



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
UNICAMP



FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS

# SECAGEM DE SISTEMAS BIOPOLIMÉRICOS EM JORRO FLUIDIZADO BIDIMENSIONAL

**HÉCTOR JOSÉ CIRO VELÁSQUEZ**

Profa. Dra. Florencia Cecília Menegalli  
Orientadora

Profa. Dra. Rosiane Lopes da Cunha  
Co-Orientadora

Tese apresentada à comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Alimentos.

CAMPINAS

2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA FEA – UNICAMP

C496s      Ciro Velásquez, Héctor José  
            Secagem de sistemas biopoliméricos em jorro fluidizado  
            bidimensional / Héctor José Ciro Velásquez. -- Campinas, SP: [s.n.],  
            2009.

            Orientador: Florencia Cecilia Menegalli  
            Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas. Faculdade  
            de Engenharia de Alimentos

            1. Xantana. 2. Carragena. 3. Reologia. 4. Jorro fluidizado. I.  
            Menegalli, Florencia Cecilia. II. Universidade Estadual de Campinas.  
            Faculdade de Engenharia de Alimentos. III. Título.

(cars/fea)

Título em inglês: Drying of biopolimeric systems in a 2D spouted bed

Palavras-chave em inglês (Keywords): Xanthan, Carrageenan, Rheology, Spouted bed

Titulação: Doutor em Engenharia de Alimentos

Banca examinadora: Florencia Cecilia Menegalli

                    Wanderley Pereira Oliveira

                    Luiz Antonio Viotto

                    Divair Christ

                    Izabel Cristina Freitas Moraes

Data de defesa: 05/09/2009

Programa de Pós Graduação: Programa em Engenharia de Alimentos

# **BANCA EXAMINADORA**

---

**Profa. Dra. Florencia Cecilia Menegalli**  
Orientadora-DEA/FEA-UNICAMP

---

**Prof. Dr. Wanderley Pereira de Oliveira**  
FCFRP/USP (membro)

---

**Prof. Dr. Luiz Antonio Viotto**  
FEA/UNICAMP (membro)

---

**Prof. Dr. Divair Christ**  
CCET/UNIOESTE (membro)

---

**Profa. Dra. Izabel Cristina Freitas Moraes**  
FZEA/USP (membro)



## **AGRADECIMENTOS**

*Às professoras Dra. Florencia Cecilia Mengealli e Dra. Rosiane Lopes de Acunha pelo tempo dedicado, sugestões e valiosa orientação.*

*À Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Engenharia de Alimentos (FEA) e ao Departamento de Engenharia de Alimentos (DEA) pelo apoio recebido.*

*Aos colegas de laboratório de Engenharia de Processos (LEP) do DEA que de alguma forma contribuíram com este trabalho. Um agradecimento especial ao Doutor Gustavo César Dacanal pela ajuda, apoio e amizade.*

*À banca examinadora pela disponibilidade e pela contribuição com este trabalho.*

*À Universidad Nacional de Colômbia-Sede Medellín, Departamento de Engenharia Agrícola e de Alimentos pela licença concedida para realizar meus estudos de doutorado.*

*À família CIRO.*

*À minha esposa Yulli Andrea Sanchez Quiceno pelo apoio em minha carreira profissional, carinho, amizade e amor. Não posso esquecer a minhas crianças Yoary Alejandra e Dylan Kyle por alegrar nossas vidas.*

*E a todas as pessoas que contribuíram de alguma forma na realização deste trabalho.*

*Muito obrigado!!*



## ÍNDICE

<b>ÍNDICE</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>XVII</b>
<b>NOMENCLATURA</b> .....	<b>XIX</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>XXI</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XXIII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>5</b>
2.1 CONSIDERAÇÕES BÁSICAS DE SECAGEM .....	5
2.1.1 Secagem em leito de jorro .....	6
2.1.2 Leitos de jorro bidimensional.....	9
2.1.2.1 Efeito das condições de secagem na qualidade do produto .....	11
2.2 POLISSACARÍDEOS OU HIDROCOLÓIDES .....	12
2.2.1 Xantana.....	13
2.2.2 Carragena .....	15
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>19</b>
3.1 MATÉRIA-PRIMA.....	19
3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS INERTES E PROPRIEDADES DE INTERFACE .....	19
3.2.1 Densidade da partícula .....	19
3.2.2 Densidade aparente ou “bulk” .....	20
3.2.3 Morfologia .....	20
3.2.4 Ângulo de contato partícula-suspensão .....	21
3.3 SECAGEM EM LEITO DE JORRO FLUIDIZADO BIDIMENSIONAL.....	21
3.3.1 Equipamento .....	21
3.3.2 Condições experimentais de secagem.....	23
3.3.3 Operação do secador.....	26
3.4 AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM .....	27
3.4.1 Desempenho do secador .....	28
3.4.1.1 Eficiência de produção ( $\eta_P$ ) do pó biopolimérico .....	28
3.4.1.2 Retenção de sólidos (RS) no leito .....	28
3.4.2 Estudo fluidodinâmico do secador.....	28
3.4.2.1 Velocidade mínima de Jorro e mínima de fluidização .....	28
3.4.2.2 Queda de pressão no leito .....	29
3.4.2.3 Altura do jorro e largura da fonte.....	30
3.4.2.4 Velocidade da partícula no leito .....	30
3.4.2.5 Distribuição de temperatura no leito .....	31
3.4.3 Propriedades do produto.....	32
3.4.3.1 Caracterização reológica.....	32

3.4.3.2 Teor de umidade final .....	35
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>37</b>
4.1 TESTES PRELIMINARES .....	37
4.1.1 Caracterização das partículas inertes .....	37
4.1.2 Velocidade mínima de jorro e fluidização usando partículas inertes de vidro .....	38
4.1.3 Velocidade mínima de jorro e fluidização usando partículas inertes de ABS .....	39
4.1.4 Estudo do colapso do leito para suspensão de $\lambda$ -carragena.....	41
4.1.5 Viabilidade de secagem da goma $\lambda$ -carragena .....	41
4.1.6 Estudo de colapso do leito para suspensão de xantana .....	42
4.1.7 Viabilidade de secagem de xantana.....	43
4.2 SECAGEM DE SUSPENSÕES DE XANTANA USANDO VIDRO E ABS COMO MATERIAL INERTE .....	44
4.2.1 Performance do secador .....	44
4.2.1.1 Efeito das condições de secagem sobre a eficiência de produção do pó.....	46
4.2.1.2 Efeito das condições de secagem sobre a retenção de sólidos .....	49
4.2.1.3 Efeito das condições de secagem sobre o teor final de umidade.....	53
4.2.2 Avaliação das características fluidodinâmicas .....	56
4.2.2.1 Efeito das condições de secagem sobre velocidade da partícula no Ânulo.....	57
4.2.2.2 Efeito das condições de secagem sobre a velocidade da partícula no jorro.....	60
4.2.2.3 Efeito das condições de secagem sobre a altura do jorro .....	61
4.2.2.4 Efeito das condições de secagem sobre a largura da fonte .....	63
4.2.2.5 Queda de pressão no leito.....	64
4.2.2.6 Distribuição de temperaturas dentro do leito .....	67
4.3 REOLOGIA DAS SUSPENSÕES DE GOMA XANTANA .....	70
4.3.1 Curvas de escoamento para xantana comercial .....	70
4.3.2 Ensaio reológico dinâmico da xantana comercial .....	73
4.3.3 Efeito das condições de secagem na reologia das suspensões de xantana em leito de jorro usando partículas de vidro como inerte .....	75
4.3.3.1 Curvas de escoamento.....	75
4.3.3.2 Ensaio reológico dinâmico.....	81
4.3.3.3 Viscosidade aparente no leito.....	86
4.4 OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE SECAGEM PARA SUSPENSÕES DE GOMA XANTANA USANDO VIDRO E ABS E EFEITOS NA QUALIDADE DO PRODUTO.....	89
4.4.1 Efeito no desempenho do secador.....	89
4.5 SECAGEM DE SUSPENSÕES DE $\lambda$ -CARRAGENA USANDO ABS COMO INERTE .....	96
4.5.1 Desempenho do secador em leito com partículas inertes de ABS.....	96
4.5.1.1 Efeito das condições de secagem sobre a eficiência de produção do pó.....	98
4.5.1.2 Efeito das condições de secagem sobre a retenção de sólidos ...	100

4.5.1.3 Efeito das condições de secagem sobre o teor final de umidade .....	103
4.6 OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE SECAGEM PARA SUSPENSÕES DE $\lambda$ -CARRAGENA USANDO ABS E EFEITOS NA QUALIDADE DO PRODUTO .....	106
4.6.1 Efeito no desempenho de secador .....	106
4.6.2 Efeito nas propriedades reológicas .....	112
4.6.2.1 Curvas de escoamento para $\lambda$ -carragena comercial.....	112
4.6.2.2 Ensaio reológico dinâmico de $\lambda$ -carragena comercial.....	114
4.6.2.3 Reologia das suspensões de $\lambda$ -carragena seca com partículas de ABS .....	117
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>121</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....</b>	<b>125</b>
<b>7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>127</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Unidade estrutural da xantana. ....	14
<b>Figura 2</b> Unidade estrutural da carragena. ....	16
<b>Figura 3</b> Diferentes tipos de carragena. ....	16
<b>Figura 4</b> Ângulo de contato (interface líquido-sólido). ....	21
<b>Figura 5</b> Vista Lateral e frontal do secador bidimensional: (A) Ventilador centrífugo; (B) Válvula globo; (C) Medidor de fluxo; (D) Aquecedor elétrico; (E) Regulador de voltagem; (F) Derivação do ar; (G) Uniformizador da linha de fluxo do ar; (H) Distribuidor de ar para o jorro e ânulo; (I) Flanges; (J) Alimentação de ar para o ânulo; (K) Leito de acrílico; (L) Ciclone; (M) Alimentação de ar para o jorro; (N) Ponto de alimentação da suspensão. ....	22
<b>Figura 6</b> Determinação da largura da fonte ( $L_f$ ) e altura máxima de jorro ( $A_j$ ) para o leito de partículas. ....	30
<b>Figura 7</b> Distribuição de temperatura no leito de jorro fluidizado bidimensional: Jorro (A) e Ânulo (B). ....	31
<b>Figura 8</b> Ângulo de contato para suspensões de goma xantana na interface sólida vidro (A) e ABS (B), respectivamente. ....	38
<b>Figura 9</b> Queda de pressão no leito com partículas de vidro: Jorro (A) e Ânulo (B). ....	39
<b>Figura 10</b> Queda de pressão no leito com partículas de ABS: Jorro (A) e Ânulo. ....	40
<b>Figura 11</b> Diagrama de Pareto para a resposta produção de pó de xantana seca com partículas inertes de vidro (A) e ABS (B). ....	46
<b>Figura 12</b> Produção de pó de xantana em função da temperatura de secagem e % de vazão de ar no jorro para diferentes vazões de suspensão de goma xantana: A (0,33 g/min), B (1,5 g/min) e C (2,7 g/min) para vidro; D (1,3 g/min), E (3 g/min) e F (4,7 g/min) para ABS. ....	48
<b>Figura 13</b> Diagrama de Pareto para a resposta retenção de sólidos de xantana seca com partículas de vidro (A) e ABS (B). ....	50
<b>Figura 14</b> Retenção de sólidos em função da temperatura de secagem e vazão de suspensão de xantana para diferentes porcentagens de ar no jorro: A (43%), B (60%) e C (77%) para vidro; D (43%), E (60%) e F (77%) para ABS. ....	52
<b>Figura 15</b> Diagrama de Pareto para a resposta teor de umidade do pó de xantana seca com partículas de vidro (A) e ABS (B). ....	53

