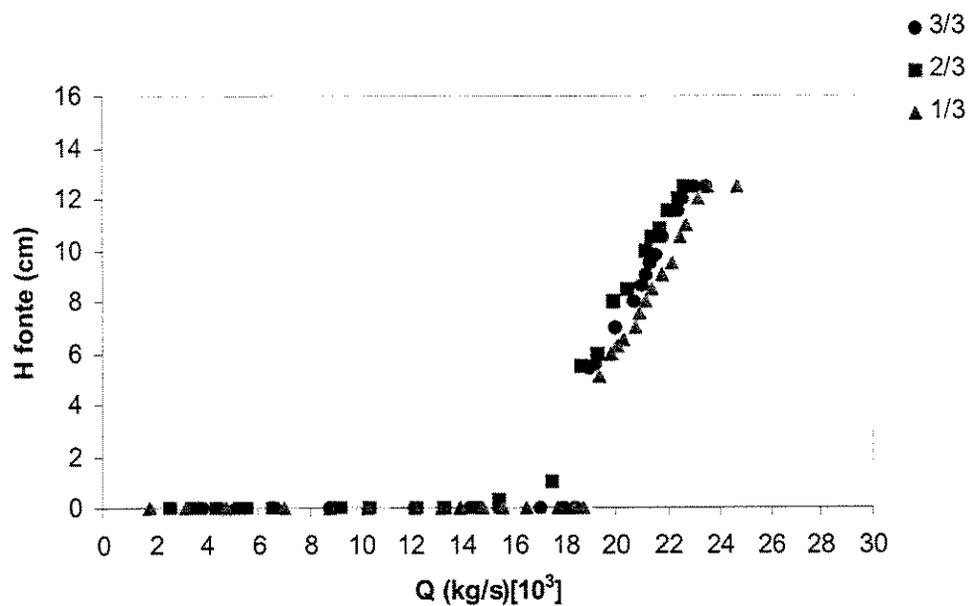


Figura B.23: Curva de altura de fonte *versus* vazão de ar para a Esfera de vidro.

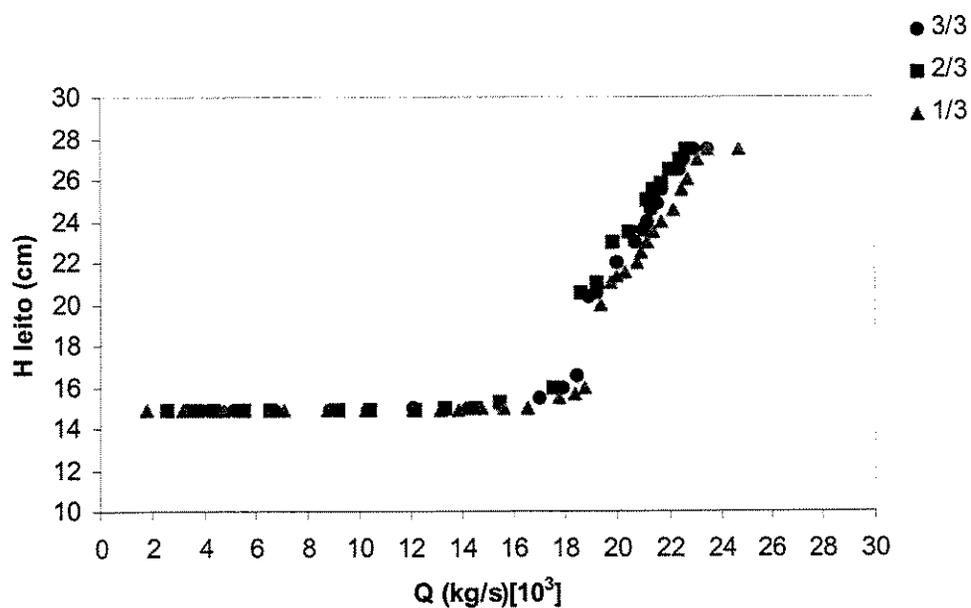


Figura B.24: Curva de altura de leito *versus* vazão de ar para a Esfera de vidro.

➤ Curvas Fluidodinâmicas a seco com pressão de atomização

- ABS

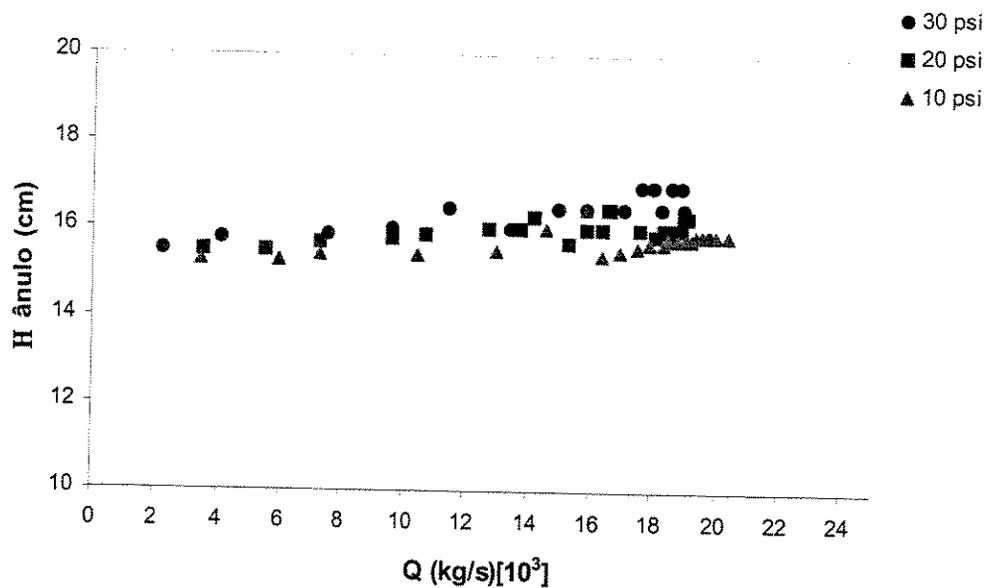


Figura B.25: Curva de altura de ânulo *versus* vazão de ar sob pressão de atomização para o ABS.

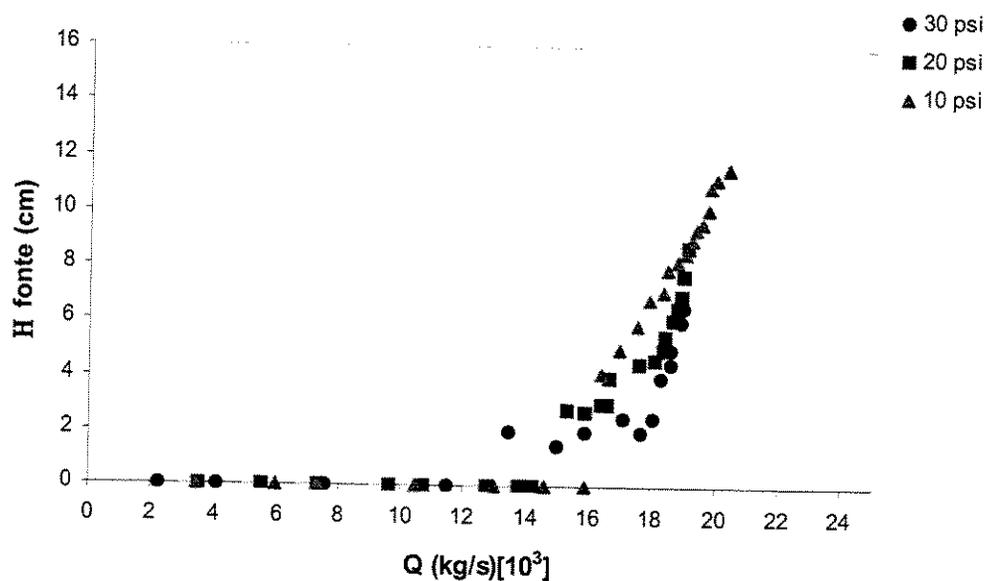


Figura B.26: Curva de altura de fonte *versus* vazão de ar sob pressão de atomização para o ABS.

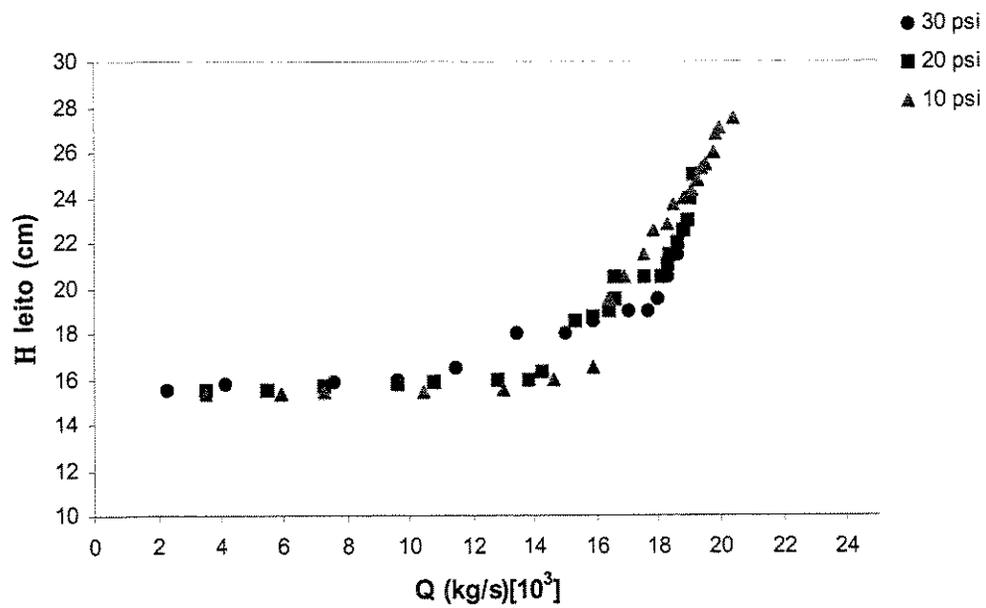


Figura B.27: Curva de altura de leito *versus* vazão de ar sob pressão de atomização para o ABS.

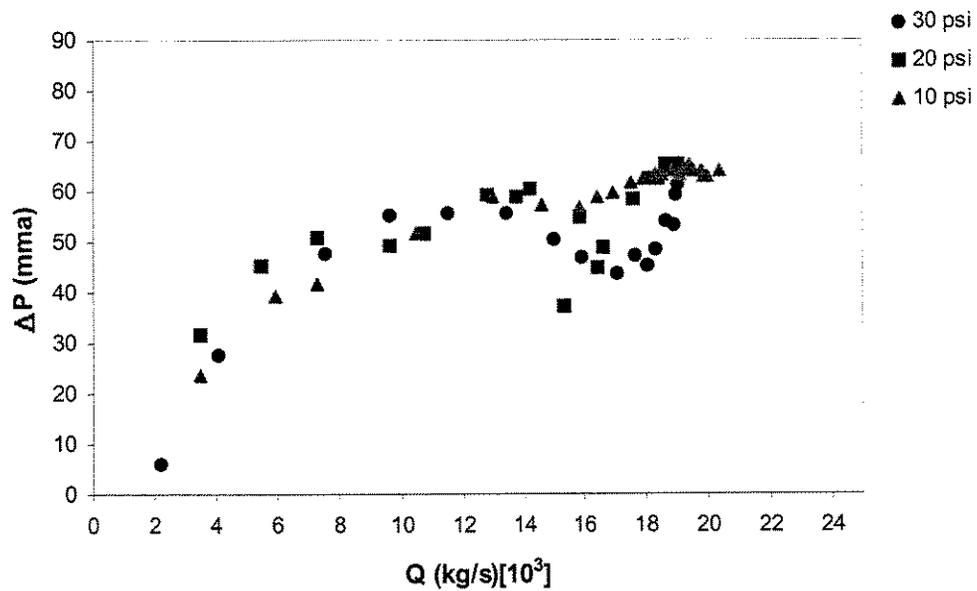


Figura B.28: Curva de queda de pressão *versus* vazão de ar sob pressão de atomização para o ABS.

- PS

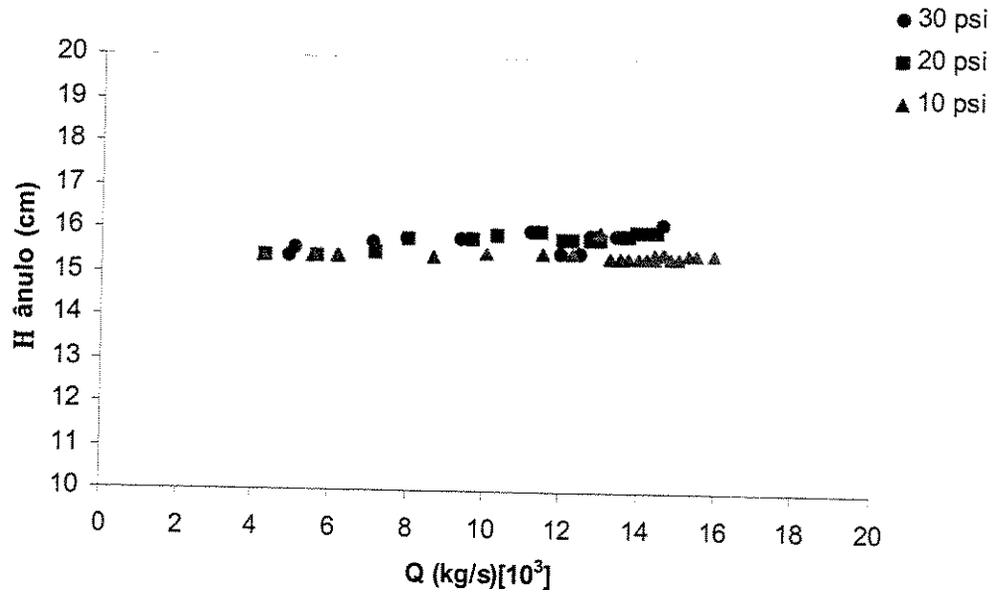


Figura B.29: Curva de altura de ânulo *versus* vazão de ar sob pressão de atomização para o PS.

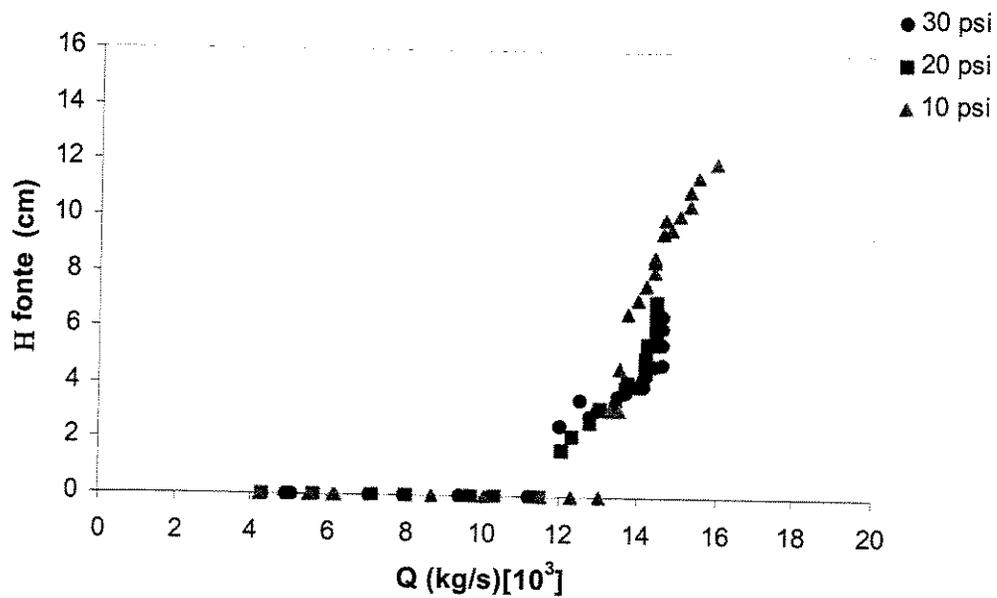


Figura B.30: Curva de altura de fonte *versus* vazão de ar sob pressão de atomização para o PS.

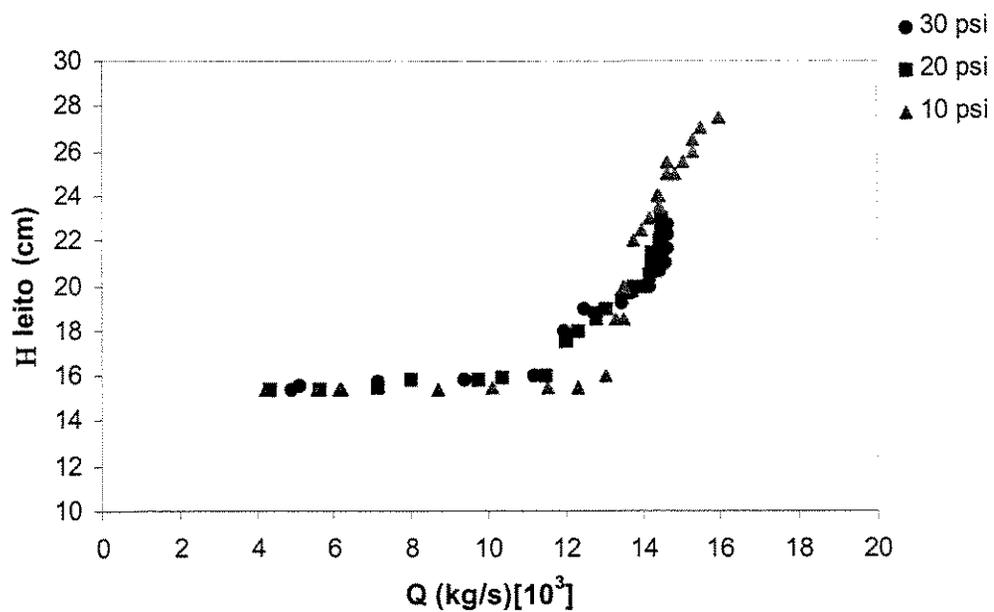


Figura B.31: Curva de altura de leito *versus* vazão de ar sob pressão de atomização para o PS.

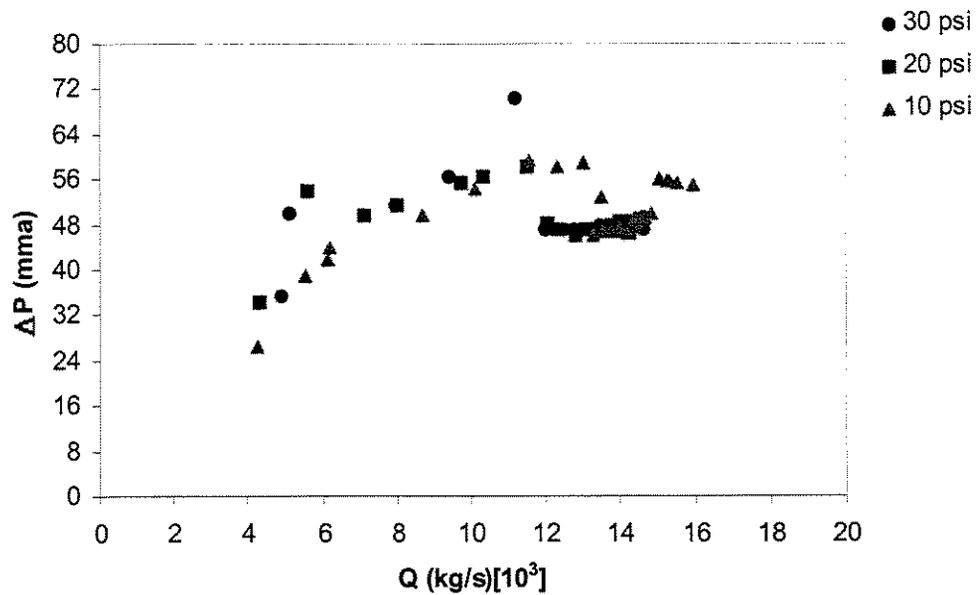


Figura B.32: Curva de queda de pressão *versus* vazão de ar sob pressão de atomização para o PS.

- PEBD

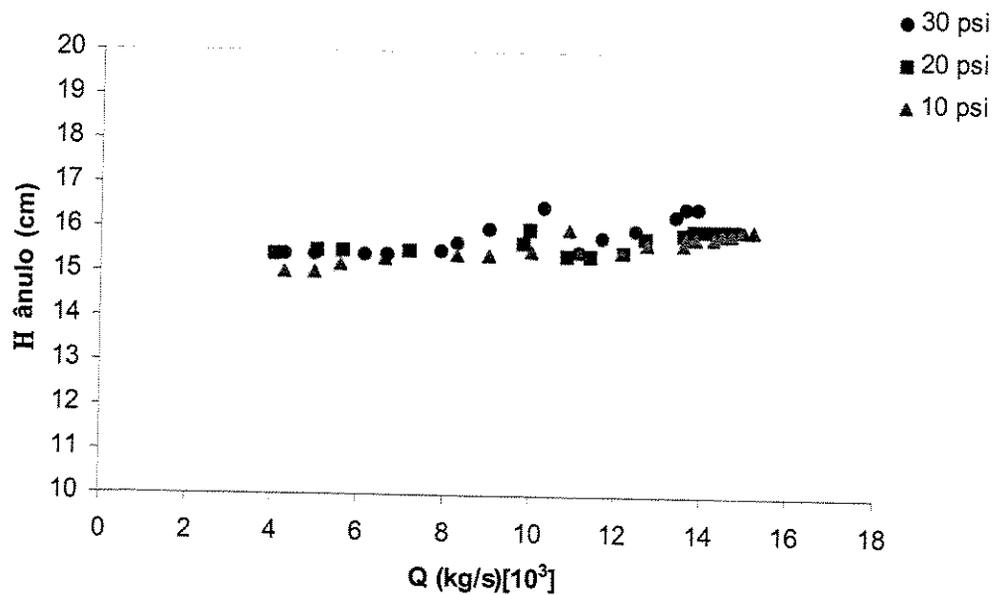


Figura B.33: Curva de altura de ânulo *versus* vazão de ar sob pressão de atomização para o PEBD.

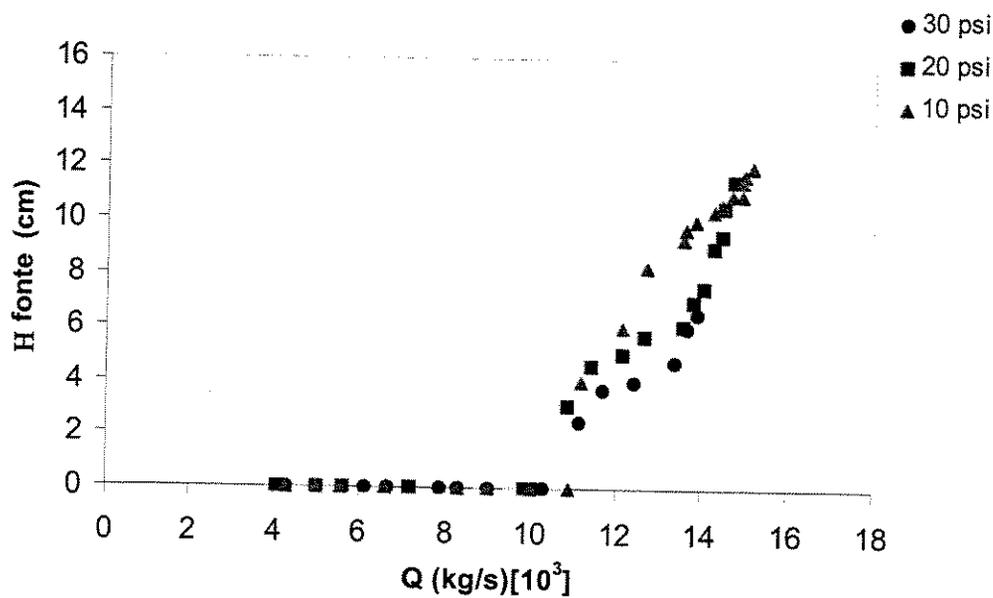


Figura B.34: Curva de altura de fonte *versus* vazão de ar sob pressão de atomização para o PEBD.

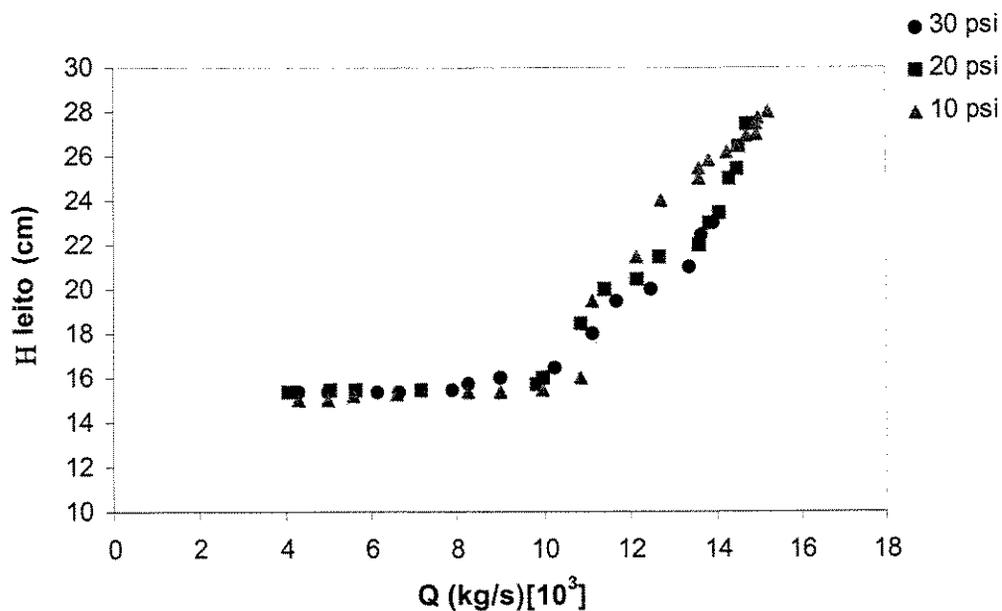


Figura B.35: Curva de altura de leito *versus* vazão de ar sob pressão de atomização para o PEBD.

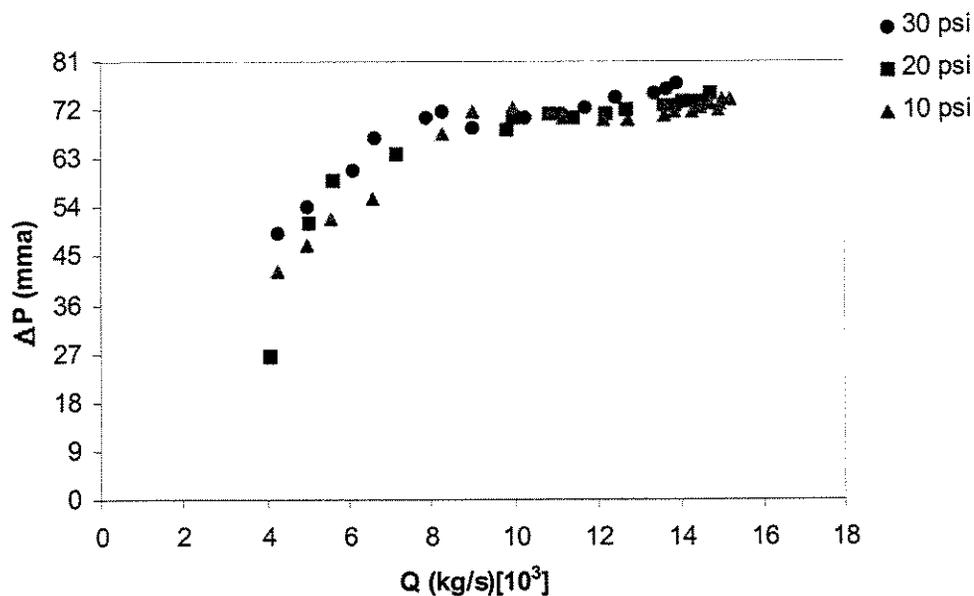


Figura B.36: Curva de queda de pressão *versus* vazão de ar sob pressão de atomização para o PEBD.

- PP

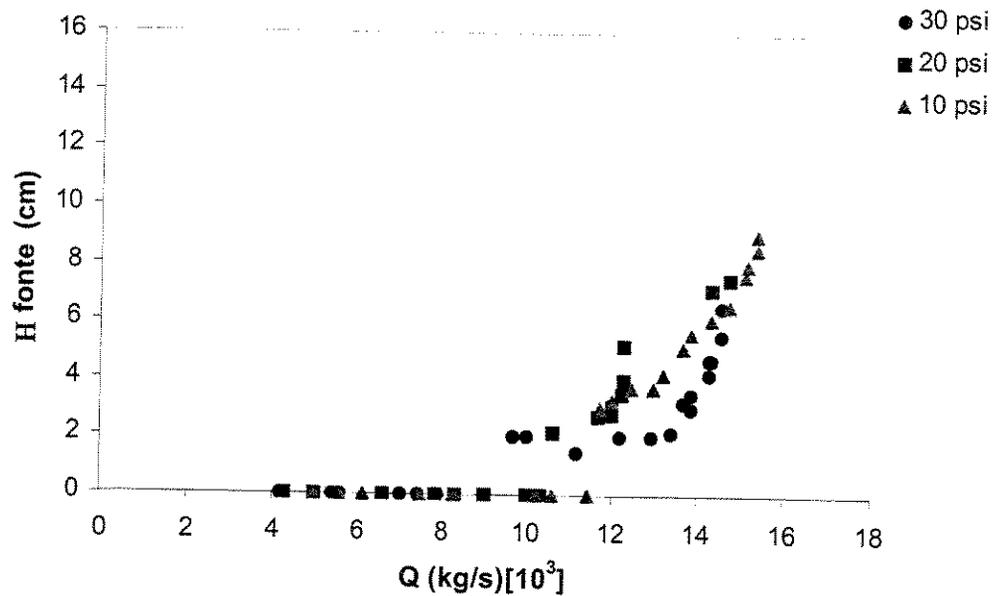


Figura B.37: Curva de altura de fonte *versus* vazão de ar sob pressão de atomização para o PP.

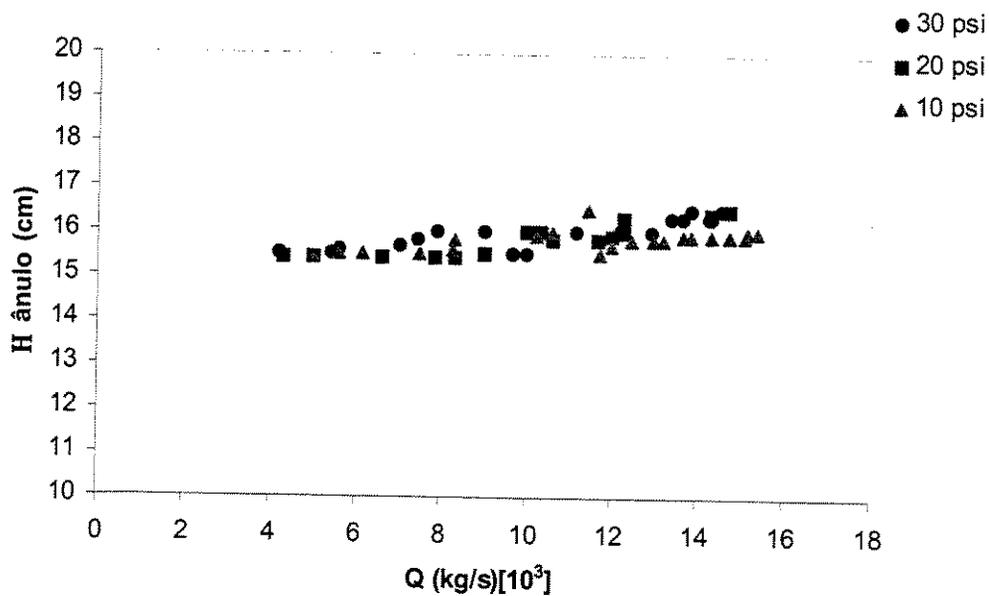


Figura B.38: Curva de altura de ânulo *versus* vazão de ar sob pressão de atomização para o PP.

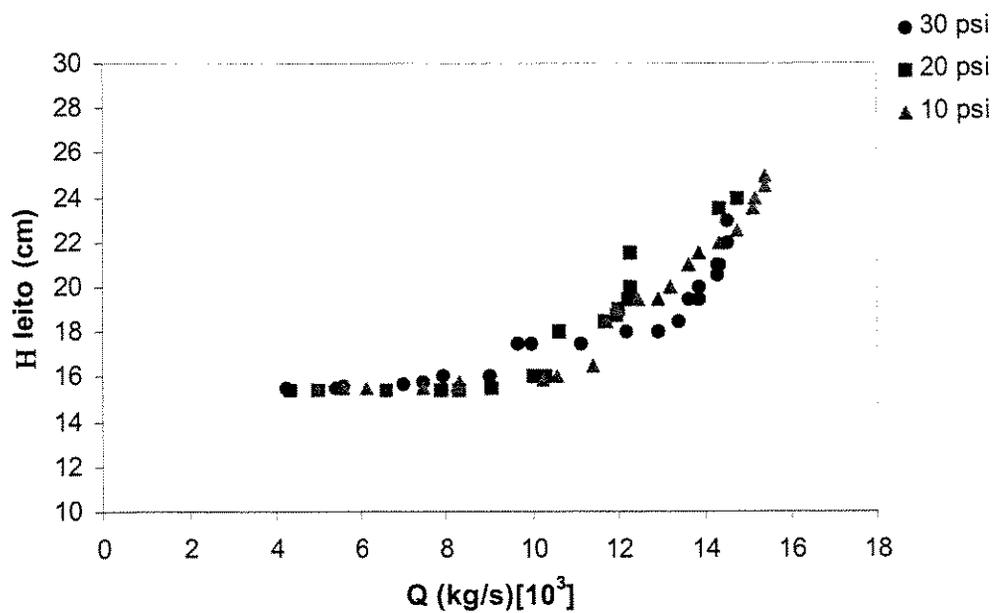


Figura B.39: Curva de altura de ânulo *versus* vazão de ar sob pressão de atomização para o PP.