<b>Figura 16</b> Teor final de umidade em função da temperatura de secagem e vazão de suspensão de xantana para diferentes porcentagens de ar no jorro: A (43%), B(60%) e C (77%) para vidro; D (43%), E (60%) e F (77 %) para ABS. ....	55
<b>Figura 17</b> Diagrama de Pareto para a resposta velocidade da partícula no ânulo para suspensões de xantana seca com partículas inertes de vidro (A) e ABS (B). ....	58
<b>Figura 18</b> Velocidade da partícula inerte no ânulo em função da vazão de suspensão de xantana e % de vazão de ar no jorro: Vidro (A) e ABS (B). ....	59
<b>Figura 19</b> Velocidade da partícula inerte no jorro em função da vazão de suspensão de xantana e % de vazão de ar no jorro: Vidro (A) e ABS (B). ....	60
<b>Figura 20</b> Diagrama de Pareto para a variável altura máxima de jorro (Aj) em função da partícula inerte: Vidro (A) e ABS (B). ....	61
<b>Figura 21</b> Altura de jorro ao final do processo de secagem em função das condições de processo para suspensões de xantana secas com vidro (A) e ABS (B). ....	62
<b>Figura 22</b> Largura da fonte para o leito de partículas: Vidro (A) e ABS (B). ....	63
<b>Figura 23</b> Variação da queda de pressão no leito ao longo do tempo do processo para diferentes condições de secagem de xantana usando vidro (A e B) e ABS (C e D). ....	65
<b>Figura 24</b> Formação de cavidades, estrangulamento e mudanças na geometria do jorro com tempos de defasagem de 0,03 s na secagem de xantana usando vidro (A) e ABS (B e C). ....	66
<b>Figura 25</b> Distribuição de temperatura no leito em função do tempo de secagem e posição no Jorro (J) e Ânulo (A) usando um leito de partículas de vidro (A) e ABS (B) com uma vazão de pasta de xantana de 1,5 g/min. ....	67
<b>Figura 26</b> Distribuição de temperatura no leito em função do tempo de secagem e posição no Jorro (J) e Ânulo (A): vidro (A) e ABS (B) com uma vazão de pasta de xantana de 3 g/min. ....	68
<b>Figura 27</b> Distribuição de temperatura dentro do leito de partículas inertes de vidro na secagem de xantana: A (vazão de pasta 1,5 g/min) e B (vazão de pasta 3 g/min). ....	69
<b>Figura 28</b> Curvas de escoamento para suspensões de goma xantana comercial em função da taxa de cisalhamento: Tensão (A) e Viscosidade (B). ....	71
<b>Figura 29</b> Varredura de tensão para determinar a faixa linear para as suspensões de goma xantana (1 % p/p). ....	73
<b>Figura 30</b> Características viscoelásticas de xantana comercial: A: Módulo de armazenamento ( $G'$ ) e perda ( $G''$ ) a 25°C, B: Módulos de armazenamento ( $G'$ ) e perda ( $G''$ ) a 50, 60 e 70°C e C: Tangente de perda a 25,50,60 e 70°C. ....	74

<b>Figura 31</b> Reogramas a 25°C para xantana reconstituída em função da vazão de suspensão e condições de secagem com inertes de vidro para T= 60°C e J= 60% ( $60 \text{ m}^3\text{h}^{-1}/6,7 \text{ ms}^{-1}$ ). .....	75
<b>Figura 32</b> Reogramas a 25°C para a xantana reconstituída em função da temperatura e condições de secagem usando partículas inertes de vidro para V= 1,5 g/min e J= 60% ( $60 \text{ m}^3\text{h}^{-1}/6,7 \text{ ms}^{-1}$ ).....	76
<b>Figura 33</b> Reogramas a 25°C para a goma xantana reconstituída seca com partículas inertes de vidro em função da vazão no jorro para V= 1,5 g/min e T= 60°C. ....	77
<b>Figura 34</b> Diagrama de Pareto para a viscosidade à taxa de cisalhamento zero ( $\eta_0$ ) de xantana usando partículas inertes de vidro. ....	79
<b>Figura 35</b> Viscosidade à taxa de cisalhamento zero ( $\eta_0$ ) em função da temperatura e vazão de suspensão para diferentes porcentagens de ar no jorro na secagem de goma xantana com partículas de vidro: A (43%), B (60%) e C (77 %). ....	81
<b>Figura 36</b> Módulo elástico ou de armazenamento para xantana seca usando partículas inertes de vidro em função da vazão de suspensão: T= 60°C e J=60% ( $60 \text{ m}^3\text{h}^{-1}/6,7 \text{ ms}^{-1}$ ).....	82
<b>Figura 37</b> Módulo elástico ou de armazenamento para xantana seca usando partículas inertes de vidro ( $G'$ ): A: V=1,5 g/min e J=60% ( $60 \text{ m}^3\text{h}^{-1}/6,7 \text{ ms}^{-1}$ ) a diferentes temperaturas de secagem e B: T=60°C e V=1,5 g/min a diferentes % de vazão de ar no jorro.....	83
<b>Figura 38</b> Tangente de perda ( $G''/G'$ ) para diferentes vazões de suspensão nas condições de secagem de T= 60°C e J=60% ( $60 \text{ m}^3\text{h}^{-1}/6,7 \text{ ms}^{-1}$ ) para xantana seca usando partículas inertes de vidro.....	84
<b>Figura 39</b> Tangente de perda ( $G''/G'$ ) para xantana seca usando partículas inertes de vidro a diferentes temperaturas de secagem com V=1,5g/min e J=60% ( $60 \text{ m}^3\text{h}^{-1}/6,7 \text{ ms}^{-1}$ ). ....	85
<b>Figura 40</b> Tangente de perda ( $G''/G'$ ) para xantana seca usando partículas inertes de vidro para diferentes % de vazão de ar no jorro e condições de secagem de V=1,5g/min e T=60°C. ....	85
<b>Figura 41</b> Viscosidade aparente de xantana no leito em função da vazão de suspensão e porcentagem de vazão de ar que passa pelo jorro: A (43 °C), B (60 °C) e C (77 °C).....	88
<b>Figura 42</b> Análise de desejabilidade para a secagem de xantana com leito de partículas de ABS. ....	90
<b>Figura 43</b> Análise de desejabilidade para a secagem de xantana com leito de partículas de vidro. ....	91
<b>Figura 44</b> Reograma para xantana obtida nas condições de secagem otimizadas para o leito usando partículas inertes de vidro e ABS.....	93

<b>Figura 45</b> Varredura de frequência para as suspensões de xantana obtidas pelo método de secagem com partículas inertes de ABS e vidro no ponto ótimo. ....	95
<b>Figura 46</b> Diagrama de Pareto para a produção de pó de $\lambda$ -carragena usando ABS como partícula inerte.....	98
<b>Figura 47</b> Produção de pó de $\lambda$ -carragena seca usando partículas inertes de ABS em função da temperatura de secagem e vazão de pasta para diferentes % de vazão de ar no jorro: A (43%/43 m <sup>3</sup> /h), B (60%/ 60m <sup>3</sup> /h) e C (77%/77 m <sup>3</sup> /h).....	99
<b>Figura 48</b> Diagrama de Pareto para a resposta retenção de sólidos de $\lambda$ -carragena seca usando partículas inertes de ABS. ....	101
<b>Figura 49</b> Retenção de sólidos de $\lambda$ -carragena usando um leito de partículas ABS em função da temperatura de secagem e vazão de suspensão para diferentes porcentagens de ar no jorro: A (43%/ 43 m <sup>3</sup> /h), B (60%/60 m <sup>3</sup> /h) e C (77%/77 m <sup>3</sup> /h).....	102
<b>Figura 50</b> Diagrama de Pareto para a resposta teor de umidade de $\lambda$ -carragena seca usando partículas inertes de ABS. ....	103
<b>Figura 51</b> Teor final de umidade de $\lambda$ -carragena seca usando partículas inertes de ABS em função da temperatura de secagem e vazão de suspensão para diferentes porcentagens de ar no jorro: A (43%), B (60%), C (77 %). ....	105
<b>Figura 52</b> Análise de desejabilidade para otimizar as variáveis de secagem de $\lambda$ - carragena em um leito de partículas inertes de ABS. ....	107
<b>Figura 53</b> Distribuição da temperatura do ar de secagem no leito de partículas inertes de ABS na secagem de $\lambda$ -carragena. ....	108
<b>Figura 54</b> Mapa de distribuição de temperaturas para o ponto ótimo na secagem de suspensões de $\lambda$ -carragena seca usando partículas inertes de ABS.....	110
<b>Figura 55</b> Queda de pressão no leito de partículas inertes de ABS para secagem de suspensões de $\lambda$ -carragena nas condições de otimização. ....	111
<b>Figura 56</b> Curvas de escoamento para suspensões de $\lambda$ -carragena comercial (1% p/p) em função da taxa de cisalhamento: Tensão (A) e Viscosidade (B).....	113
<b>Figura 57</b> Varredura de tensão para determinar a faixa linear para as suspensões de $\lambda$ -carragena comercial (1 % p/p). ....	115
<b>Figura 58</b> Características viscoelásticas de $\lambda$ -carragena comercial: A: Módulos de armazenamento (G´) e perda (G´´); B: Tangente de perda. ....	116
<b>Figura 59</b> Curvas de escoamento para suspensões de $\lambda$ -carragena comercial e reconstituída em condições otimizadas com partículas inertes de ABS: Tensão (A) e Viscosidade (B). ....	117