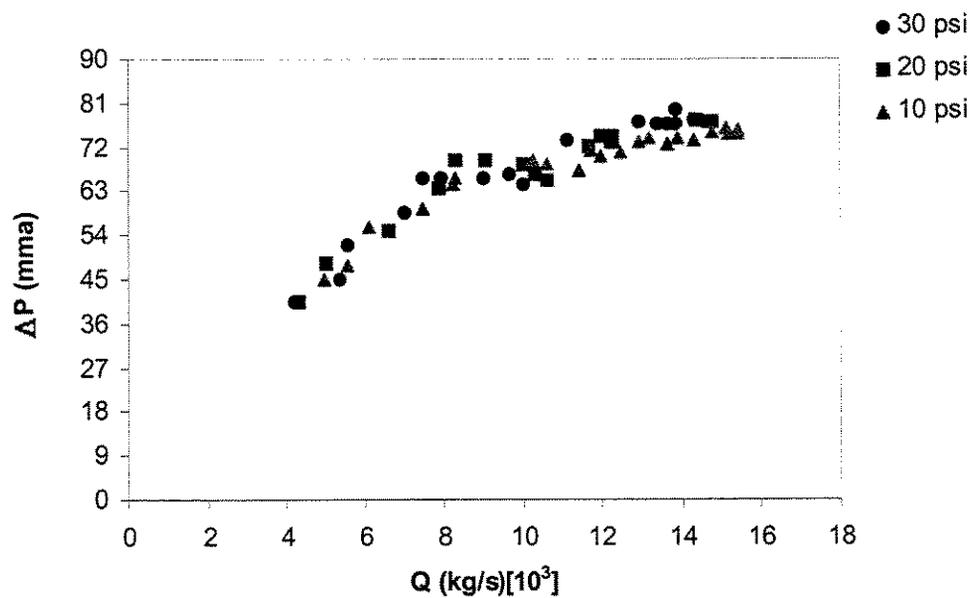


Figura B.40: Curva de queda de pressão *versus* vazão de ar sob pressão de atomização para o PP.

- Placebo

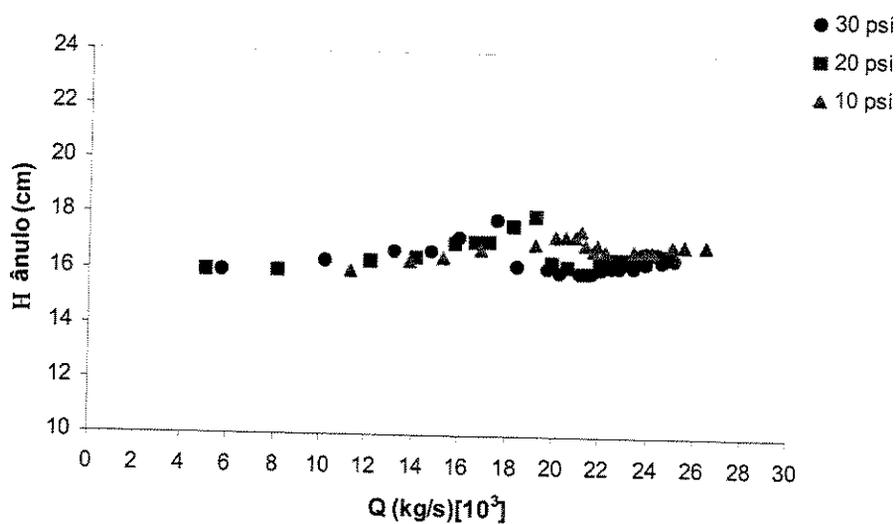


Figura B.41: Curva de altura de ânulo *versus* vazão de ar sob pressão de atomização para o Placebo.

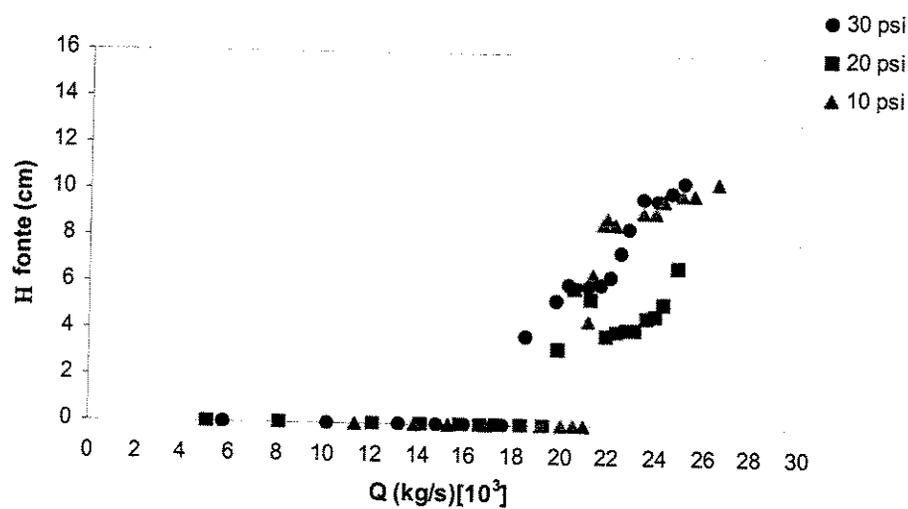


Figura B.42: Curva de altura de fonte *versus* vazão de ar sob pressão de atomização para o Placebo.

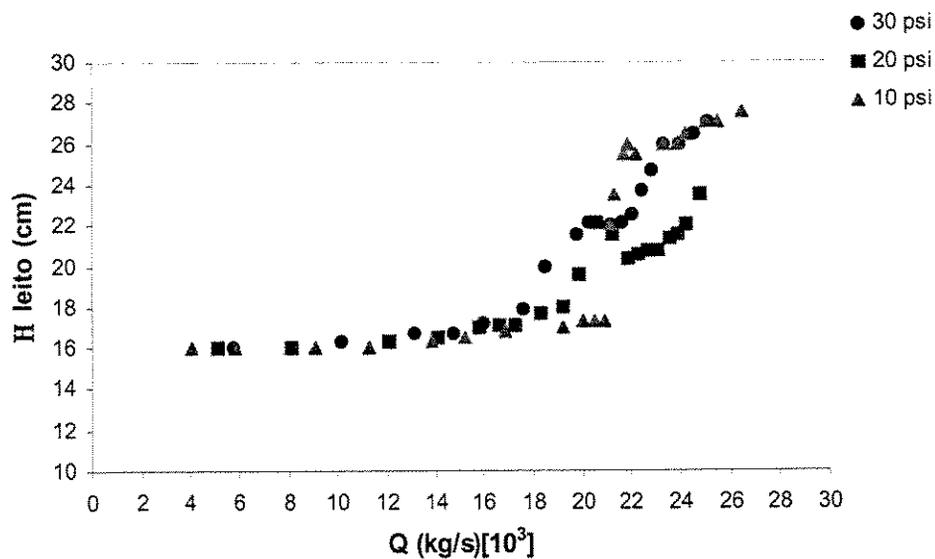


Figura B.43: Curva de altura de leito *versus* vazão de ar sob pressão de atomização para o Placebo.

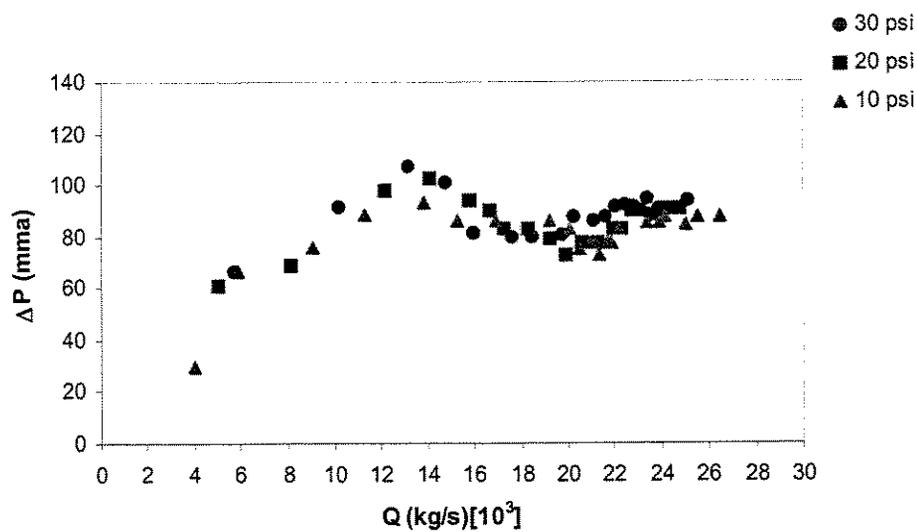


Figura B.44: Curva de queda de pressão *versus* vazão de ar sob pressão de atomização para o Placebo.

- Esfera de vidro

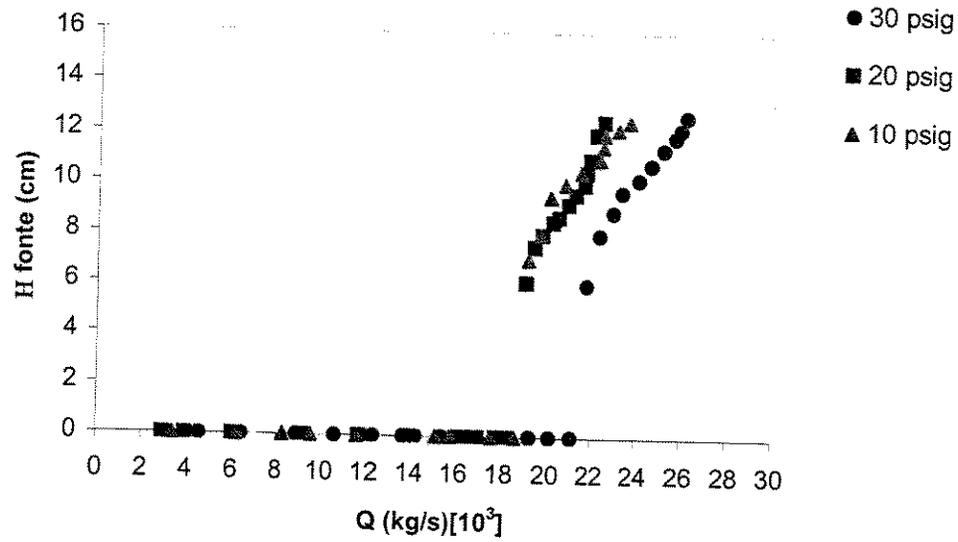


Figura B.45: Curva de altura de fonte *versus* vazão de ar sob pressão de atomização a Esfera de vidro.

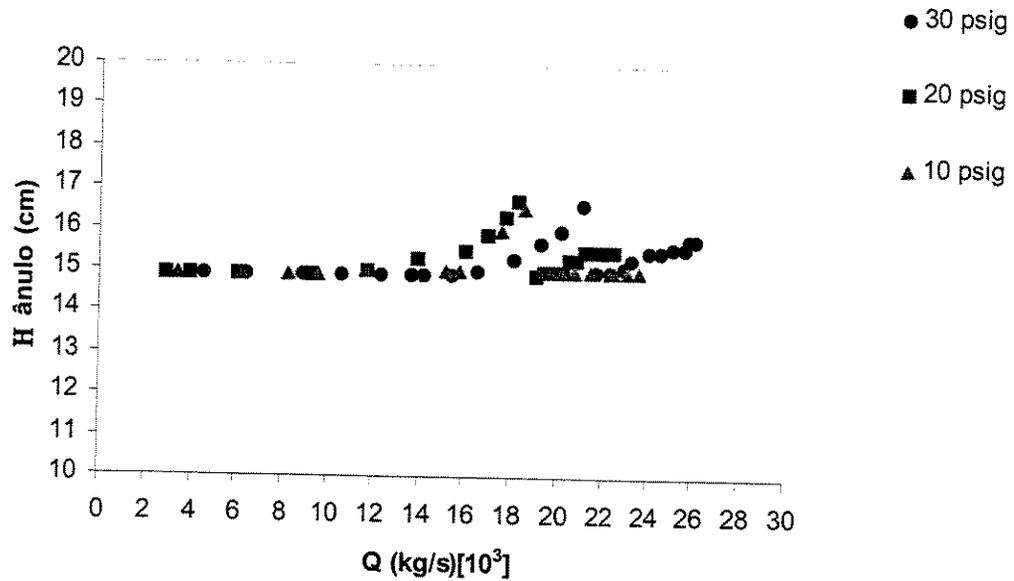


Figura B.46: Curva de altura de ânulo *versus* vazão de ar sob pressão de atomização para a Esfera de vidro.

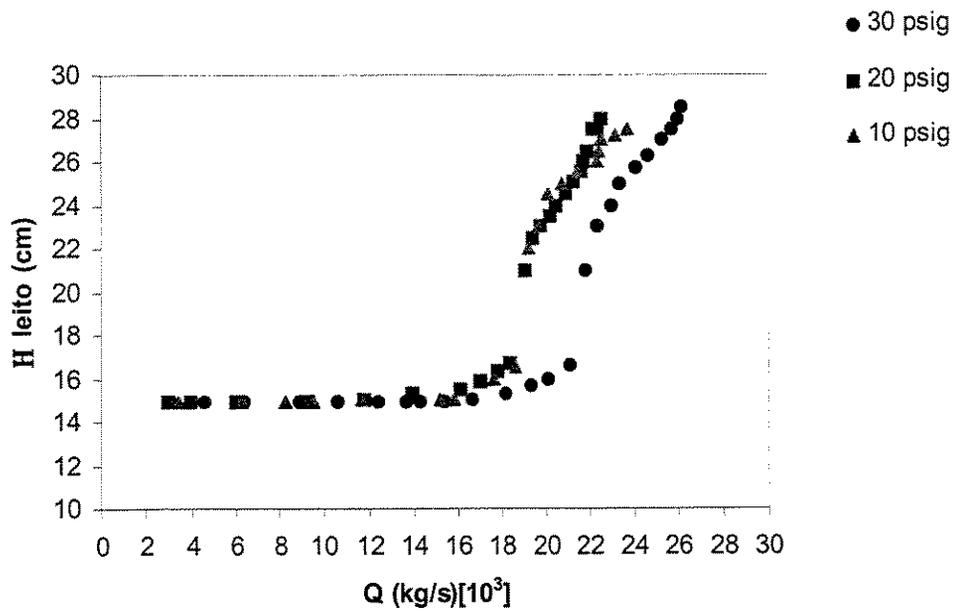


Figura B.47: Curva de altura de leito *versus* vazão de ar sob pressão de atomização para a Esfera de vidro.

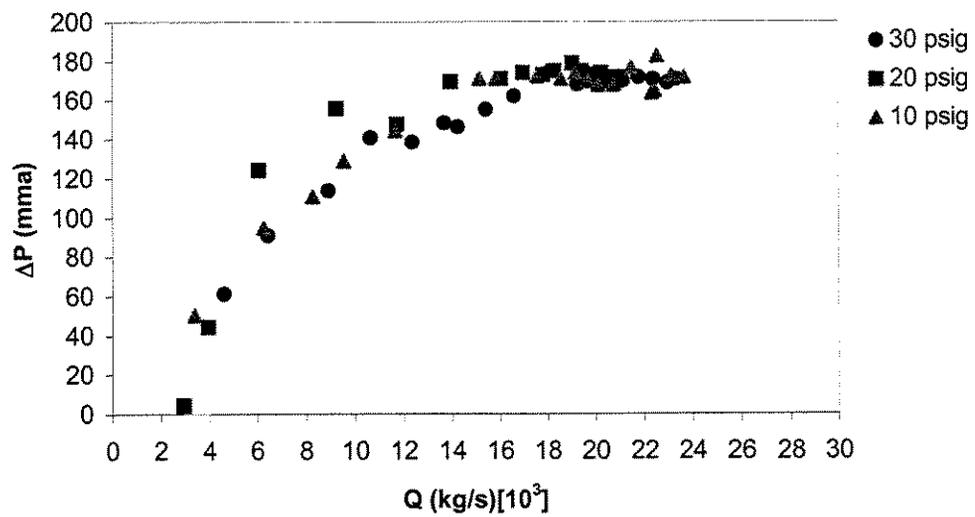


Figura B.48: Curva de queda de pressão *versus* vazão de ar sob pressão de atomização para a Esfera de vidro.

## ANEXO C

→ Fluidodinâmica dos ensaios de recobrimento com variação da vazão de suspensão

◆ Partícula: ABS

\* Ensaio ABS - 1

Condições Operacionais:  $T_{\text{entrada ar}} = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{\text{at}} = 20 \text{ psig}$ ,  $t_{\text{processo}} = 30 \text{ min}$   
 $W_{\text{susp}} = 12,0 \text{ ml/min}$ ,  $Q_j / Q_{j\text{m},0} = 1,09$

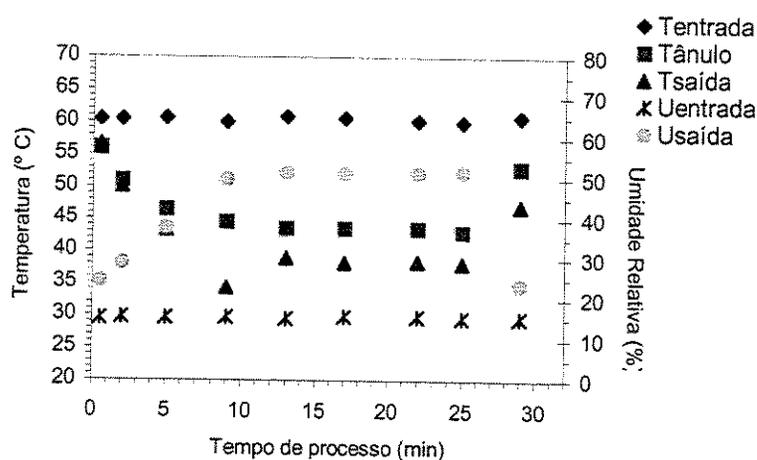


Figura C.1: Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 12 ml/min.

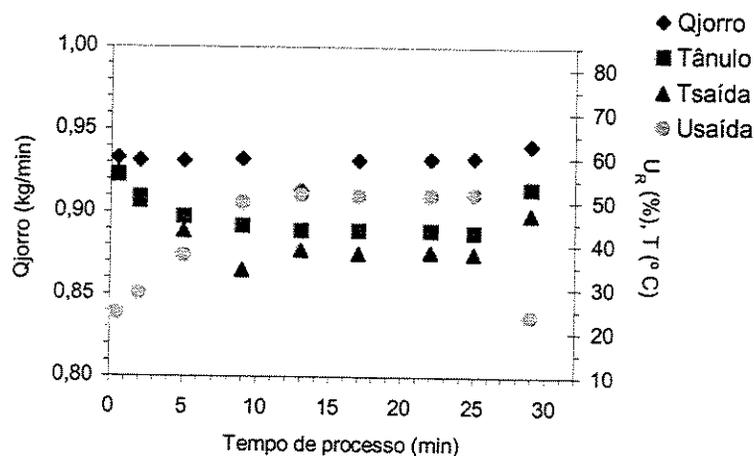


Figura C.2: Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leito e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 12 ml/min.

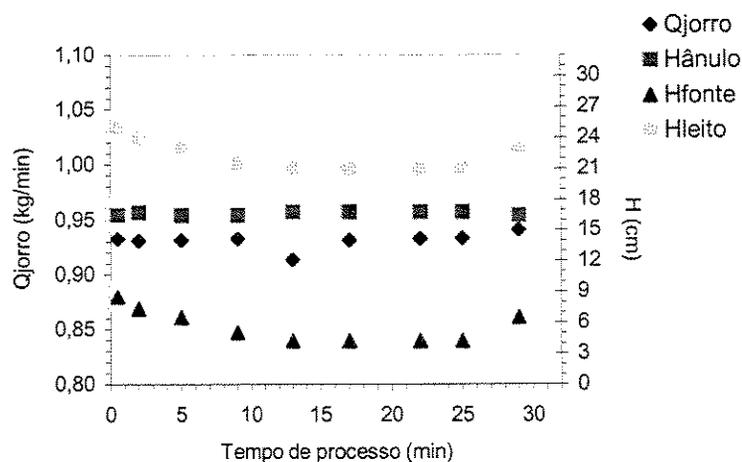


Figura C.3: Vazão de ar de jorro, altura do leito, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 12 ml/min.

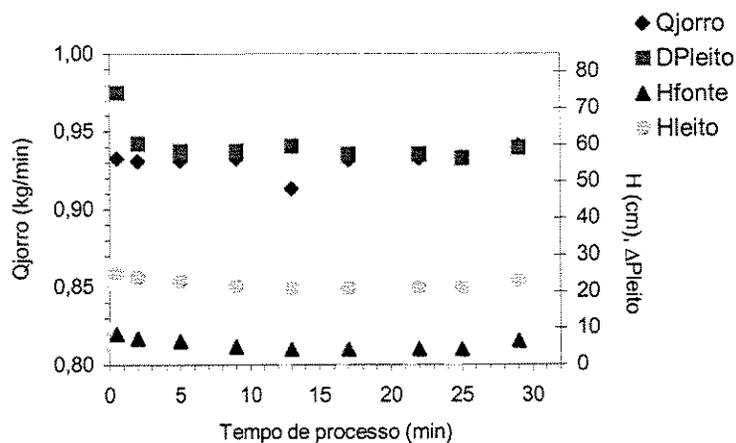


Figura C.4: Vazão do ar de jorro, queda de pressão do leito, altura da fonte e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 12 ml/min.

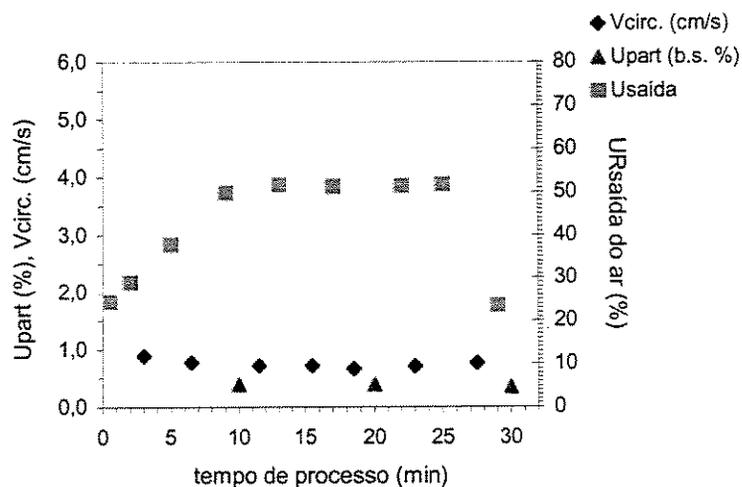


Figura C.5: Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 12 ml/min.

\* Ensaio ABS - 2

Condições Operacionais:  $T_{\text{entrada ar}} = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{\text{at}} = 20 \text{ psig}$ ,  $t_{\text{processo}} = 19 \text{ min}$   
 $W_{\text{susp}} = 14,0 \text{ ml/min}$ ,  $Q_j / Q_{j,m,o} = 1,09$

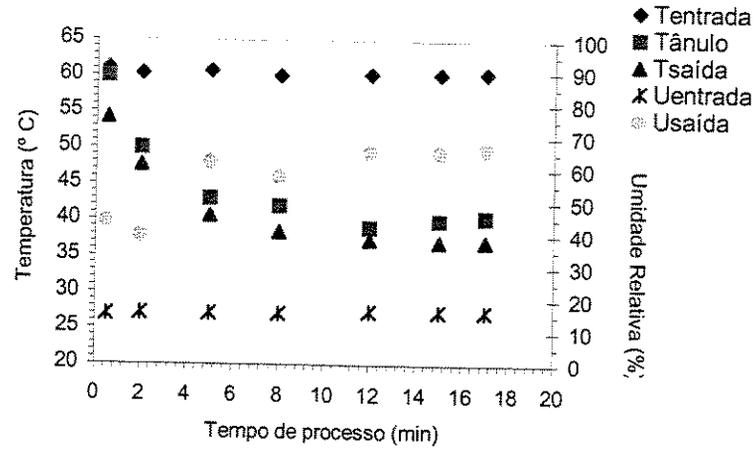


Figura C.6: Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 14 ml/min.

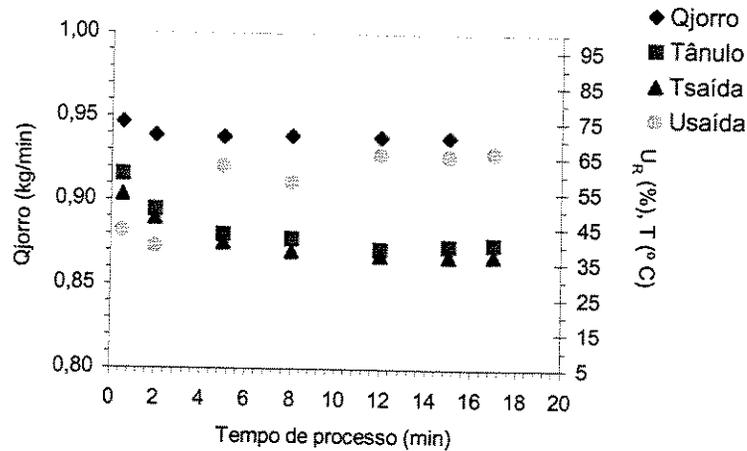


Figura C.7: Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leito e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 14 ml/min.

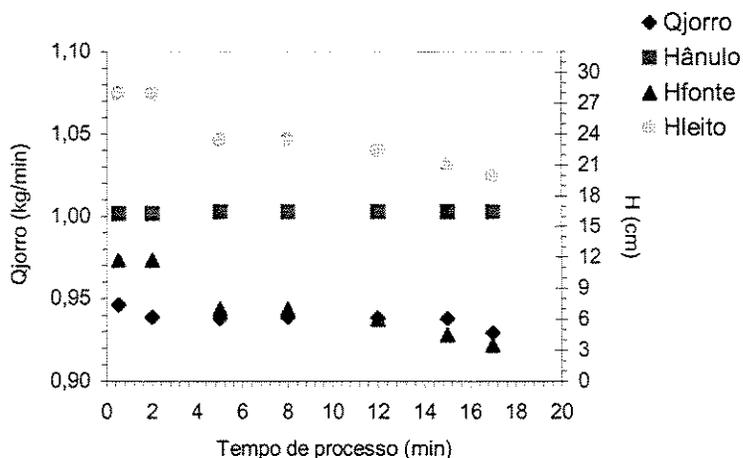


Figura C.8: Vazão de ar de jorro, altura do leito, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 14 ml/min.

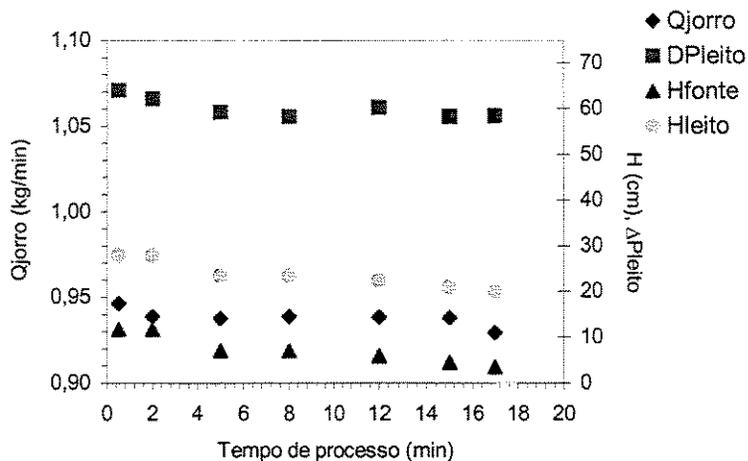


Figura C.9: Vazão do ar de jorro, queda de pressão do leito, altura da fonte e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 14 ml/min.

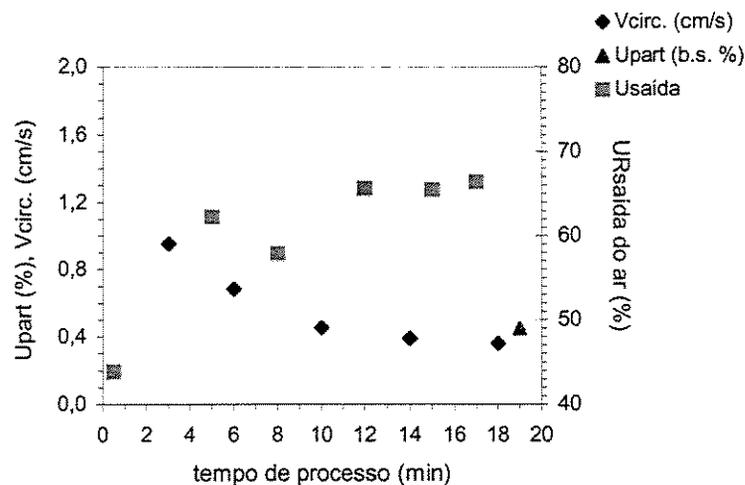


Figura C.10: Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 14 ml/min.

## \* Ensaio ABS – 3

Condições Operacionais:  $T_{\text{entrada ar}} = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{\text{at}} = 20 \text{ psig}$ ,  $t_{\text{processo}} = 15 \text{ min}$   
 $W_{\text{susp}} = 15,0 \text{ ml/min}$ ,  $Q_j / Q_{j,m,o} = 1,09$

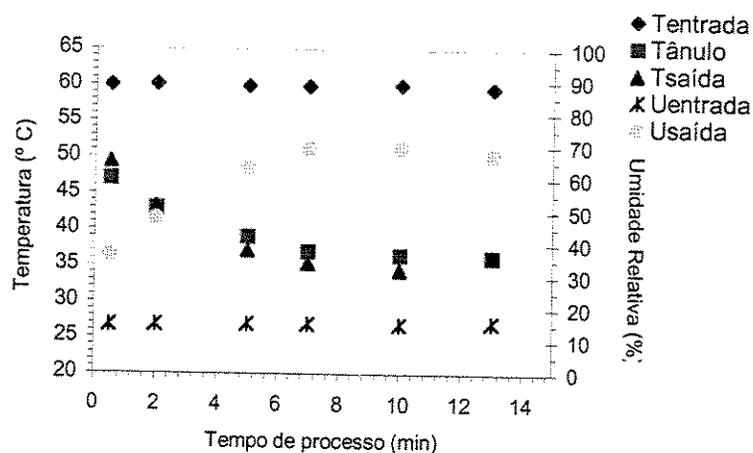


Figura C.11: Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 15 ml/min.

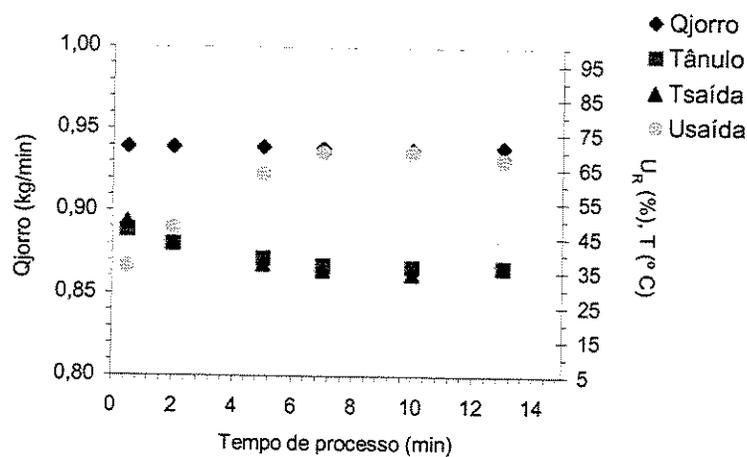


Figura C.12: Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leito e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 15 ml/min.

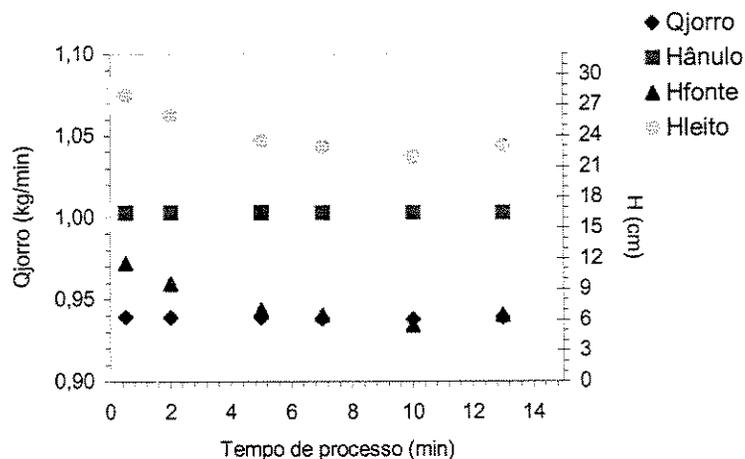


Figura C.13: Vazão de ar de jorro, altura do leito, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 15 ml/min.

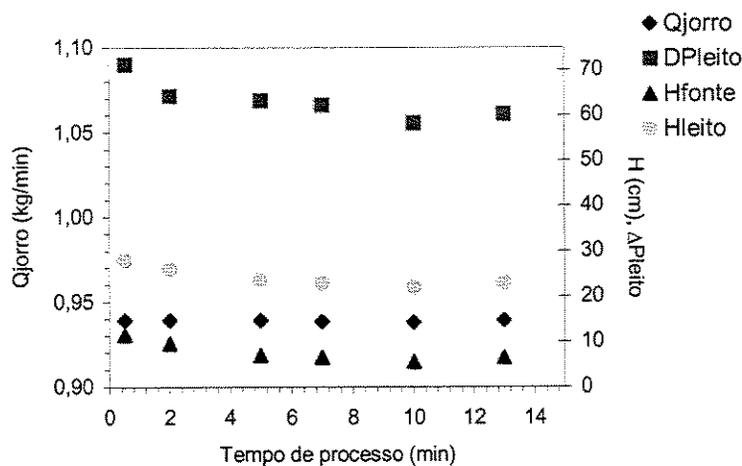


Figura C.14: Vazão do ar de jorro, queda de pressão do leito, altura da fonte e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 15 ml/min.

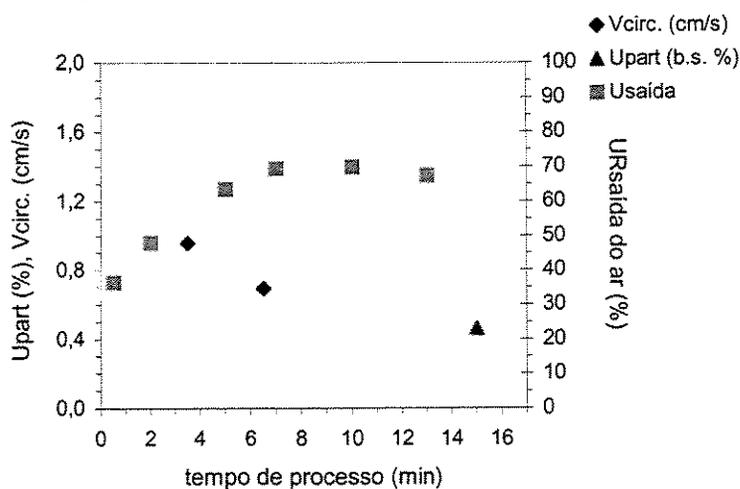


Figura C.15: Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 15 ml/min.