**Figura 60** Módulos de armazenamento ( $G'$ ) e de perda ( $G''$ ) para suspensão de  $\lambda$ -carragena obtida pelo processo de secagem otimizado com partículas inertes de ABS..... 118



## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> Fatores e níveis do planejamento experimental usando ABS como partícula inerte .....	24
<b>Tabela 2</b> Fatores e níveis do planejamento experimental usando vidro como partícula inerte .....	24
<b>Tabela 3</b> Matriz do planejamento experimental completo para as quatro variáveis do processo de secagem ( $2^3$ , mais 6 ensaios axiais e 2 repetições no ponto central) para vidro e ABS.....	25
<b>Tabela 4</b> Características de partículas inertes de vidro e ABS .....	37
<b>Tabela 5</b> Ângulos de contato na interface com o material inerte .....	37
<b>Tabela 6</b> Influência da vazão de alimentação de suspensão de $\lambda$ -carragena no colapso de leito .....	41
<b>Tabela 7</b> Viabilidade de secagem de suspensão de $\lambda$ -carragena usando vidro e ABS como material inerte.....	42
<b>Tabela 8</b> Influência da vazão de alimentação de suspensão de xantana no colapso de leito .....	43
<b>Tabela 9</b> Viabilidade de secagem de suspensão de xantana usando vidro e ABS como inerte .....	43
<b>Tabela 10</b> Produção de pó, retenção de sólidos e teor de umidade para as diferentes condições de secagem de suspensões de xantana usando ABS ....	45
<b>Tabela 11</b> Produção de pó, retenção de sólidos e teor de umidade para as diferentes condições de secagem de suspensões de xantana usando vidro .....	45
<b>Tabela 12</b> Coeficientes de regressão do modelo matemático codificado para a produção de pó de xantana.....	47
<b>Tabela 13</b> Coeficientes de regressão do modelo matemático codificado para prever a retenção de sólidos de xantana no leito de acordo com a partícula inerte .....	51
<b>Tabela 14</b> Coeficientes de regressão do modelo matemático codificado para prever o teor de umidade final do pó de xantana .....	54
<b>Tabela 15</b> Variáveis fluidodinâmicas avaliadas na secagem de xantana usando partículas inertes de ABS .....	56
<b>Tabela 16</b> Variáveis fluidodinâmicas avaliadas na secagem de xantana usando partículas inertes de vidro .....	57
<b>Tabela 17</b> Coeficientes de regressão do modelo matemático codificado para prever a velocidade da partícula no ânulo na secagem de xantana.....	58

<b>Tabela 18</b> Coeficientes de regressão do modelo matemático codificado para a velocidade da partícula no jorro na secagem de xantana .....	60
<b>Tabela 19</b> Coeficientes de regressão do modelo matemático para a altura de jorro na secagem de xantana em função da partícula inerte .....	62
<b>Tabela 20</b> Parâmetros de comparação dos modelos de ajuste para suspensões de xantana comercial .....	72
<b>Tabela 21</b> Coeficientes do modelo de Cross para as suspensões de xantana comercial.....	72
<b>Tabela 22</b> Parâmetros de comparação dos modelos de ajuste na secagem de xantana com partículas inertes de vidro.....	78
<b>Tabela 23</b> Coeficientes do modelo de Cross de acordo com planejamento experimental na secagem de xantana usando partículas inertes de vidro.....	79
<b>Tabela 24</b> Coeficientes de regressão do modelo matemático codificado para prever o valor de $\eta_o$ para xantana seca usando partículas inertes de vidro .....	80
<b>Tabela 25</b> Coeficientes de regressão do modelo matemático codificado para prever o valor da viscosidade aparente no leito para xantana seca usando partículas inertes de vidro .....	87
<b>Tabela 26</b> Desempenho do secador com leito de ABS e vidro no ponto de otimização .....	92
<b>Tabela 27</b> Parâmetros do modelo de Cross para suspensões de xantana seca usando partículas inertes de ABS e vidro.....	94
<b>Tabela 28</b> Produção de pó, retenção de sólidos e teor de umidade para as diferentes condições de secagem de suspensões de $\lambda$ -carragena usando ABS como material inerte .....	97
<b>Tabela 29</b> Coeficientes de regressão do modelo matemático codificado para previsão da produção de pó de $\lambda$ -carragena seca com partículas inertes de ABS.....	99
<b>Tabela 30</b> Coeficientes de regressão do modelo matemático codificado para prever a retenção de sólidos de $\lambda$ -carragena usando partículas inertes de ABS.....	101
<b>Tabela 31</b> Coeficientes de regressão do modelo matemático codificado para prever o teor de umidade final do pó de $\lambda$ -carragena seca usando partículas inertes de ABS.....	104
<b>Tabela 32</b> Desempenho do secador com leito de partículas de ABS na secagem de $\lambda$ -carragena no ponto de otimização .....	108
<b>Tabela 33</b> Coeficientes do modelo de Cross para as suspensões de $\lambda$ -carragena comercial.....	114

## NOMENCLATURA

$A_j$ :	Altura da fonte, m.
$C$ :	Circularidade da partícula, adimensional.
$d_p$ :	Diâmetro da partícula, m.
$G'$ :	Módulo de armazenamento, Pa.
$G''$ :	Módulo de perda, Pa.
$J$ :	Porcentagem de vazão que passa pelo jorro, %.
$k$ :	Índice de consistência do fluido, Pa.s <sup>n</sup> .
$L_f$ :	Largura da fonte, m.
$m$ :	Expoente do modelo de Cross, adimensional.
$m_p$ :	Massa das partículas inertes, kg.
$m_o$ :	Massa do picnômetro vazio, kg.
$m_l$ :	Massa do líquido+picnômetro, kg.
$m_{sl}$ :	Massa do picnômetro+inertes+líquido, kg.
$M_2$ :	Massa de xantana alimentada no secador, kg.
$M_1$ :	Massa de pó coletada pelo ciclone, kg.
$M_4$ :	Massa de partículas inertes com sólidos, kg.
$M_3$ :	Massa de partículas inertes lavadas, kg.
$n$ :	Índice de comportamento do fluido, adimensional.
$P$ :	Perímetro da partícula, m.
$RMS$ :	Valor quadrático médio do erro, %.
$RS$ :	Retenção de sólidos no leito, %.
$S$ :	Área de projeção da partícula, m <sup>2</sup> .
$T$ :	Temperatura de secagem, °C.
$T.U$ :	Teor de umidade, %, base seca.
$\tan(\delta)$ :	Tangente de perda, adimensional.
$t_p$ :	Tempo de deslocamento da partícula inerte no ânulo, s.
$U_{exp}$ :	Valor experimental
$U_p$ :	Valor predito pelo modelo
$V$ :	Vazão da suspensão, g/min.
$V_{mj}$ :	Velocidade mínima de Jorro, m/s.
$V_{mf}$ :	Velocidade mínima de fluidização, m/s.
$V_t$ :	Velocidade terminal da partícula inerte, m/s.
$x_p$ :	Distância de deslocamento da partícula inerte, m.
$Z$ :	fator de escala.

### Letras Gregas

$\rho_p$ :	Densidade da partícula, kg/m <sup>3</sup> .
$\rho_l$ :	Densidade do líquido de referência, kg/m <sup>3</sup> .
$\alpha$ :	Ponto axial do planejamento experimental.
$\lambda$ :	Constante de tempo de Cross, s.
$\delta$ :	Ângulo de defasagem, rad.
$\eta_p$ :	Eficiência de produção de pó, %.

$\eta_a$ : Viscosidade aparente, Pa.s.  
 $\eta_{al}$ : Viscosidade aparente no leito, Pa.s.  
 $\eta_0$ : Viscosidade a taxa de cisalhamento zero, Pa.s.  
 $\eta_\infty$ : Viscosidade a taxas de cisalhamento tendendo a infinito, Pa.s.  
 $\tau$ : Tensão de cisalhamento, Pa.  
 $\tau^0$ : Tensão máxima de oscilação, Pa.  
 $\tau_0$ : Tensão de cisalhamento residual, Pa.  
 $\dot{\gamma}$ : Taxa de cisalhamento, 1/s.  
 $\dot{\gamma}_A$ : Taxa de cisalhamento no ânulo, 1/s.  
 $\gamma^0$ : Deformação máxima, rad.  
 $\Delta V_{pa}$ : Diferencial de velocidade da partícula no ânulo, m/s.  
 $\Delta Y_{pa}$ : Distância de separação entre duas partículas no ânulo, m.