## \* Ensaio ABS - 4

Condições Operacionais:  $T_{\text{entrada ar}} = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{\text{at}} = 20 \text{ psig}$ ,  $t_{\text{processo}} = 10,3 \text{ min}$   
 $W_{\text{susp}} = 17,0 \text{ ml/min}$ ,  $Q_j / Q_{j,m,0} = 1,11$

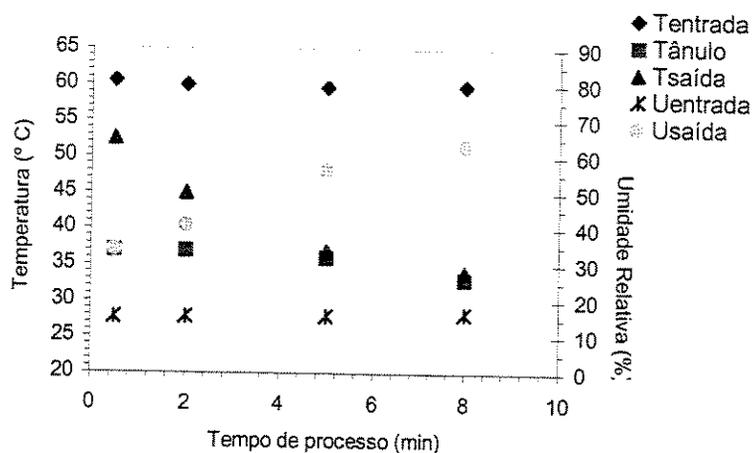


Figura C.16: Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 17 ml/min.

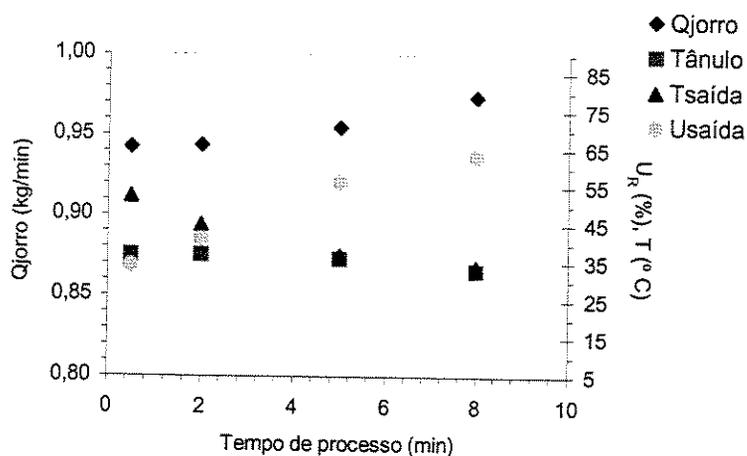


Figura C.17: Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leito e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 17 ml/min.

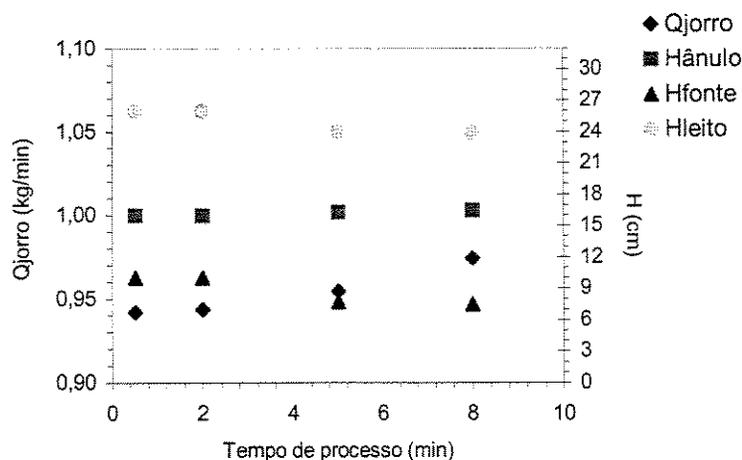


Figura C.18: Vazão de ar de jorro, altura do leito, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 17 ml/min.

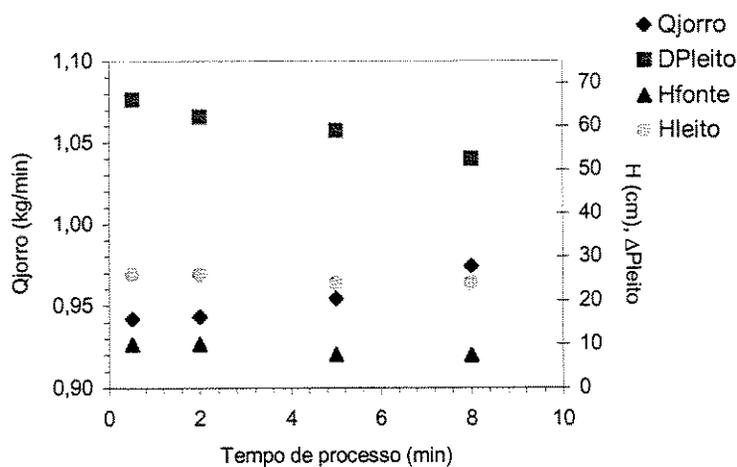


Figura C.19: Vazão do ar de jorro, queda de pressão do leito, altura da fonte e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 17 ml/min.

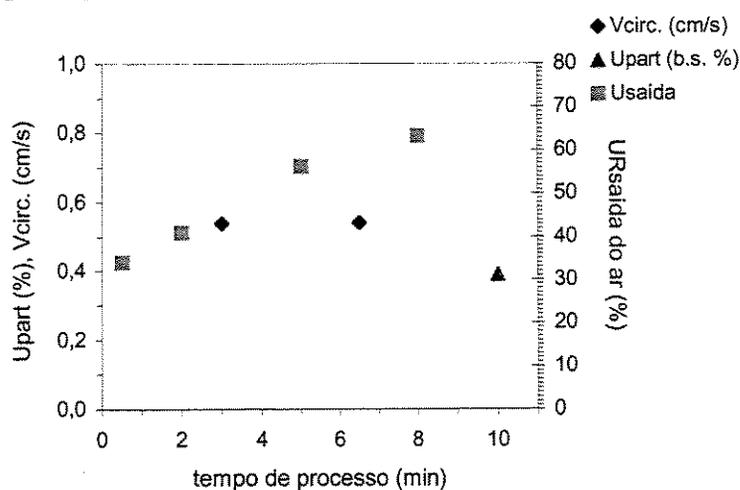


Figura C.20: Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento do ABS à vazão de 17 ml/min.

◆ Partícula: Esfera de vidro

\* Ensaio ESFERA - 1

Condições Operacionais:  $T_{\text{entrada ar}} = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{\text{at}} = 20 \text{ psig}$ ,  $t_{\text{processo}} = 30 \text{ min}$   
 $W_{\text{susp}} = 12,5 \text{ ml/min}$ ,  $Q_j / Q_{j,m,0} = 1,08$

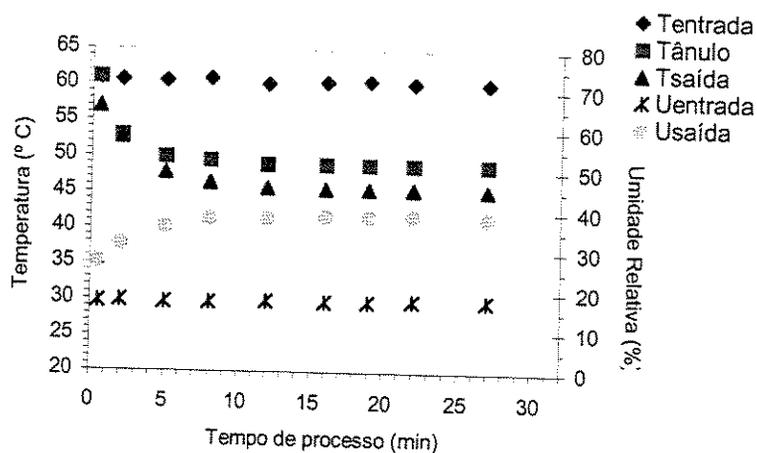


Figura C.21: Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 12,5 ml/min.

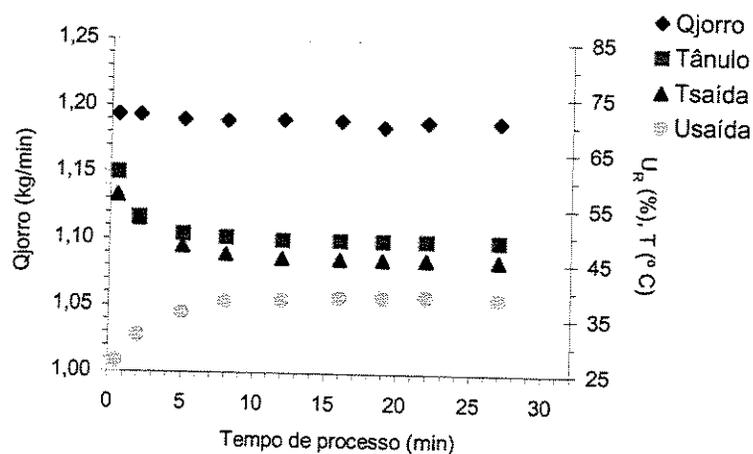


Figura C.22: Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leito e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 12,5 ml/min.

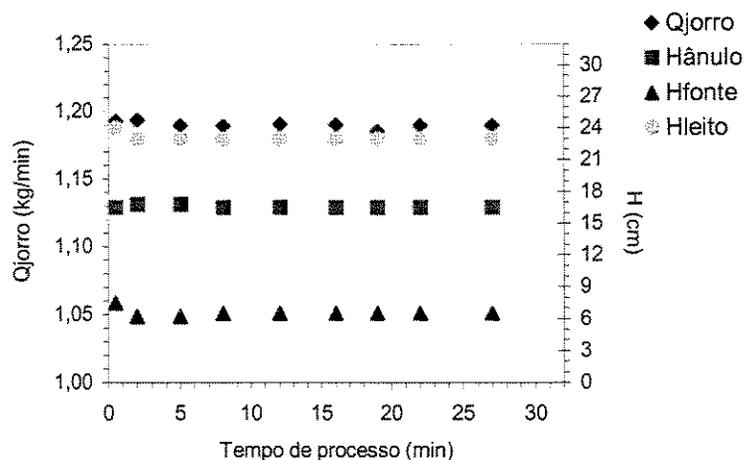


Figura C.23: Vazão de ar de jorro, altura do leito, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 12,5 ml/min.

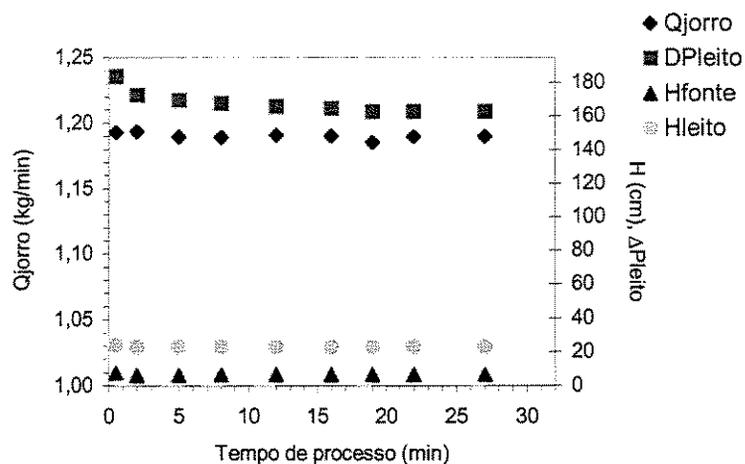


Figura C.24: Vazão do ar de jorro, queda de pressão do leito, altura da fonte e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 12,5 ml/min.

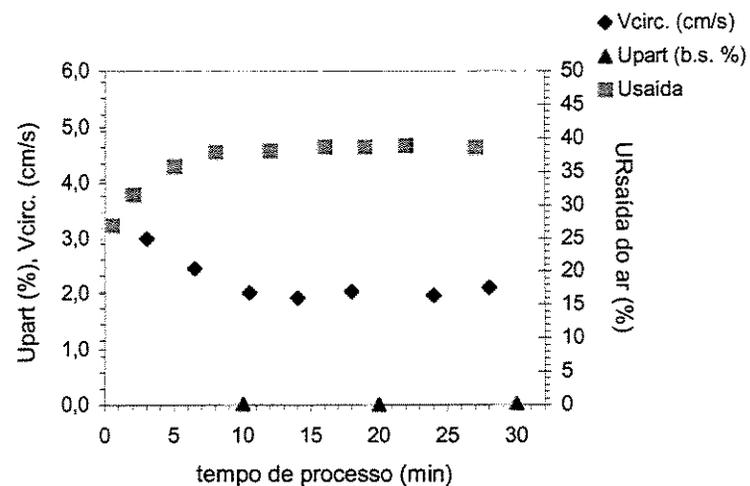


Figura C.25: Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 12,5 ml/min.

## \* Ensaio ESFERA – 2

Condições Operacionais:  $T_{\text{entrada ar}} = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{\text{at}} = 20 \text{ psig}$ ,  $t_{\text{processo}} = 30 \text{ min}$   
 $W_{\text{susp}} = 16,5 \text{ ml/min}$ ,  $Q_j / Q_{j,m,o} = 1,09$

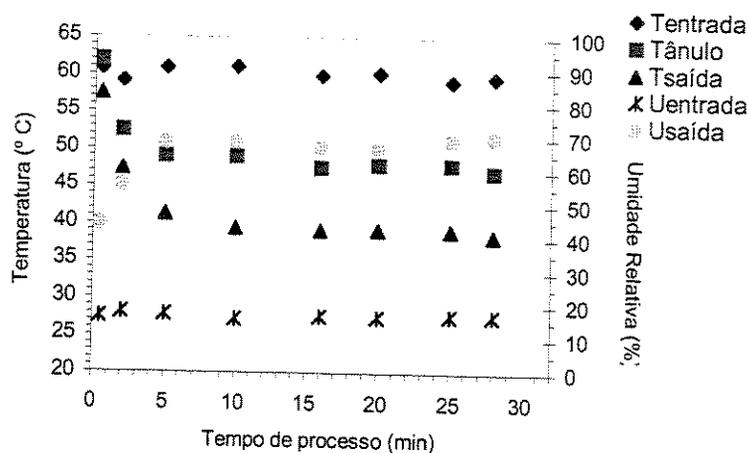


Figura C.26: Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 16,5 ml/min.

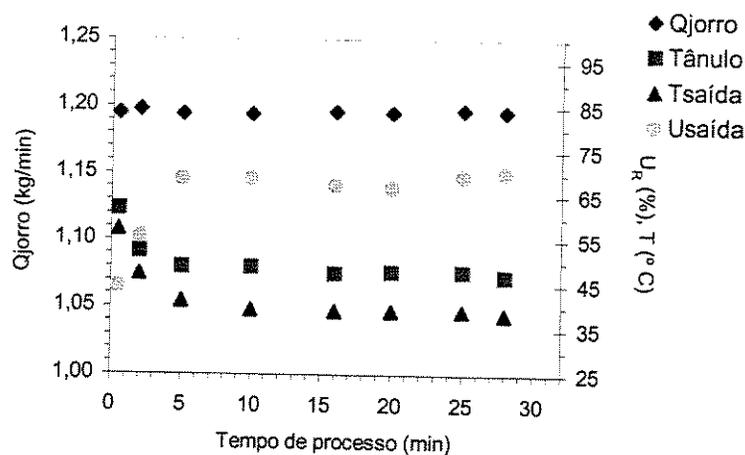


Figura C.27: Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leito e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 16,5 ml/min.

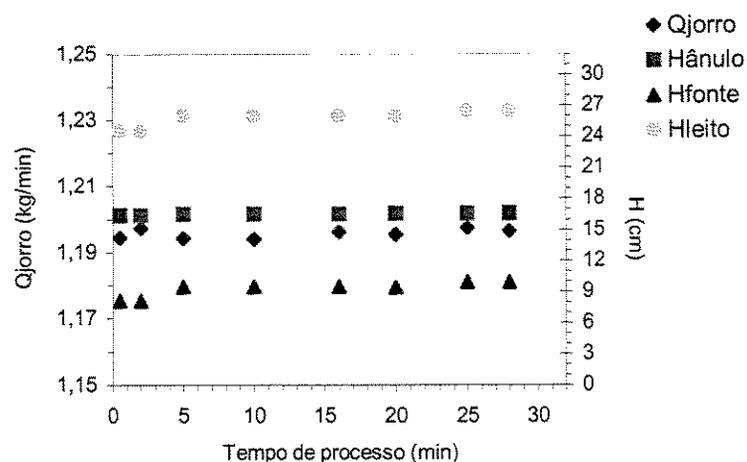


Figura C.28: Vazão de ar de jorro, altura do leito, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 16,5 ml/min.

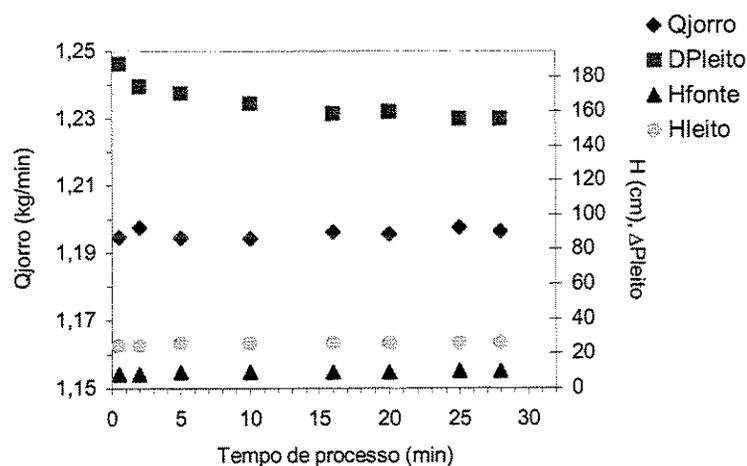


Figura C.29: Vazão do ar de jorro, queda de pressão do leito, altura da fonte e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 16,5 ml/min.

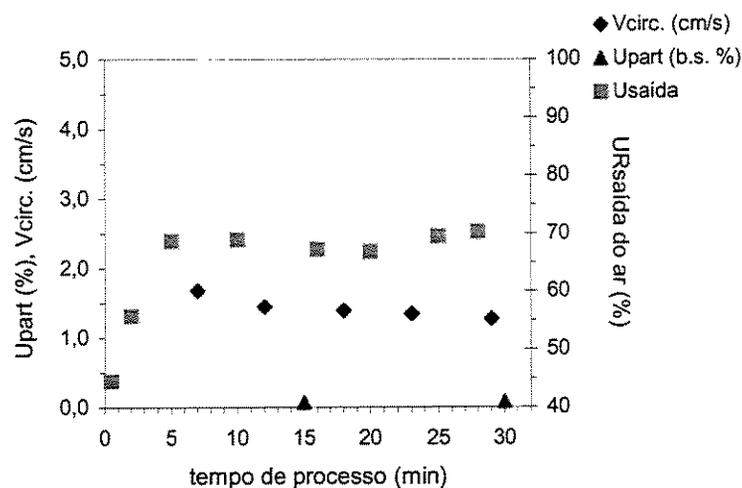


Figura C.30: Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 16,5 ml/min.

## \* Ensaio ESFERA – 3

Condições Operacionais:  $T_{\text{entrada ar}} = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{\text{at}} = 20 \text{ psig}$ ,  $t_{\text{processo}} = 30 \text{ min}$   
 $W_{\text{susp}} 20,0 \text{ ml/min}$ ,  $Q_j / Q_{j,m,o} = 1,09$

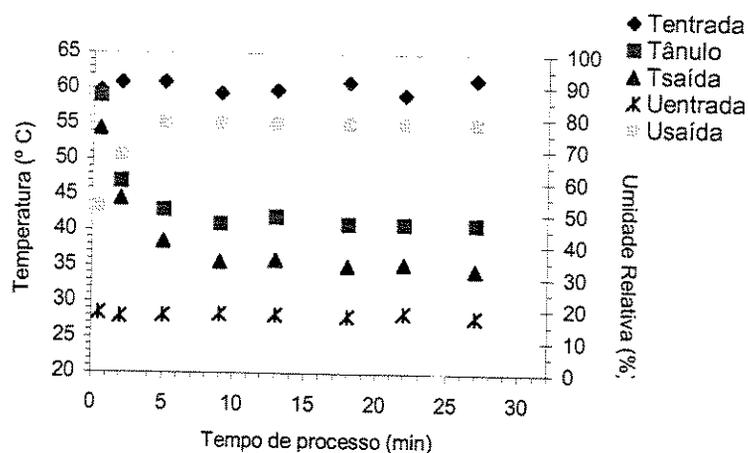


Figura C.31: Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 20 ml/min.

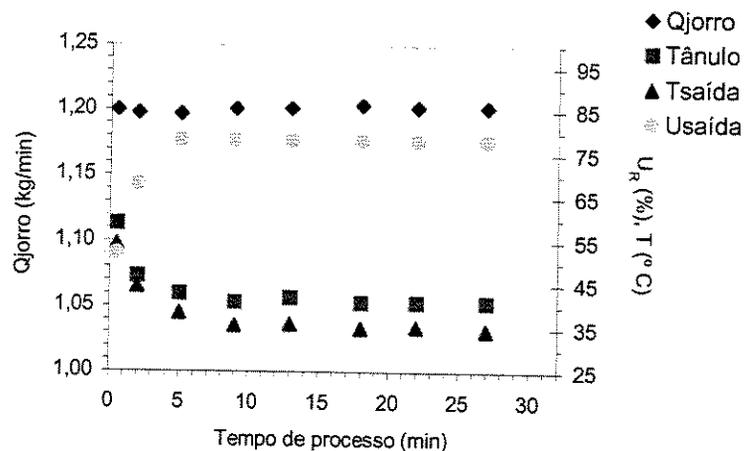


Figura C.32: Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leito e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 20 ml/min.

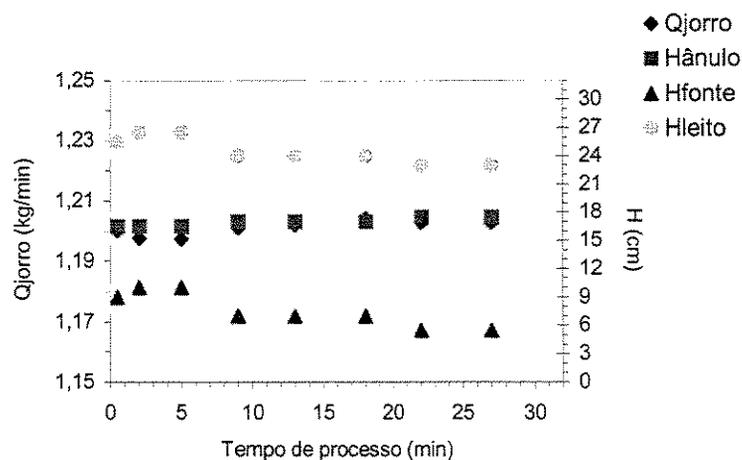


Figura C.33: Vazão de ar de jorro, altura do leito, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 20 ml/min.

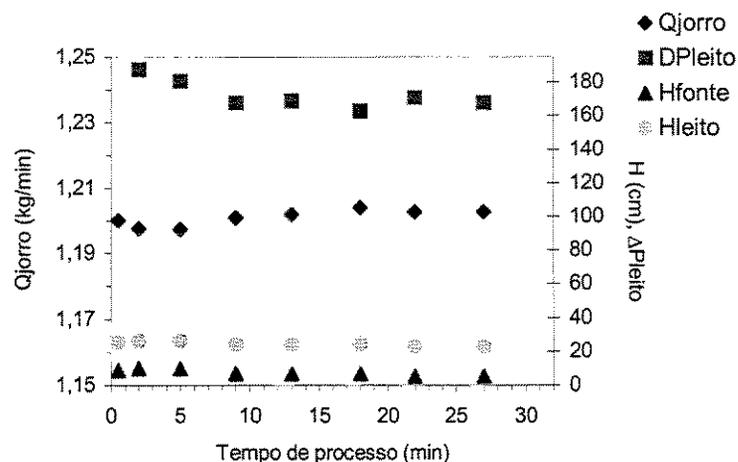


Figura C.34: Vazão do ar de jorro, queda de pressão do leito, altura da fonte e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 20 ml/min.

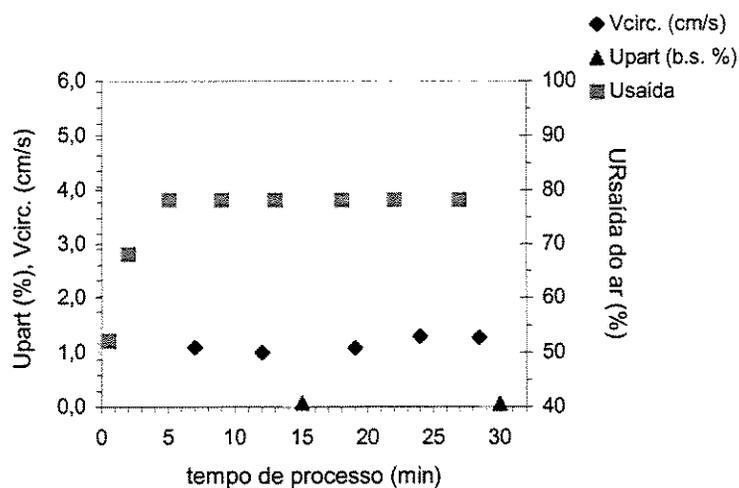


Figura C.35: Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 20 ml/min.

## \* Ensaio ESFERA -4

Condições Operacionais:  $T_{\text{entrada ar}} = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{\text{at}} = 20 \text{ psig}$ ,  $t_{\text{processo}} = 19,5 \text{ min}$   
 $W_{\text{susp}} = 22,0 \text{ ml/min}$ ,  $Q_j / Q_{j_{m,0}} = 1,09$

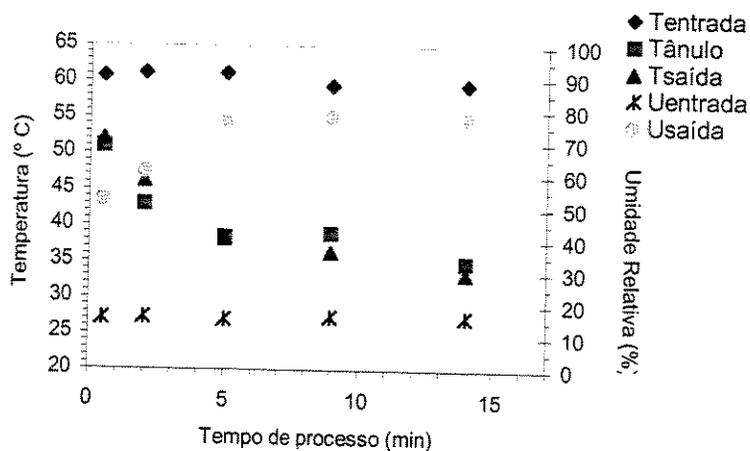


Figura C.36: Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 22 ml/min.

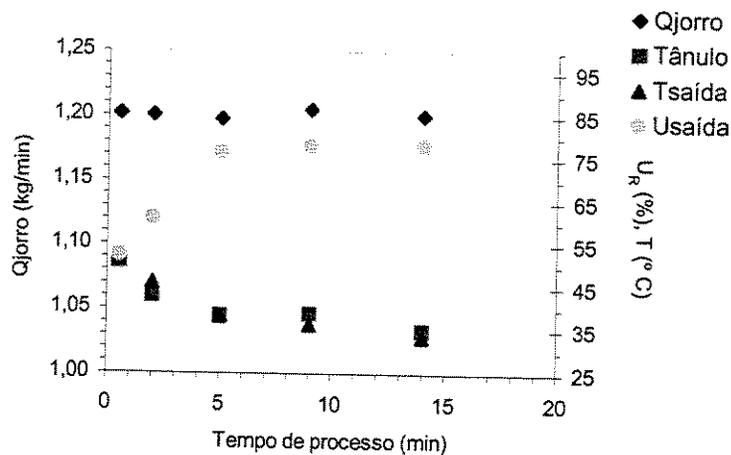


Figura C.37: Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leito e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 22 ml/min.

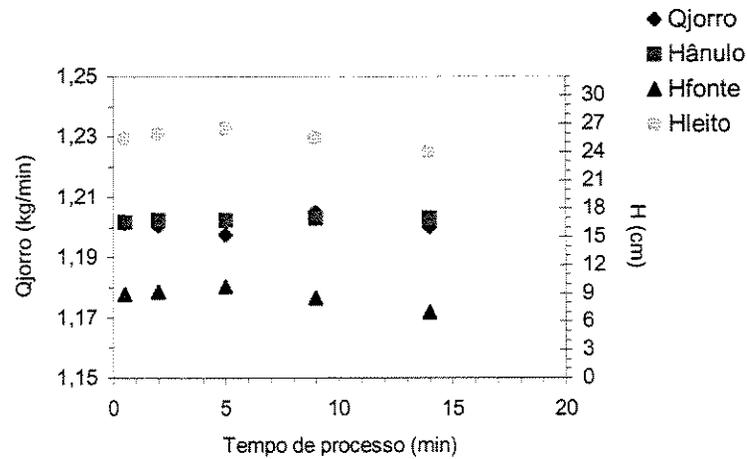


Figura C.38: Vazão de ar de jorro, altura do leite, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 22 ml/min.

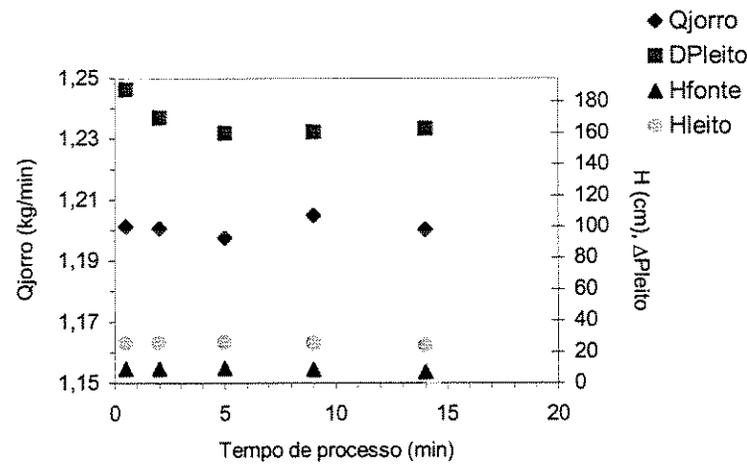


Figura C.39: Vazão do ar de jorro, queda de pressão do leite, altura da fonte e do leite em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 22 ml/min.

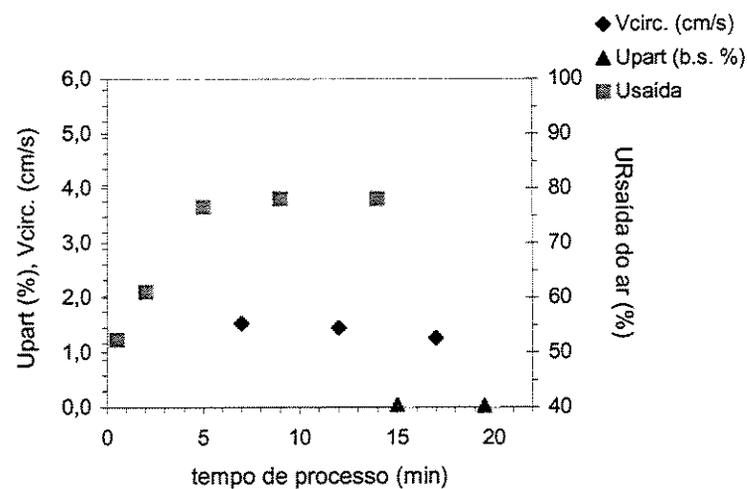


Figura C.40: Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento da Esfera à vazão de 22 ml/min.

◆ Partícula: Placebo

\* Ensaio PLACEBO - 1

Condições Operacionais:  $T_{\text{entrada ar}} = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{\text{at}} = 20 \text{ psig}$ ,  $t_{\text{processo}} = 30 \text{ min}$   
 $W_{\text{susp}} = 12,25 \text{ ml/min}$ ,  $Q_j / Q_{j,m,o} = 1,093$

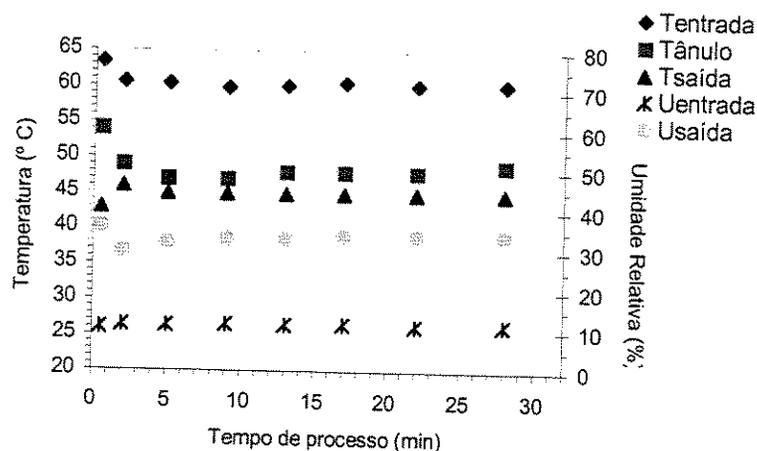


Figura C.41: Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 12,25 ml/min.

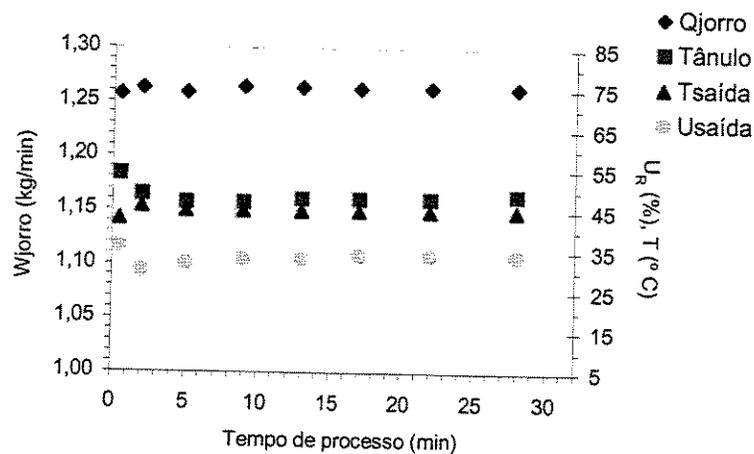


Figura C.42: Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leito e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 12,25 ml/min.

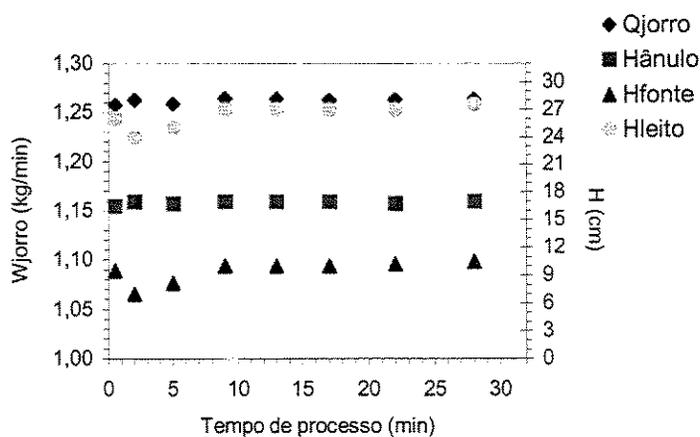


Figura C.43: Vazão de ar de jorro, altura do leito, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 12,25 ml/min.