## RESUMO

Suspensões de gomas xantana e de  $\lambda$ -carragena foram secas usando um secador de leito de jorro fluidizado com partículas inertes de vidro e plásticas de ABS (acrylonitrile butadiene styrene). O processo de secagem foi avaliado quanto ao desempenho do secador (eficiência de produção de pó e retenção de sólidos), características fluidodinâmicas (velocidades da partícula inerte no jorro e ânulo, queda de pressão no leito, largura da fonte, altura máxima de jorro, distribuição de temperaturas no leito) e qualidade do produto final obtido (propriedades reológicas e teor de umidade). Um planejamento fatorial  $2^3$  com 2 pontos centrais e 6 pontos axiais e superfícies de resposta foi usado para determinar o efeito das condições de secagem (temperatura de ar, vazão de suspensão e vazão de ar no jorro e ânulo) sobre o processo e na qualidade do produto final. Os resultados mostraram que foi possível obter produto reconstituído de pó de xantana usando vidro ou ABS como inerte. No entanto, para suspensões de  $\lambda$ -carragena não foi possível a secagem com partículas esféricas de vidro devido à alta tensão superficial e baixo ângulo de contato. De acordo com os resultados do planejamento experimental, a eficiência de produção média de pó de goma xantana usando vidro como inerte foi de 28% com uma retenção de sólidos de 65%, enquanto que usando ABS a produção média foi de 45% e a retenção de sólidos de 49%, ou seja, o melhor desempenho do secador ocorreu quando ABS foi empregado como partícula inerte. Para a secagem de suspensões de  $\lambda$ -carragena com partículas de ABS a eficiência de produção média de pó foi de 23% e a retenção média foi de 71%. A variável mais relevante na secagem das suspensões de gomas xantana e carragena foi a vazão de suspensão, sendo que um aumento desta variável produziu um baixo rendimento de pó e aumentou a retenção de sólidos dentro do leito. A queda de pressão do leito apresentou uma variação periódica indicando uma instabilidade fluidodinâmica. A distribuição de temperatura no leito mostrou uma operação quase isotérmica e que o processo evaporativo ocorreu principalmente na zona do jorro e base do ânulo. A velocidade da partícula no

jorro foi dependente da vazão de ar na região do jorro, enquanto que a velocidade da partícula dentro no ânulo foi função da vazão de suspensão e também da vazão de ar que passava pelo jorro. A xantana obtida pela secagem em jorro fluidizado formou suspensões de natureza altamente pseudoplástica e com propriedades viscoelásticas de gel fraco. A vazão de alimentação da suspensão ( $\geq 1$  g/min) foi um fator importante para a preservação da qualidade reológica. A secagem de suspensões de goma xantana realizada em condições ótimas, tanto em leitos com partículas de ABS quanto de vidro, não mostrou efeito na qualidade reológica do produto. O produto reconstituído de  $\lambda$ -carragena obtido nas condições otimizadas de secagem também formou suspensões de natureza altamente pseudoplástica, porém com propriedades viscoelásticas características de suspensões altamente diluídas ( $G'' > G'$ ), mostrando valores de viscosidade, módulos elástico ( $G'$ ) e de perda ( $G''$ ) menores que o produto comercial e portanto uma perda de qualidade do produto. Nas condições de melhor desempenho do secador, as suspensões de  $\lambda$ -carragena foram mais susceptíveis a sofrer mudanças em sua estrutura molecular que a goma xantana.

**PALAVRAS CHAVE:** Xantana;  $\lambda$  Carragena; Reologia; Leito de jorro.

## ABSTRACT

Xanthan and  $\lambda$ -carrageenan suspensions were dried using a two dimensional spouted fluidized bed dryer with inert particles of glass and ABS (acrylonitrile butadiene styrene). The dryer performance (powder production and solid retention), fluid flow characteristics (particle velocity in the spout and annulus, pressure drop, fountain width, maximum spout height, distribution of temperatures inside the bed) and quality properties of final product (rheological properties and moisture content) were evaluated. A complete  $2^3$  factorial design with 2 central points and 6 axial points together with response surfaces analysis was used to determine the effect of the drying conditions (drying temperature, suspension mass flow and air flow in the spout and annulus) on the drying process and final product. The results showed that it is possible obtain a reconstituted powder of xanthan gum using glass and ABS as inert particles. However, for suspensions of  $\lambda$ -carrageenan was not possible the drying with glass spherical particles due to high superficial tension (low angle of contact). According to results of experimental design the mean powder production of xanthan gum using glass as inert was of 28% with a solid retention of 65%, whereas using ABS the mean powder production was of 45% with a solid retention of 49%, thus the best performance of the drier occurs when the bed with ABS is operated. In addition, the drying of  $\lambda$  carrageenan suspensions with ABS particles showed a mean production of 23% with a solids retention of 71%. The most significant variable in the drying of the suspensions of xanthan and  $\lambda$  carragena gum was the suspension mass flow rate where an increases produces a diminishing of the powder production increasing the solids retention in the bed. The pressure drop in the bed presented a periodic variation with the processing time indicating a hydrodynamics instability. The temperature distribution in the bed showed that annulus zone operated almost isothermally and that the spout zone and the annulus base are the zones where occurs the evaporative process. The particle velocity in the spout depends upon of the air flow in the spout, whereas the particle velocity in the annulus is function of the aeration and suspension mass flow rate. The reconstituted xanthan powder produced suspensions of highly

pseudoplastic nature and with viscoelastic weak gel properties. The suspension mass flow rate ( $\geq 1$  g/min) was a factor important to preserve its rheological quality. To xanthan gum the drying operating conditions evaluated in the optimum point showed that the inert particle (ABS and glass) not influenced on the rheological quality of the reconstituted product. The  $\lambda$ -carrageenan suspensions evaluated in the drying optimum conditions formed suspensions of highly pseudoplastic nature with viscoelastic properties of suspensions highly diluted ( $G'' > G'$ ). Also, the rheological and viscoelastic characteristics as viscosity, storage ( $G'$ ) and loss moduli ( $G''$ ) are lower than commercial gum indicating a severe loss of product quality. In the conditions of better performance of the dryer, the suspensions of  $\lambda$ -carrageenan were more sensitive to suffer changes in its molecular structure than the xanthan gum

**KEY WORDS:** Xanthan;  $\lambda$  Carrageenan; Rheology; Spouted bed.

# 1 INTRODUÇÃO

Na indústria de alimentos, os polissacarídeos são usados extensivamente como modificadores de textura e empregados fundamentalmente como espessantes, gelificantes e estabilizantes. Além disso, podem atuar como controladores de sabor e inibir a cristalização da água e açúcares. Geralmente, os polissacarídeos que são solúveis em água fria ou quente, são denominados hidrocolóides. Os hidrocolóides são polímeros com grupos hidrofílicos, podendo ser de origem vegetal, animal, microbiana ou sintética. A sua principal propriedade é a facilidade de hidratação para formar suspensões aquosas de alta viscosidade a baixos níveis de concentração.

Nos processos de obtenção de biopolímeros para sua aplicação na indústria alimentícia, uma fase importante é o processo de secagem no qual se obtém o produto na forma de pó. Porém, para materiais termosensíveis, a secagem é um processo complexo que pode ser acompanhado por reações químicas, bioquímicas e transições de fase que, de forma direta ou indireta, afetam as propriedades físicas e tecnológicas do produto.

A secagem de suspensões biopoliméricas é comumente realizada por métodos convectivos fluidodinamicamente ativa, sendo mais utilizados os sistemas por “spray drying” e os rotativos de superfície aquecida. No entanto, esses sistemas de secagem apresentam várias desvantagens como os altos custos de manutenção, elevado consumo de energia e altos requerimentos de instalação.

Uma alternativa aos processos de secagem de pastas, suspensões e líquidos de alto peso molecular seria a utilização de sistemas de leitos fluidizados com partículas inertes e suas modificações. Os sistemas de leitos de jorro com partículas inertes têm sido bem sucedidos na secagem de líquidos biológicos, sendo considerados como uma tecnologia eficiente na indústria de alimentos, química e farmacêutica. O sucesso é originado fundamentalmente pela elevada área interna de troca térmica e ao curto tempo de contato partícula-ar na zona de jorro (região central) e ao longo tempo na zona de descida (região do ânulo).

O secador de leito de jorro bidimensional é uma variação de leito de jorro convencional. Este consiste em uma base retangular com uma abertura central para a entrada do ar conhecida como a zona de jorro e de entradas laterais para aeração do espaço anular. Esta geometria retangular elimina as desvantagens de aumento de escala ou “scale-up” exibidas pela geometria cônico-cilíndrica, aumenta a capacidade de evaporação e tem sido usada na secagem de diferentes produtos tais como cereais (PRACHAYAWARAKORN et al., 2006), clara de ovo (CHRIST, 2006), e suspensões biopoliméricas (CUNHA et al., 2000).

Para materiais termossensíveis, o tipo de secador, juntamente com as condições operacionais utilizadas afetam de forma significativa as propriedades físicas, tais como as características reológicas e estruturais e, conseqüentemente, os atributos de qualidade do produto final obtido. Comercialmente, os polissacarídeos são disponíveis na forma de pó com diferentes tamanhos de partícula, são dispersos e solubilizados em meio aquoso e incorporados ao alimento.

As características de reidratação e solubilidade de um material em pó são influenciadas pelas mudanças físicas e químicas induzidas pelo processo de secagem. As propriedades estruturais dos produtos em pó, como tamanho e distribuição granulométrica, determinam o grau de dispersão, propriedades de associação com outros componentes, taxa de dissolução e hidratação do produto num solvente. Estas características são incorporadas no alimento definindo assim seu aroma, sabor, textura e aparência.

Considerando-se a pouca informação científica em relação aos efeitos nas características e propriedades físicas dos polissacarídeos, quando são submetidos a secagem especialmente em um sistema de leito de jorro bidimensional usando partículas inertes, este trabalho teve como objetivo geral avaliar a performance do secador e as características de qualidade dos biopolímeros xantana e  $\lambda$ -carragena em diferentes condições de temperatura, vazão de pasta e condições fluidodinâmicas de secagem.

Dessa maneira, os objetivos específicos deste trabalho podem ser divididos em:

1. Estudar o desempenho do secador de leite de jorro fluidizado quanto a produção de pó, retenção de sólidos, queda de pressão, altura de jorro, largura da fonte, velocidade da partícula e distribuição de temperatura.
2. Caracterizar as propriedades de qualidade de pó de xantana e  $\lambda$ -carragena quanto ao teor de umidade e propriedades reológicas, assim como relacionar estas propriedades com as variáveis de processo.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Considerações básicas de secagem

A secagem é tradicionalmente definida como uma operação unitária que converte um material sólido, semi-sólido ou líquido num produto sólido de menor teor de umidade (BAKER, 1997). O processo de secagem de alimentos, além de aumentar sua vida útil, tem como objetivo produzir e desenvolver produtos com características únicas de cor, sabor, aroma, textura e tamanho (volume e peso), além de obter produtos de ótimo valor nutricional e organoléptico, facilitando os processos de embalagem, transporte, distribuição e armazenamento (ACHANTA e OKOS, 2000; BARBOSA-CANOVAS e VEGA-MERCADO, 1996).