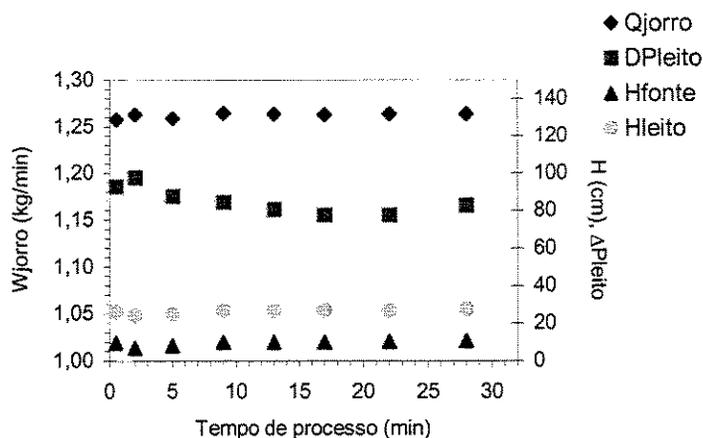


Figura C.44: Vazão do ar de jorro, queda de pressão do leito, altura da fonte e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 12,25 ml/min.

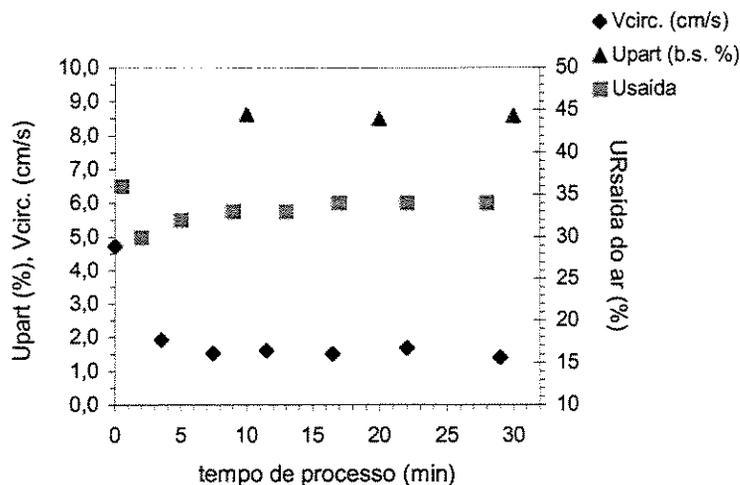


Figura C.45: Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 12,25 ml/min.

## \* Ensaio PLACEBO - 2

Condições Operacionais:  $T_{\text{entrada ar}} = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{\text{at}} = 20 \text{ psig}$ ,  $t_{\text{processo}} = 30 \text{ min}$   
 $W_{\text{susp}} = 16,0 \text{ ml/min}$ ,  $Q_j / Q_{\text{im,o}} = 1,106$

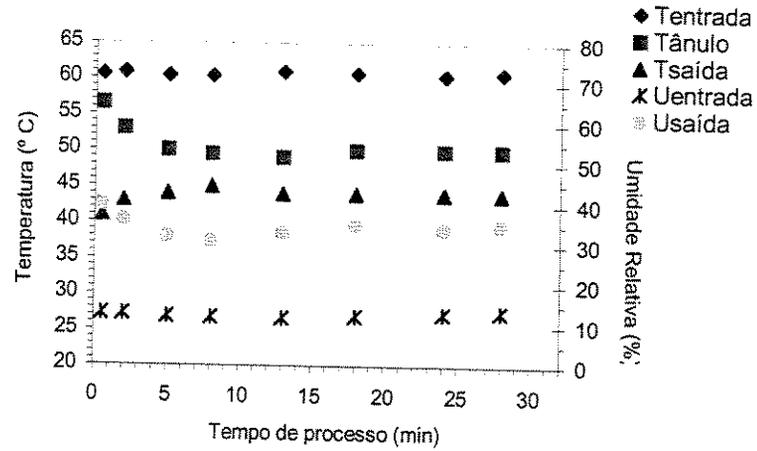


Figura C.46: Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 16 ml/min.

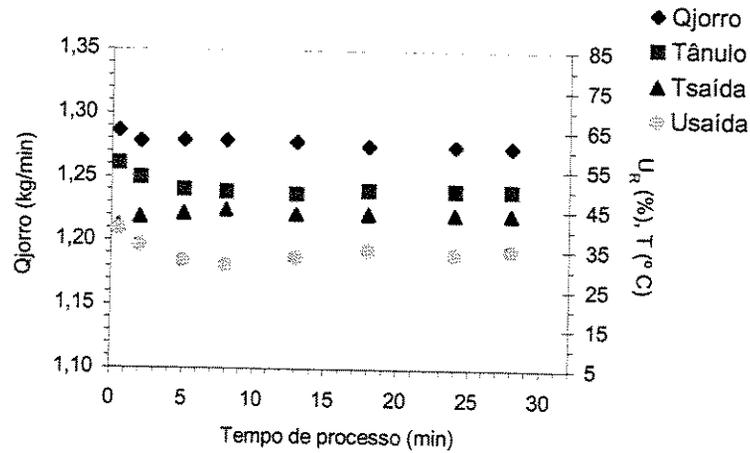


Figura C.47: Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leito e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 16 ml/min.

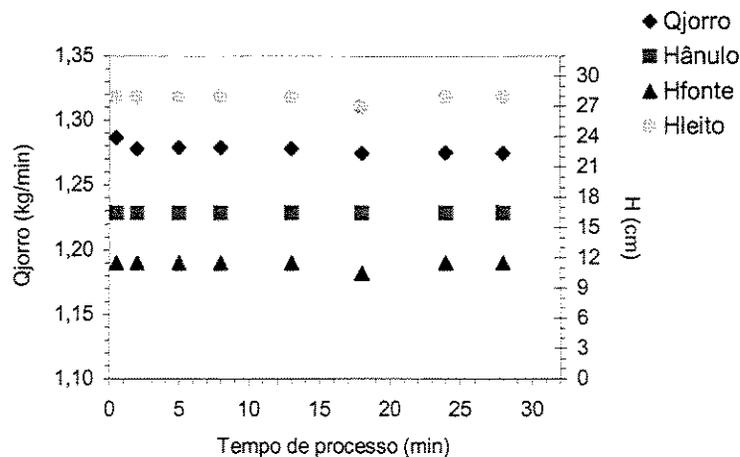


Figura C.48: Vazão de ar de jorro, altura do leito, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 16 ml/min.

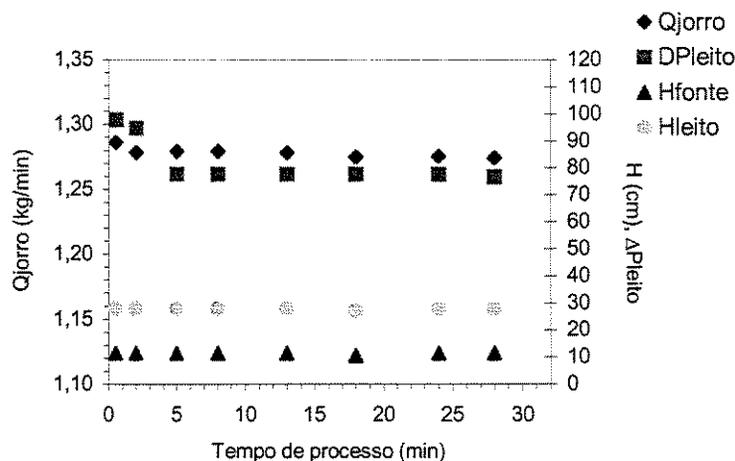


Figura C.49: Vazão do ar de jorro, queda de pressão do leito, altura da fonte e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 16 ml/min.

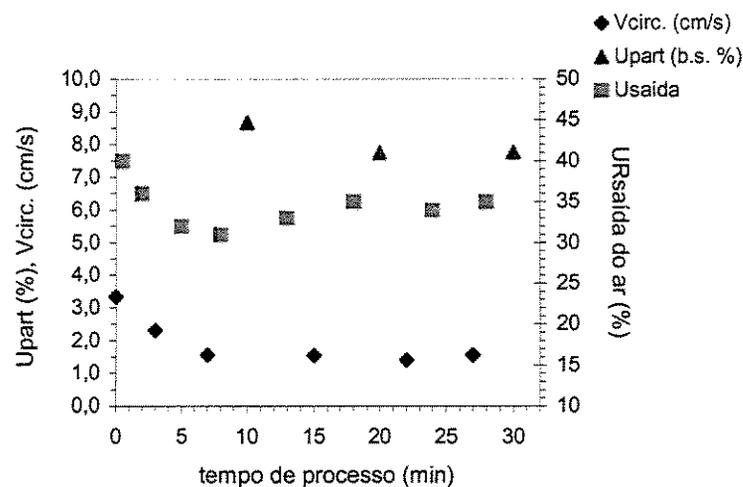


Figura C.50: Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 16 ml/min.

## \* Ensaio PLACEBO – 3

Condições Operacionais:  $T_{\text{entrada ar}} = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{\text{at}} = 20 \text{ psig}$ ,  $t_{\text{processo}} = 30 \text{ min}$   
 $W_{\text{susp}} = 18,0 \text{ ml/min}$ ,  $Q_j / Q_{j,m,o} = 1,107$

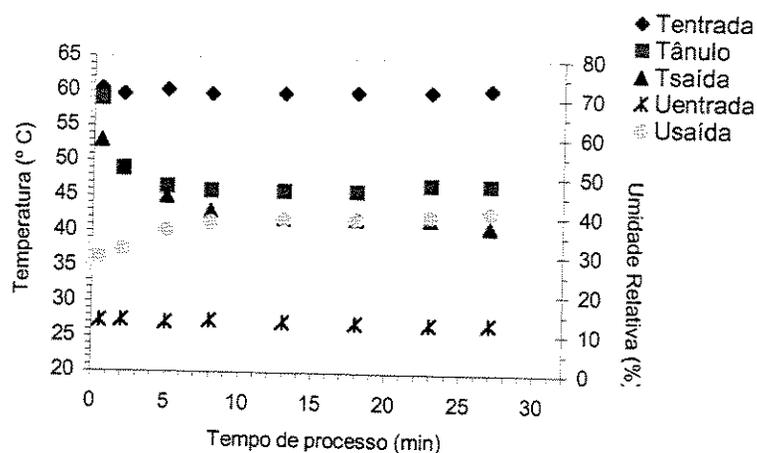


Figura C.51: Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 18 ml/min.

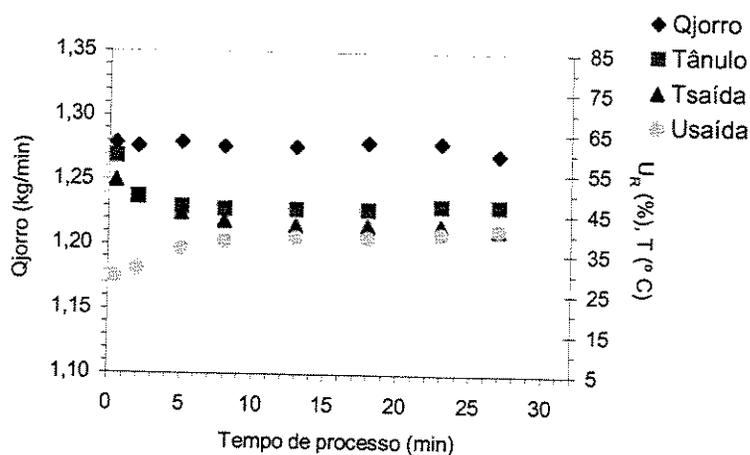


Figura C.52: Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leito e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 18 ml/min.

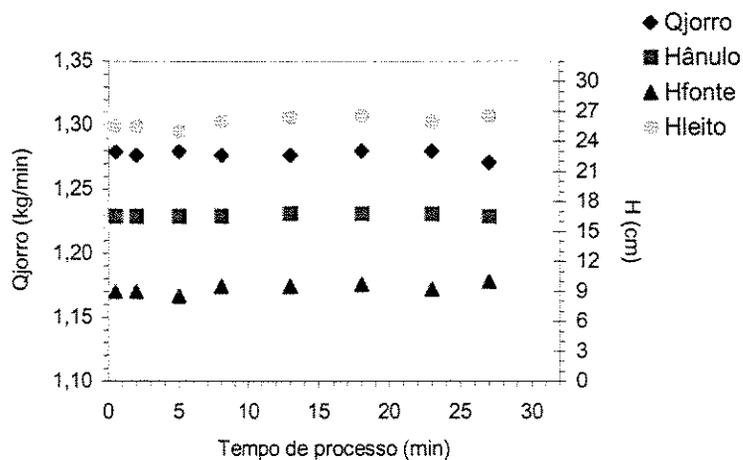


Figura C.53: Vazão de ar de jorro, altura do leito, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 18 ml/min.

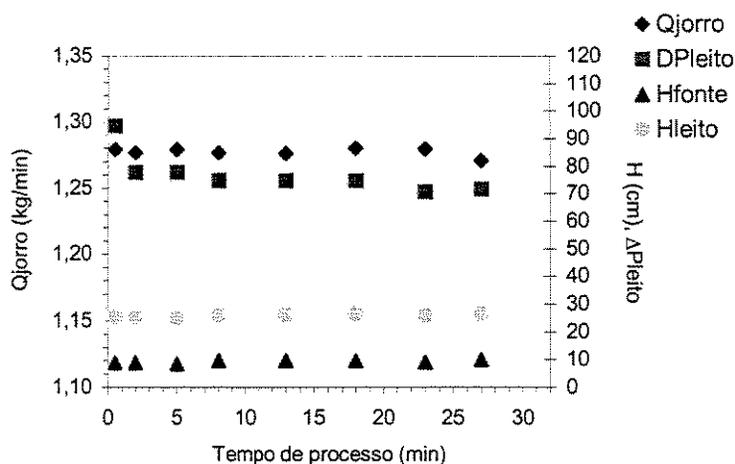


Figura C.54: Vazão do ar de jorro, queda de pressão do leito, altura da fonte e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 18 ml/min.

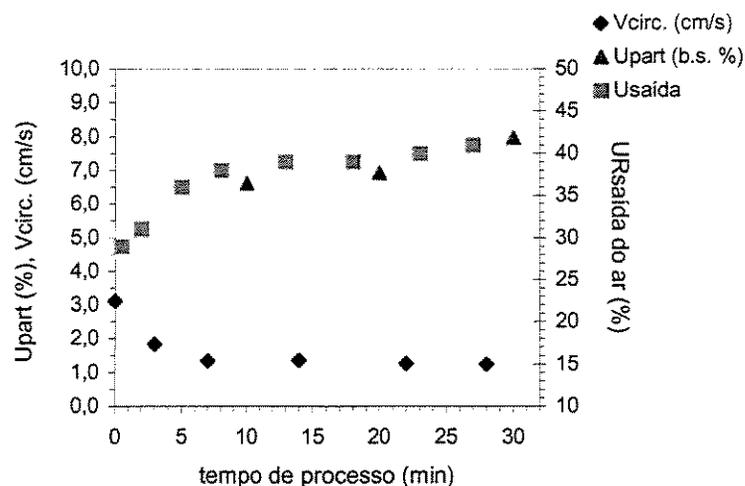


Figura C.55: Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 18 ml/min.

## \* Ensaio PLACEBO - 4

Condições Operacionais:  $T_{\text{entrada ar}} = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{\text{at}} = 20 \text{ psig}$ ,  $t_{\text{processo}} = 30 \text{ min}$   
 $W_{\text{susp}} = 20,0 \text{ ml/min}$ ,  $Q_i / Q_{j,m,o} = 1,107$

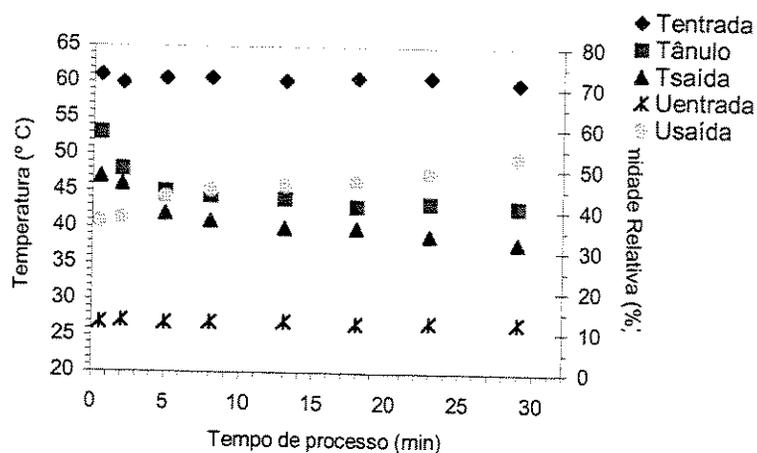


Figura C.56: Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 20 ml/min.