O processo de secagem em alimentos e materiais biológicos é de natureza complexa, envolvendo um conjunto de características de transporte de momento e massa bem como transferência de calor em regime transiente, dificultando o controle de muitas transformações e/ou alterações físicas, químicas e bioquímicas (CRAPISTE e ROTSTEIN, 1997; RAMASWAMI e MARCOTTE, 2006; STRUMILLO e KUDRA, 1986)

Existe uma ampla diversidade de projetos envolvendo secagem nas diferentes indústrias, onde quase 90% dos secadores são de natureza convectiva, ou seja, usam ar quente como meio direto para evaporar a água do produto (AVERSA et al., 2007). Os secadores podem ser classificados dependendo do método de transferência de calor, classe de equipamento de secagem, método de transporte do produto, natureza e estado da matéria-prima, condições de operação e dos tempos de residência (CRAPISTE e ROTSTEIN, 1997; MUJUMDAR, 2006). Algumas características, como toxicidade e volatilidade, também devem ser consideradas (STRUMILLO e KUDRA, 1986).

### 2.1.1 Secagem em leito de jorro

Os secadores de leito de jorro são classificados como sistemas fluidodinamicamente ativos de natureza convectiva, onde a movimentação das partículas é resultado da força exercida pelo jato de ar fornecido sobre as mesmas (STRUMILLO e KUDRA, 1986)

O secador de leito de jorro é uma versão modificada do sistema de secagem de leito fluidizado convencional que consiste, de forma geral, de uma coluna cônico-cilíndrica de base inclinada com uma entrada central o jato de ar aquecido. Este sistema de secagem tem uma capacidade volumétrica (ou evaporativa) limitada e apresenta problemas de “scale-up” do equipamento (KUDRA et al., 1989). Essa tecnologia foi desenvolvida visando solucionar alguns problemas, como por exemplo, queda excessiva de pressão, baixa qualidade de fluidização para alguns produtos particulados, aglomeração de partículas finas, problemas térmicos da placa distribuidora (derretimento), entre outros (PALLAI et al., 2006). Considera-se que a secagem em um leito de jorro é apropriada para partículas grossas, especialmente as densas e grandes, definidas com a classe “D”, de acordo com a classificação de Geldart (DEVAHASTIN e MUJUMDAR, 2003; GUPTA e SATHIYAMOORTHY, 1999; KUNII e LEVENSPIEL, 2003)

Vários pesquisadores estudaram a fluidodinâmica do leito de jorro, determinando diversas características como a queda e gradientes de pressão no ânulo e jorro, velocidades mínimas de jorro, alturas máximas de jorro estável, circulação e movimentação das partículas do leito (AQUINO FILHO, 1995; DEVAHASTIN e MUJUMDAR, 2003; EPSTEIN e GRACE, 1997; GUPTA e SATHIYAMOORTHY, 1999; KEEY, 1992; MAIALLE, 1996; OLIVEIRA e PASSOS, 1997; SCHNEIDER e BRIDGWATER, 1993; TARANTO, 1992; TRINDADE et al., 2004; ZANOELO, 1994; ZHONG et al., 2006b). O início da circulação dos sólidos, em um leito de jorro, acontece quando a vazão de ar torna-se suficiente para arrastar pneumáticamente as partículas para cima do nível do leito através de uma região de menor porosidade. Nas condições de jorro (fase diluída), as partículas atingem o topo do leito com velocidade necessária para desenvolver uma fonte, onde o ar e as partículas deslocam-se na mesma direção. Nesta região, as

partículas são desaceleradas até atingirem a velocidade terminal e, passado este ponto, as partículas mudam de direção, retornando à superfície do ânulo. A fonte é caracterizada pela aglomeração e colisão de sólidos e as trajetórias descendentes das partículas aproximam-se a uma curva parabólica. Na interface entre o jorro e a região anular (fase densa), a maior parte dos sólidos desloca-se para baixo e só na região da base invertem seu sentido de movimento, retornando ao deslocamento ascendente (fase diluída). A região do ânulo age de maneira similar a um leito empacotado naturalmente. As partículas sólidas percorrem lentamente em direção ao fundo do leito, em sentido contracorrente com o gás, até atingir novamente a região do jorro. Este padrão cíclico de escoamento de sólidos contribui para melhorar o contato gás-sólido.

A secagem em leito de jorro tem sido aplicada com sucesso em materiais altamente sensíveis ao calor, tais como alimentos, fármacos e plásticos, devido ao curto tempo de residência da partícula na zona central (jorro) na qual existe a maior taxa de transferência de calor, massa e de momento e ao relativamente longo tempo de residência na zona anular (PRACHAYAWARAKORN et al., 2006). Esta tecnologia pode ser usada tanto nos processos de recobrimento, aglomeração e granulação de partículas quanto na secagem de soluções, suspensões e pastas usando partículas inertes (BARRET e FANE, 1990; BENALI e AMAZAUS, 2006; CORDEIRO e OLIVEIRA, 2005; COSTA et al., 2001; CUNHA et al., 2000; CHRIST, 2006; DONIDA e ROCHA, 2002; DONIDA, 2004; GRBAVCIC et al., 2000; KUTSAKOVA, 2004; MAIALLE et al., 2002; MARRETO et al., 2006; MEDEIROS, 2001; MEDEIROS et al., 2002; OCHOA MARTINEZ et al., 1993; OLIVEIRA et al., 1997; OLIVEIRA e PASSOS, 1997; PAGLIARUSSI et al., 2006; PASSOS et al., 1997; PASSOS e MUJUMDAR, 2000; PAULO FILHO, 2006; RÉ e FREIRE, 1990; SCHNEIDER e BRIDGWATER, 1990; SCHNEIDER e BRIDGWATER, 1993; TARANTO et al., 1997; TIA et al., 1995; TRINDADE et al., 2004; SHUHAMA et al., 2003; SZENTMARJAY, 1995; VIEIRA et al., 2004).

O uso de partículas inertes na secagem de pastas, soluções e suspensões ou produtos líquidos é uma técnica relativamente nova na produção de materiais em pó (LAW e MUJUMDAR, 2006) e foi inicialmente desenvolvida para a secagem

de pigmentos, produtos químicos e biomateriais (BENALI e AMAZOUZ, 2006; GRBAVCIC et al., 2000). De acordo com Kutsakova (2004) esta técnica é considerada como uma das tecnologias de secagem de líquidos mais eficientes usadas na indústria de alimentos, química e farmacêutica, pela elevada área de troca térmica (PALLAI et al., 2006) e pela capacidade de operar de forma contínua se as partículas inertes são grossas e pesadas (GUPTA e SATHIYAMOORTHY,1999).

Além do jorro convencional e do leito fluidizado, Vukovic et al. (1984), classifica os diferentes regimes obtidos: Jorro aerado: a velocidade no ânulo desde a base até o topo é menor que a velocidade mínima de fluidização; Jorro fluidizado: o ânulo é parcialmente fluidizado, a altura no leito em que a velocidade no ânulo iguala-se à velocidade mínima de fluidização depende da vazão externa no leito. Neste caso, apresenta-se um leito fluidizado no topo conjuntamente com um jorro aerado; Jato em leito fluidizado: o ânulo é totalmente fluidizado com a velocidade de entrada do ar no ânulo igual ou superior à velocidade mínima de fluidização. O jato penetra totalmente no leito.

O termo leito de jorro fluidizado é uma modificação do leito de jorro convencional que se refere a vários sistemas bifásicos (fluido/partícula). Neste sistema a vazão total de ar é dividida entre as regiões do ânulo e do jorro, ou seja, o fluido é também fornecido à região anular promovendo a sua fluidização e atenuando alguma tendência na formação de zonas estagnadas ao longo da base da coluna. Assim, o leito de jorro fluidizado envolve a alimentação do fluido através de um orifício único central como um leito de jorro convencional e uma alimentação adicional através de um distribuidor na base como um leito fluidizado.

A técnica de secagem de suspensões com leito de jorro fluidizado envolve o processo de fluidização ou de jorro/ou ambos efeitos sobre uma camada de partículas inertes com ar aquecido. O material de natureza líquida é distribuído sobre as partículas inertes formando uma camada fina sobre elas. O ar aquecido seca o filme formado, que se torna frágil, e fratura devido ao atrito fornecido pelo choque entre as partículas. Assim, o material que foi removido pelas colisões é

elutriado e coletado externamente, enquanto as partículas inertes permanecem em circulação no leito (BARRET e FANE, 1990; KEEY,1992).

No processo de secagem de leito de jorro fluidizado usando partículas inertes, o calor necessário para evaporar a água é fornecido pelo calor sensível do ar aquecido e, indiretamente, pelas partículas aquecidas (PASSOS e MUJUMDAR, 2000). As partículas inertes devem ser selecionadas levando-se em consideração o material a ser seco, a capacidade calorífica do inerte e resistência ao atrito, sendo esta última importante para proteger o produto final de impurezas (STRUMILLO e KUDRA,1986). Embora o processo de secagem usando partículas inertes em leito de jorro fluidizado tenha mostrado muitas vantagens, as aplicações em nível comercial são questionáveis por causa de vários problemas operacionais, tais como: aglomeração (em materiais pegajosos), instabilidades fluidodinâmicas, acumulação de material em pó na câmara de secagem e dificuldades de “scale-up” (MARRETO et al., 2006).

Segundo Passos e Mujumdar (2000), as principais variáveis de operação num processo de secagem em leitos de jorro fluidizado com partículas inertes são a temperatura de entrada e a vazão do ar, as quais controlam a transferência de calor e as taxas de circulação de sólidos. A vazão do material para secagem e a massa das partículas inertes controlam o mecanismo de remoção do recobrimento e, conseqüentemente, a estabilidade do leito. A taxa de remoção do recobrimento deve ser maior ou igual à taxa de alimentação do material de secagem, para evitar o colapso do leito (BARRET e FANE, 1990). O acúmulo do material provoca a redução da velocidade das partículas inertes até atingir uma movimentação nula e o leito é bloqueado (ARSENIJEVI et al., 2002).

### **2.1.2 Leitos de jorro bidimensional**

O secador de leito de jorro fluidizado bidimensional consiste de uma base retangular com paredes planas verticais, uma abertura central para a entrada do ar aquecido e uma base inclinada para eliminar zonas estagnadas. Nesta última, usa-se aeração para aumentar a eficiência do processo (KALWAR et al., 1990; KUDRA et al., 1989; MAIALLE, 1996). A distribuição do tempo de residência num

secador de leito de jorro bidimensional é mais uniforme do que num secador de leito de jorro cônico-cilíndrico e a uniformidade de secagem é maior (PALLAI et al., 2006). A geometria retangular elimina as desvantagens do “scale-up” exibidas pela geometria cônico-cilíndrica e aumenta a capacidade de evaporação (KALWAR et al., 1992; PASSOS et al., 1993; RAGHAVAN et al., 1998; ZHONG et al., 2006a).

O leito de jorro fluidizado bidimensional modificado, particularmente com a introdução de um “*draft tube*” tem sido usado em secagem de cereais (KALWAR e RAGHAVAN, 1993; MADHIYANON et al., 2000; PRACHAYAWARAKORN et al., 2006; TULASIDAS et al., 1993; ZHONG et al., 2006a, ZHONG e ZHANG, 2005). Além do uso na secagem de cereais, o leito de jorro bidimensional tem sido utilizado no recobrimento de partículas (AYUB, 1997; DONIDA, 2004; DONIDA e ROCHA, 2002; ROCHA et al., 1995; TARANTO, 1992; QUEIROZ FILHO, 1997; TARANTO et al., 1997), na secagem de polissacarídeos (CUNHA et al., 2000), clara de ovo (CHRIST, 2006), polpa de manga (CUNHA et al., 2006) e suspensões de feijão (FERREIRA et al., 2002).

Vários trabalhos em estudos da fluidodinâmica, mudança de escala e transferência de calor têm sido efetuados em sistemas de leitos de jorro bidimensionais com suas modificações (ANABTAWI et al., 1992; ANABTAWI, 1998; AQUINO FILHO, 1995; COSTA, 1998; COSTA e TARANTO, 2003; KUDRA et al., 1989; KUDRA et al., 1990; PASSOS, 1991; PASSOS, et al., 1993; PRACHAYAWARAKORN et al., 2006; SHIRVANIAN e CALO, 2004; SWASDISEVI et al., 2005; TARANTO et al., 1997; TARANTO, 1992; TUSALIDAS et al., 1993; ZANOELO, 1994; ZANOELO et al., 2004; ZHONG et al., 2006a; ZHONG e ZHANG, 2005). Os resultados mostram que os valores dos coeficientes de convecção de calor são maiores na zona de jorro do que no ânulo e que a velocidade superficial tem uma importância significativa para a região do jorro e pouco efeito na região do ânulo. Segundo esses trabalhos, é possível realizar o “scale-up” utilizando-se correlações para queda de pressão, velocidade mínima de jorro e altura máxima de estabilidade do leito em função de algumas características geométricas do secador e propriedades termofísicas do sistema gás-partícula obtidas para o sistema bidimensional.

### 2.1.2.1 Efeito das condições de secagem na qualidade do produto

Existe pouca informação sobre os efeitos do processo de secagem na qualidade do produto obtido pela secagem de suspensões em leitos de jorro bidimensionais.

Cunha et al. (2000) secaram suspensões de goma xantana a uma temperatura de 70°C e velocidades de ar no jorro de 8,9 m/s e no ânulo de 1,1 m/s. Os resultados indicaram que as suspensões reconstituídas de goma xantana apresentaram um menor valor dos módulos elásticos ( $G'$ ) e de perda ( $G''$ ), porém adquirindo uma estrutura mais rígida e ordenada. Além disso, as medições da dispersabilidade da suspensão mostraram que o produto reconstituído apresentava um menor tempo de dispersão quando comparado com a suspensão comercial, indicando melhora da solubilidade.

Christ (2006) secou suspensões de clara de ovo de forma contínua utilizando diferentes condições de temperatura de secagem, vazão de pasta e vazão de ar no jorro e ânulo. Os resultados mostraram que as variáveis que mais influenciaram nas características do produto foram a temperatura de secagem e a vazão de pasta. O processo de secagem a altas temperaturas levou a uma diminuição da solubilidade protéica e desnaturação parcial das proteínas, porém baixas vazões de suspensão associadas a elevadas temperaturas afetaram o desenvolvimento da estrutura do gel, o que foi observado nos valores baixos de módulo elástico ( $G'$ ).

Usando partículas inertes de vidro, Cunha et al. (2006) secaram polpa de manga em batelada em uma concentração de 11° Brix a temperaturas de 55-75°C, vazão de pasta de 0,5-2,5 g/min, velocidades de ar no jorro de 6-6,6 m/s e no ânulo de 1,8-1,9 m/s. Os resultados mostraram que a temperatura foi a variável de maior influência no processo de secagem juntamente com o tempo de processamento. O produto reconstituído mostrou uma tendência de escurecimento (degradação de cor) com uma perda elevada de vitamina C e carotenóides.

Pasta de feijão preto foi seca em um leito de jorro bidimensional usando polipropileno como partícula inerte a diferentes temperaturas de secagem (42-

60°C), diferentes concentrações (0,25-1 gramas de sólidos por 100 g) e vazão de pasta (4-20 ml/min) (FERREIRA et al., 2002). Os resultados mostraram que as condições de secagem não influenciaram na distribuição de tamanho das partículas do produto havendo uma acentuada retenção de sólidos para diâmetros maiores de 220 µm no secador. Por outro lado, houve uma significativa redução do teor de umidade do pó a elevadas temperaturas de secagem.

## **2.2 Polissacarídeos ou hidrocolóides**

Polissacarídeos são macromoléculas formadas pela união de vários monossacarídeos através de ligações glicosídicas. Estes compostos apresentam uma massa molecular muito elevada, a qual depende do número de unidades de monossacarídeos que se unem e do número de cadeias moleculares secundárias (LEFEBVRE e DOUBLIER, 2005). Podem ser hidrolisados a polissacarídeos de menor massa molecular, podendo chegar a dissacarídeos ou monossacarídeos mediante a ação de determinadas enzimas (NUSSINOVITCH, 1997).

A estrutura de um polissacarídeo pode ser linear ou ramificada, sendo que o grau de substituição determina sua viscosidade, solubilidade em água e propriedades gelificantes (STHEPEN e CHURM, 2006). Assim, a principal propriedade dos hidrocolóides é a sua facilidade de hidratação para produzir suspensões aquosas de alta viscosidade a baixos níveis de concentração (LEVEBRVE e DOUBLIER, 2005; WHISTLER, 1993; WILLIAMS e PHILLIPS, 2000;).

Os hidrocolóides são usados extensivamente na indústria dos alimentos para exercer uma série de funções como espessantes, gelificantes, estabilizantes, emulsificantes, floculantes, lubrificantes, controladores de liberação de sabor, inibidores da cristalização de gelo e açúcares. Além de suas propriedades funcionais, os polissacarídeos são usados na indústria de alimentos porque são amplamente disponíveis, usualmente de baixo custo e não tóxicos (WILLIAMS e PHILLIPS, 2000).

Geralmente, os hidrocolóides são adicionados no alimento mediante sua solubilização em meio aquoso, sendo normalmente comercializados na forma de pó com diferentes granulometrias e coloração dependendo do processo de obtenção. Além de alterar a resposta reológica, principalmente a viscosidade, a distribuição de tamanho e forma do pó determinam sua dispersabilidade, solubilidade, capacidade de hidratação, uso e funcionalidade da solução biopolimérica (IMESON, 2000; WANG e CUI, 2005). Porém, em muitos casos a funcionalidade é adaptada por modificações químicas para melhorar a solubilidade (VAN AKEN, 2006).

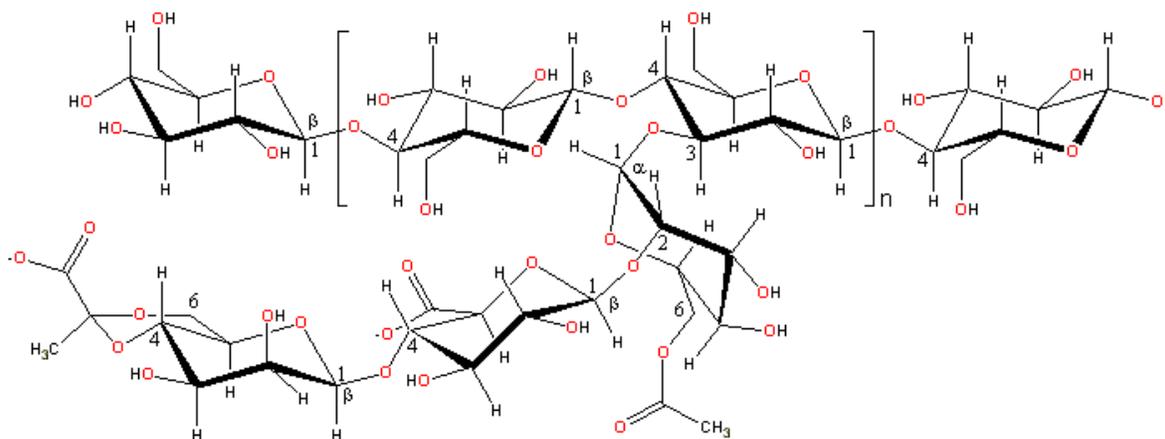
As suspensões de polissacarídeos, de uma maneira geral, comportam-se como fluidos newtonianos para concentrações menores que a concentração polimérica crítica ( $C < C^*$ ) e como não Newtonianos para concentrações maiores que  $C^*$  (LEFEBVRE e DOUBLIER, 2005; WILLIAMS e PHILLIPS, 2000). O comportamento reológico dos hidrocolóides é função de sua massa molecular, temperatura, concentração, taxa de cisalhamento, cadeia molecular e propriedades do solvente (LAPASIN e PRICL, 1999; NISHINARI, 2006). O aumento da viscosidade das suspensões com o aumento da concentração do polímero pode ser atribuído às suas interações intermoleculares e entrelaçamentos intramoleculares (GARCIA OCHOA et al., 2000).