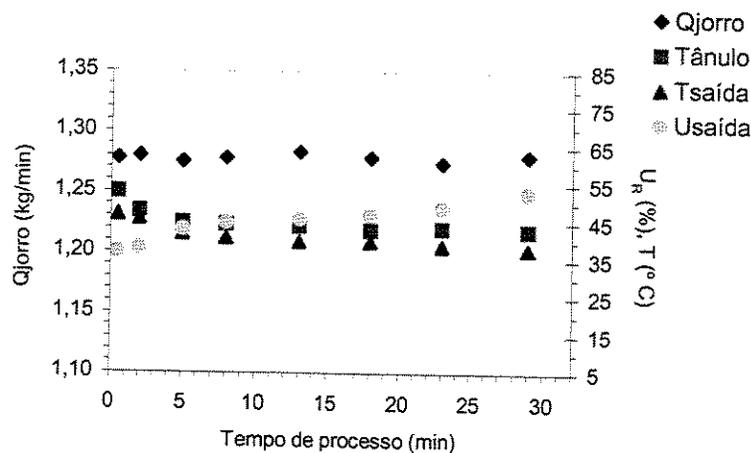


Figura C.57: Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leito e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 20 ml/min.

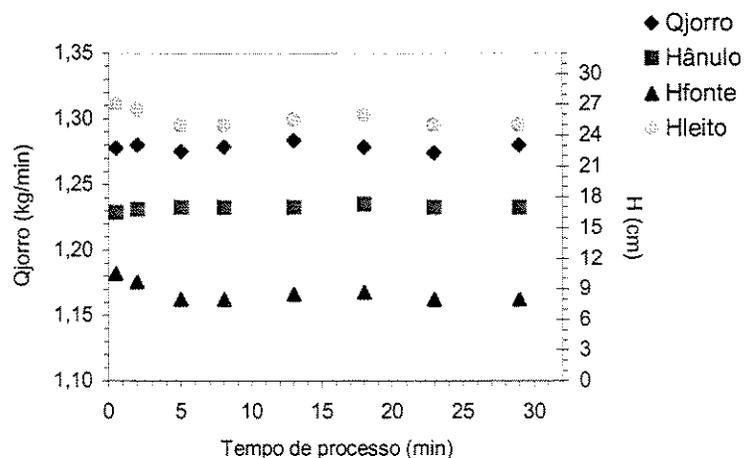


Figura C.58: Vazão de ar de jorro, altura do leito, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 20 ml/min.

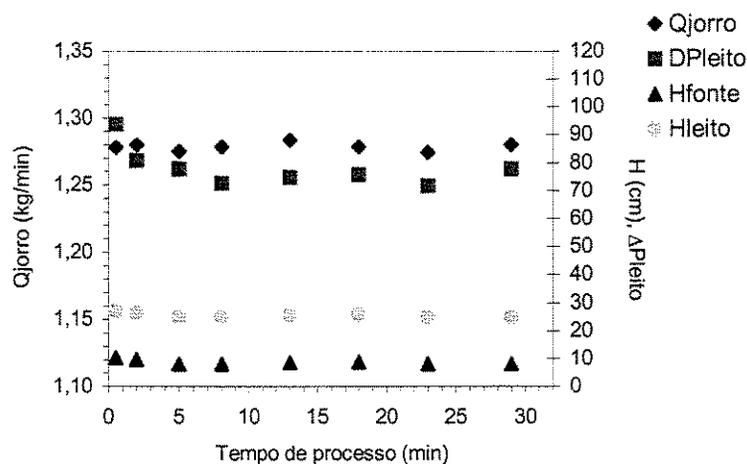


Figura C.59: Vazão do ar de jorro, queda de pressão do leito, altura da fonte e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 20 ml/min.

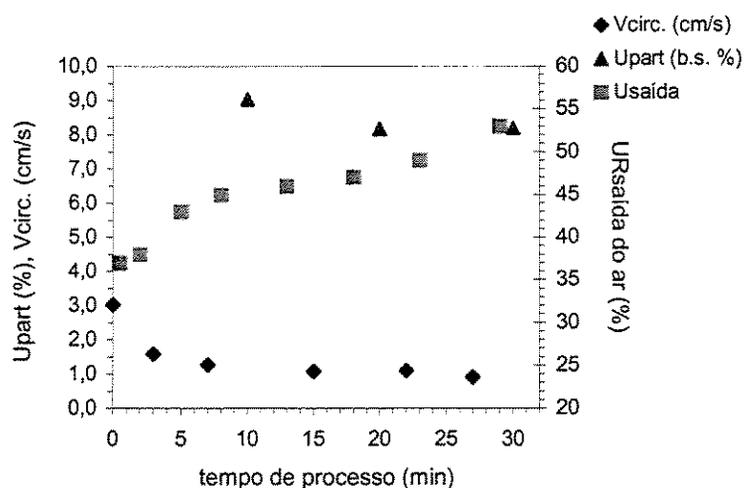


Figura C.60: Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 20 ml/min.

## \* Ensaio PLACEBO - 5

Condições Operacionais:  $T_{\text{entrada ar}} = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{\text{at}} = 20 \text{ psig}$ ,  $t_{\text{processo}} = 30 \text{ min}$   
 $W_{\text{susp}} = 21,0 \text{ ml/min}$ ,  $Q_j / Q_{j\text{m},0} = 1,100$

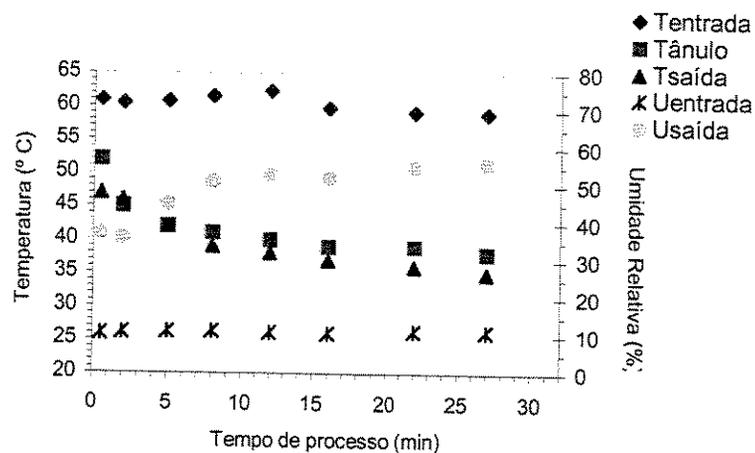


Figura C.61: Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 21 ml/min.

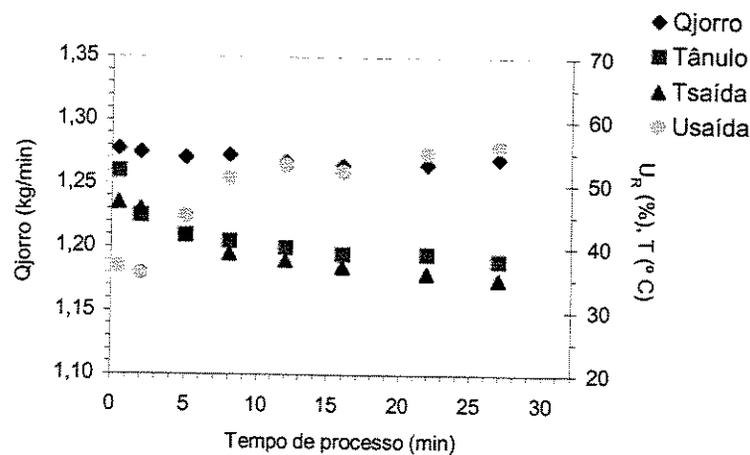


Figura C.62: Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leito e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 21 ml/min.

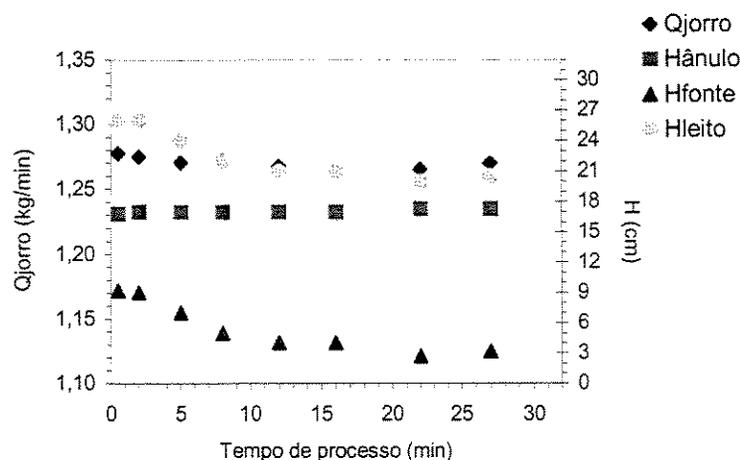


Figura C.63: Vazão de ar de jorro, altura do leito, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 21 ml/min.

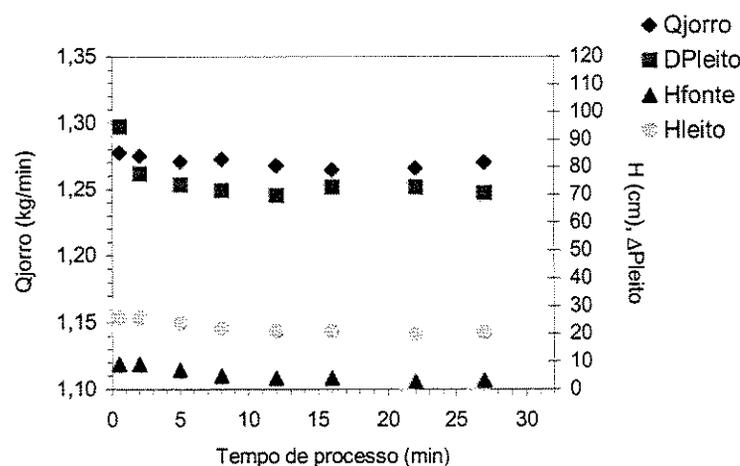


Figura C.64: Vazão do ar de jorro, queda de pressão do leito, altura da fonte e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 21 ml/min.

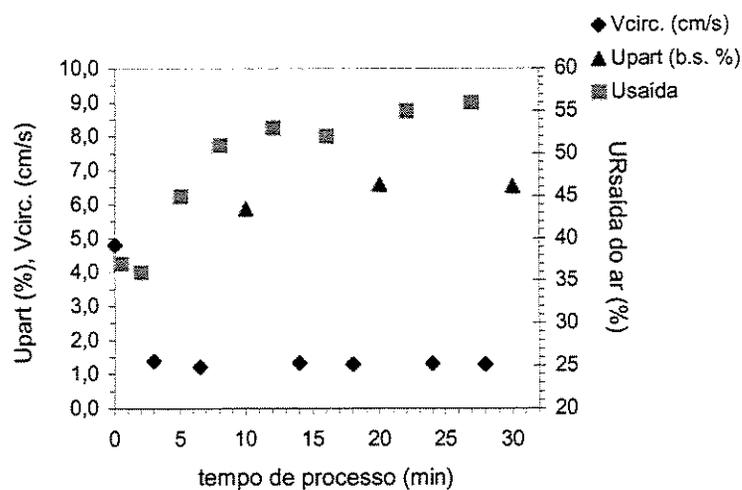


Figura C.65: Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 21 ml/min.

## \* Ensaio PLACEBO - 6

Condições Operacionais:  $T_{\text{entrada ar}} = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{\text{at}} = 20 \text{ psig}$ ,  $t_{\text{processo}} = 7,5 \text{ min}$   
 $W_{\text{susp}} = 22,0 \text{ ml/min}$ ,  $Q_j / Q_{j,m,o} = 1,116$

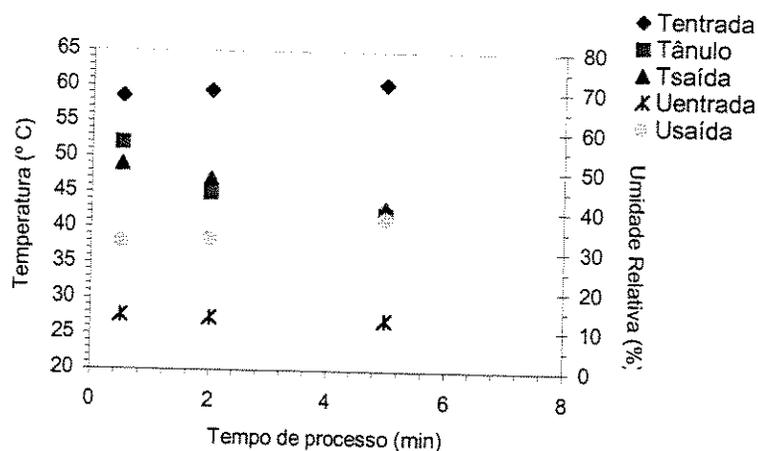


Figura C.66: Temperatura do ânulo e de entrada e de saída do ar, umidade de entrada e saída do ar do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 22 ml/min.

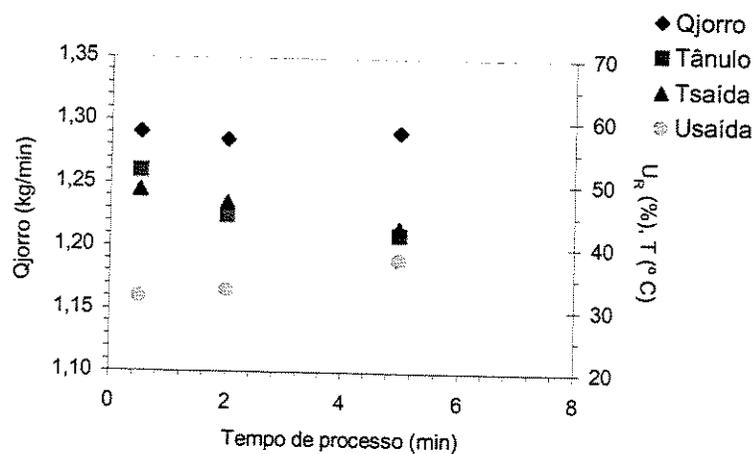


Figura C.67: Vazão de ar de jorro, umidade e temperatura do ar de saída do leito e temperatura do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 22 ml/min.

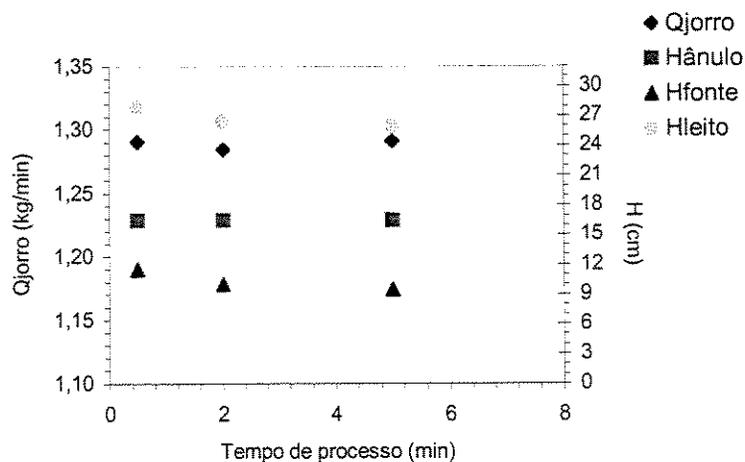


Figura C.68: Vazão de ar de jorro, altura do leito, da fonte e do ânulo em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 22 ml/min.

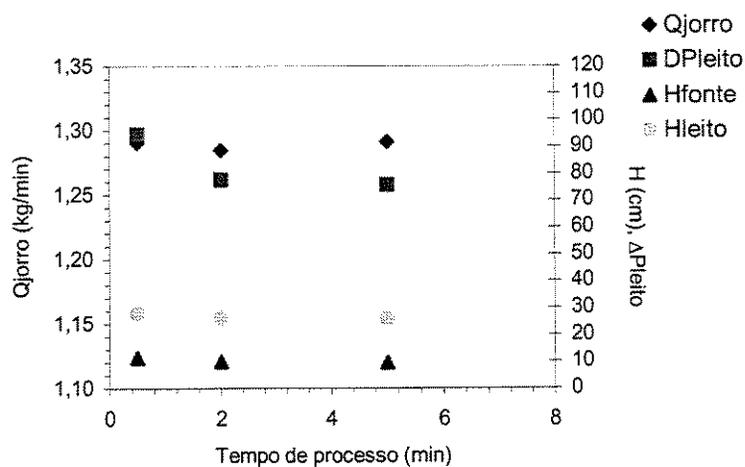


Figura C.69: Vazão do ar de jorro, queda de pressão do leito, altura da fonte e do leito em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 22 ml/min.

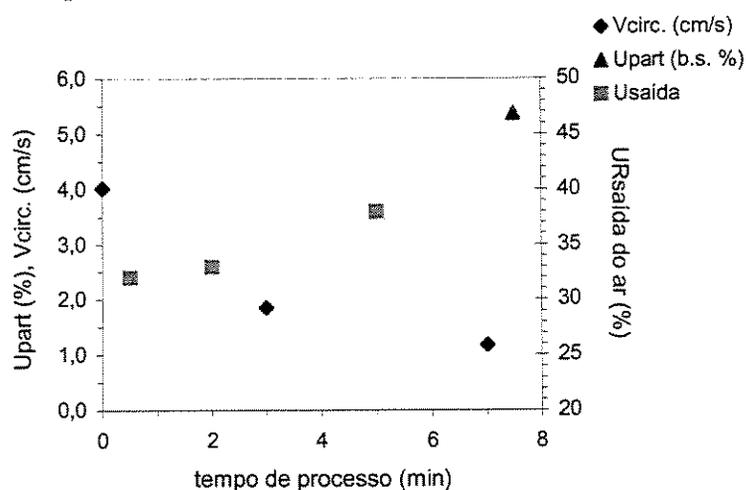


Figura C.70: Umidade da partícula, do ar de saída e velocidade de circulação da partícula em função do tempo de processo durante o recobrimento do Placebo à vazão de 22 ml/min.