### **2.2.1 Xantana**

A goma xantana é um biopolímero classificado como heteroexopolissacarídeo ramificado, aniônico e produzido por fermentação pela bactéria *Xanthomonas campestris* (NUSSINOVITCH, 1997). Essas bactérias apresentam células em forma de bastonetes, Gram-negativas e ocorrem predominantemente isoladas. Este polissacarídeo é produzido por processos biotecnológicos, com o emprego de técnicas de fermentação a temperatura constante, em meios esterilizados, fonte de carboidratos, nitrogênio, fosfatos (potássio) e minerais (KANG e PETTITT, 1993). Dentre as gomas microbianas, a xantana ocupa lugar de destaque no mercado, por apresentar propriedades

reológicas bastante distintas e incomuns, tais como alto grau de pseudoplasticidade e elevada viscosidade, mesmo a baixas concentrações.

A xantana é formada por uma estrutura primária composta de repetidas unidades de pentassacarídeos (Figura 1), os quais possuem duas unidades de glicose, duas unidades de manose e uma unidade de ácido glucurônico (SWORN, 2000).



**Figura 1** Unidade estrutural da xantana.

A estrutura química da cadeia principal de xantana consiste de unidades de  $\beta$ -D-glicose, ligadas nas posições 1 e 4, idêntica à da celulose. Os trissacarídeos ligados lateralmente à cadeia principal são compostos por uma unidade de ácido D-glucurônico ( $\beta$  1-2), duas unidades de manose ligadas na posição do O-3 e por resíduos de glicose ligados ( $\alpha$ 1-3) à cadeia principal. Estas ramificações trissacarídicas ligadas à cadeia principal do polímero, resultam em uma estrutura rígida. Esta estrutura pode existir na forma de simples, dupla ou tripla hélice (VERGELATI e PEREZ, 1987), e pode interagir com outras moléculas de polímero para formar um complexo (GARCIA OCHOA et al., 2000). Além disso, as cadeias trissacarídicas laterais conferem solubilidade em meio aquoso e, juntamente com os ácidos glucurônico, pirúvico e acético, conferem ionicidade à xantana (MISAKI, 1993). O alto grau de ácido pirúvico presente na molécula da xantana (aproximadamente 60%), que é fundamental nas propriedades em solução deste

hidrocolóide, faz com que exista uma extraordinária resistência à hidrólise e mudanças na viscosidade (MORRIS, 2006).

Comercialmente a xantana, se apresenta como um pó da cor creme, solúvel em água fria ou quente, formando suspensões aquosas opacas, altamente viscosas a baixas concentrações, mostrando um comportamento reológico altamente pseudoplástico (KATZBAWER, 1998; KHOURYIEH et al., 2007) e em elevadas concentrações pode apresentar uma notável tensão de cisalhamento inicial (KANG e PETTIT, 1993; SONG et al., 2006).

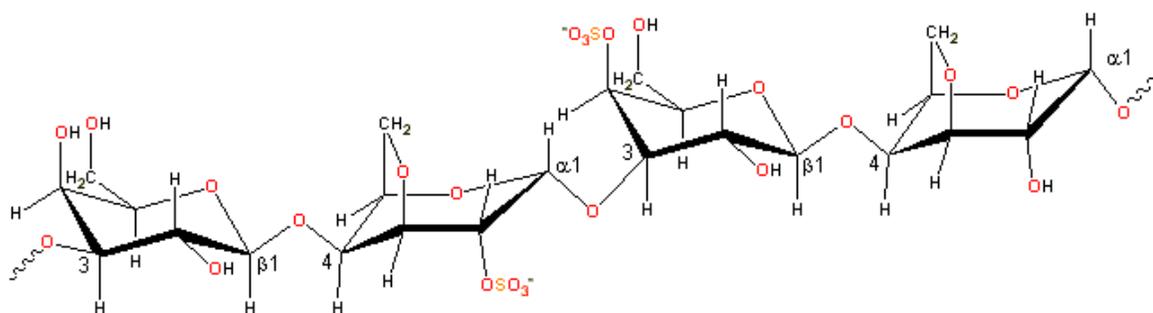
As propriedades reológicas das suspensões de xantana são altamente dependentes da concentração de polímero e de qualquer eletrólito adicionado (PELLETIER et al., 2001; SWORN, 2000), além do tempo de fermentação utilizado na produção (CONCEIÇÃO et al., 2000). As propriedades reológicas das suspensões de xantana podem depender das cepas utilizadas e dos processos utilizados para obtenção do biopolímero (ANTUNES et al., 2000; FUNAHASHI et al., 1987; MOREIRA et al., 1997; SOUZA, 1999; TORRES et al., 1993).

A xantana é extremamente pseudoplástica, e esta é uma característica muito desejada em diversas situações (SWORN, 2000). Do ponto de vista sensorial, os polissacarídeos que possuem comportamento pseudoplástico provocam menor sensação de gomosidade na boca do que aqueles com comportamento newtoniano. A taxa de cisalhamento da mastigação é considerada como entre 50-200 s<sup>-1</sup> (MORRIS, 2006). A xantana exhibe viscosidades muito baixas nesta faixa de taxa de cisalhamento, fazendo com que o produto alimentício no qual é utilizada pareça menos viscoso ao paladar e o sabor seja mais bem notado (CHALLEN, 1993).

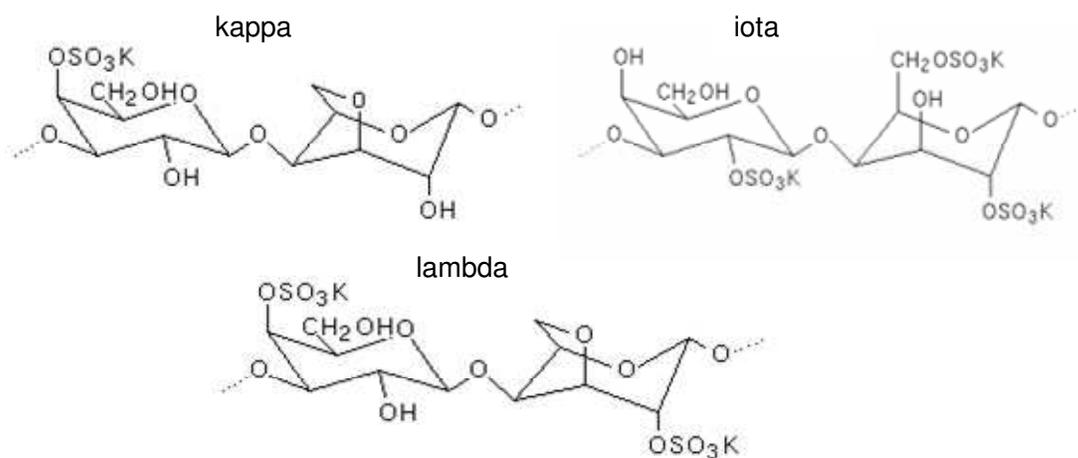
### **2.2.2 Carragena**

A carragena é um hidrocolóide extraído de algas marinhas vermelhas das espécies *Gigartina*, *Hypnea*, *Eucheuma*, *Chondrus* e *Iridaea* de estrutura molecular altamente sulfatada (NUSSINOVITCH, 1997). A carragena localiza-se na parede das células e na matriz intercelular do tecido das algas. É um polissacarídeo de alta massa molecular com conteúdo de éster sulfato de 15 a

40%, formado por unidades alternadas de D-galactose e 3,6-anidro-galactose (3,6-AG), unidas por ligações  $\alpha$ -1,3 e  $\beta$ -1,4-glicosídica (Figura 2). A posição e o número de grupos de éster sulfato, bem como o conteúdo de 3,6-AG, determinam as diferenças primárias entre os tipos de carragena (Figura 3). Maiores níveis de éster sulfato implicam em menor força de gelificação e baixa temperatura de solubilização. A carragena tipo kappa contém de 25 a 30% de éster sulfato e de 28 a 35% de 3,6-AG. A carragena tipo iota contém de 28 a 35% de éster sulfato e de 25 a 30% de 3,6-AG. A carragena tipo lambda contém de 32 a 39% de éster sulfato e não contém 3,6-AG. Na indústria alimentícia as carragenas têm um amplo uso em produtos lácteos, sobremesas e confeitos, produtos cárneos, panificação, molhos e sopas.



**Figura 2** Unidade estrutural da carragena.



**Figura 3** Diferentes tipos de carragena.

A carragena é solúvel somente em solventes altamente polares, sendo a água o mais importante. O pó de carragena dissolve-se lentamente e produz uma solução viscosa em temperaturas acima do intervalo de gelificação. Todas as carragenas são solúveis em água quente (40 e 70°C), dependendo das concentrações dos cátions. Em água fria, somente a  $\lambda$ -carragena e os sais de sódio dos tipos kappa ( $\kappa$ ) e iota ( $\iota$ ) são solúveis. Os sais de potássio e cálcio das  $\kappa$  e  $\iota$ -carragenas não são solúveis em água fria, porém, exibem expansão por hidratação considerável em função da concentração, tipos de cátions presentes, temperatura da água e condições de dispersão (IMESON, 2000).

De acordo com Imeson (2000) as propriedades espessantes e gelificantes dos diferentes tipos de carragena são completamente diferentes. Além das variações na estrutura química, as propriedades da carragena em solução aquosa depende da composição do meio, principalmente de sua força iônica (MORRIS et al., 1984; PICULELL, 2006; TYE, 1990; URUAKPA e ARNTFIELD, 2004). A  $\kappa$ -carragena forma um gel firme com íons potássio  $K^+$ , enquanto que a  $\iota$  e  $\lambda$ -carragena é pouco afetada pela presença deste íon. A  $\iota$ -carragena interage com os íons cálcio ( $Ca^{2+}$ ) para formar géis elásticos e macios, mas a adição de sais não tem efeito nenhum nas propriedades da  $\lambda$ -carragena (BUBNIS, 2000).

As carragenas são polímeros aniônicos, instáveis na forma ácida e são comumente vendidas como misturas com os sais de sódio, potássio e cálcio. A  $\lambda$ -carragena é usada para aumentar a viscosidade agindo como espessante não gelificante (RUITER e RUDOLPH, 1997; SPAGNUOLO et al., 2005), enquanto que as  $\kappa$  e  $\iota$ -carragenas são misturadas com cálcio e potássio, sendo comercializadas para aplicações como agentes gelificantes (NISHINARI, 2006; RAMSDEN, 2004). As três carragenas podem ser misturadas em diferentes proporções para atingir um comportamento reológico desejado (PICULELL, 2006).

As soluções aquosas de carragenas são altamente viscosas. Essa característica é decorrente da sua linearidade estrutural e natureza polieletrólita. A repulsão mútua, decorrente dos vários grupos sulfatos carregados negativamente ao longo da cadeia, faz com que a molécula fique altamente estendida, enquanto

que sua natureza hidrofílica permite que a estrutura esteja cercada por moléculas de água imobilizadas (GUISELEY et al., 1980).

De forma geral as soluções de carragena exibem características não-newtonianas e pseudoplásticas (LIZARRAGA et al., 2006). A viscosidade aumenta com a concentração (YASSEN et al, 2005) e decresce com o aumento da temperatura (MARCOTTE et al., 2001), dependendo da massa molecular e da presença de outros polímeros (PICULELL, 2006). A presença de sais em soluções de carragena reduzem a viscosidade (NISHINARI, 2006).

## 3 MATERIAL E MÉTODOS

### 3.1 Matéria-Prima

A goma xantana (KELTROL 521) foi fornecida pela Kelco (Brasil) e a  $\lambda$ -carragena (VISCARIN GP209) pela FMC Biopolymer (Brasil). As suspensões de xantana e carragena (1,0 % p/p) foram preparadas em água deionizada sob agitação mecânica a 25°C por 30 minutos para evitar a formação de agregados ou flóculos. Posteriormente, as suspensões foram centrifugadas a 8000 RPM para remover bolhas de ar e armazenadas sob refrigeração a 16°C durante 24 horas para completar sua hidratação e relaxar as tensões.

### 3.2 Caracterização das partículas inertes e propriedades de interface

O processo de secagem em leito de jorro fluidizado das suspensões de carragena e xantana, preparadas a partir do produto comercial, foi feito usando partículas inertes esféricas de vidro e esferóides termoplásticos de ABS como fonte de atrito e troca térmica.

#### 3.2.1 Densidade da partícula

A densidade das partículas inertes ( $\rho_p$ ) foi avaliada por picnometria usando água destilada a 25°C como líquido de referencia. A densidade foi determinada com a Equação (1):

$$\rho_p = \frac{\rho_L(m_s - m_o)}{(m_l - m_o) - (m_{sl} - m_s)} \quad [1]$$

Nesta equação:

$\rho_L$ = Densidade do líquido de referência.

$m_s$ = Massa da partícula inerte + picnômetro.

$m_o$  = Massa do picnômetro vazio.

$m_l$  = Massa do líquido + picnômetro.

$m_{sl}$  = Massa do picnômetro + partículas inertes + líquido de referência.

### 3.2.2 Densidade aparente ou “bulk”

A densidade “bulk” das partículas foi determinada pela razão entre a massa das partículas e o volume que elas ocupam em um recipiente de volume determinado, quando arranjadas aleatoriamente (MOHSENIN, 1987). O recipiente usado foi um cilindro de acrílico com diâmetro de 6,31 cm e altura de 8,4 cm. Todas as medições foram feitas em triplicata.

### 3.2.3 Morfologia

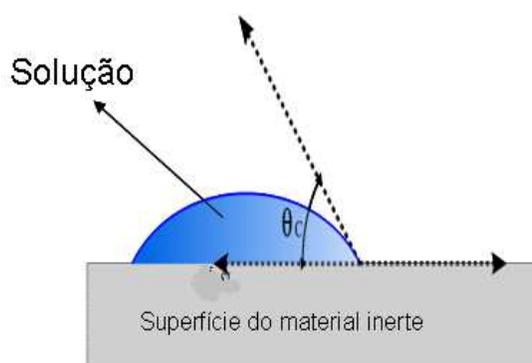
O diâmetro médio ( $d_p$ ) da partícula e sua circularidade (C) foram determinados a partir de uma análise de processamento de imagens. As partículas inertes (vidro ou ABS) foram distribuídas sobre uma lâmina plástica e fotografadas com uma câmera digital (Nikon SLR D60). A câmera foi colocada em uma base metálica e a 10 cm acima da lâmina plástica. As partículas foram fotografadas em formato colorido (RGB), com tamanho de 3072 x 2304 pixels e zoom óptico de 3x. Para se obter uma amostragem estatisticamente significativa, utilizou-se um número mínimo de 200 partículas. As imagens capturadas foram tratadas, analisadas e os parâmetros de forma 2D, que descrevem a silhueta das partículas, foram determinados pelo software IMAGEJ v.1.40 (National Institutes of Health, USA). O software IMAGEJ faz a medida da área de projeção 2D (S) e perímetro (P). Utilizando-se estas medidas, fez-se o cálculo dos parâmetros diâmetro médio ( $d_p$ ) da partícula e sua circularidade (C) (RUSS, 2004):

$$d_p = 2\sqrt{S/\pi} \quad [2]$$

$$\text{Circularidade} = C = \frac{4\pi \cdot S}{P^2} \quad [3]$$

### 3.2.4 Ângulo de contato partícula-suspensão

O ângulo de contato suspensão/material inerte (Figura 4) foi avaliado usando o método de processamento de imagens através dos programas ADOBE PhotoshopCS4 (Adobe Systems, USA) e ACROBAT professional 6.0 (Adobe Systems, USA). Uma câmera digital Nikon D60 de 10,2 mega pixels acoplada a uma lente ótica vr 18-55 mm foi usada para fotografar as suspensões na interface com o material inerte. Uma seringa descartável foi usada para aplicar uma gota de 2 ml sobre a uma superfície plana do inerte. As medidas foram feitas em triplicatas à temperatura ambiente.



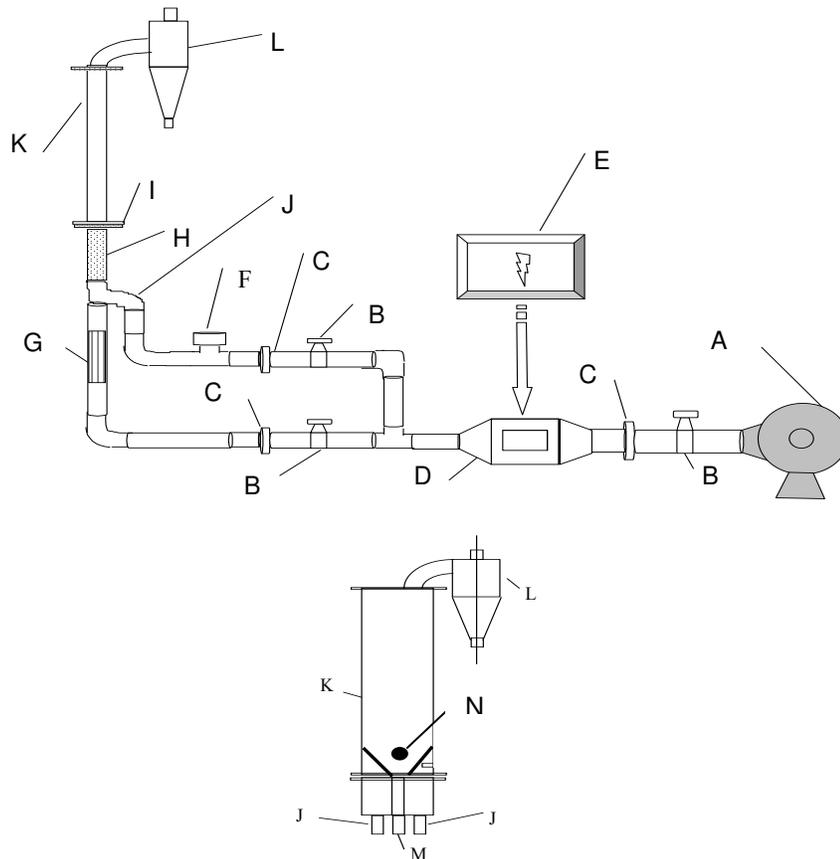
**Figura 4** Ângulo de contato (interface líquido-sólido).

### 3.3 Secagem em leito de jorro fluidizado bidimensional

#### 3.3.1 Equipamento

Foi utilizado o sistema de secagem de leito de jorro fluidizado bidimensional (Figura 5) disponível no Departamento de Engenharia de Alimentos desenvolvido por Maialle (1996). Este equipamento é constituído de um ventilador com 12,5 HP, aquecedor de ar, linha de transporte de ar (jorro-ânulo) e uma câmara de secagem construída em acrílico de 10 mm de espessura com uma base de 0,3 m de largura e 1 m de altura. Na base do secador, a área total de entrada do ar é 0,015 m<sup>2</sup>

(0,3x0,05 m), para o jorro de 0,0025 m<sup>2</sup> (0,05x0,05 m) e o restante é área efetiva do ânulo (0,011 m<sup>2</sup>).



**Figura 5** Vista Lateral e frontal do secador bidimensional: (A) Ventilador centrífugo; (B) Válvula globo; (C) Medidor de fluxo; (D) Aquecedor elétrico; (E) Regulador de tensão; (F) Derivação do ar; (G) Uniformizador da linha de fluxo do ar; (H) Distribuidor de ar para o jorro e ânulo; (I) Flanges; (J) Alimentação de ar para o ânulo; (K) Leito de acrílico; (L) Ciclone; (M) Alimentação de ar para o jorro; (N) Ponto de alimentação da suspensão.

A entrada de ar do jorro é centralizada e quadrangular. As regiões do ânulo são compostas por placas perfuradas com furos de 2 mm de diâmetro somando 2% do total da área da placa, disposta em um ângulo de inclinação de 45°. Uma tela fina com furos de 0,5 mm de diâmetro é instalada na base do sistema, a fim de impedir que os inertes penetrem pela tubulação do equipamento.

As linhas de transporte de ar do jorro e da aeração do ânulo são tubulações de ferro galvanizado com duas polegadas de diâmetro. A linha de transporte para o jorro contém um retificador de fluxo instalado imediatamente abaixo de uma

base distribuidora para estabilizar o jorro. Uma válvula globo controla a vazão total no sistema. As vazões das linhas que conduzem o ar para o jorro e para o ânulo também são controladas por duas válvulas globo, de maneira independente. A vazão de ar no jorro e ânulo foi determinada por meio de placas de orifício calibradas, sendo medidas as quedas de pressão por manômetros diferenciais tipo U e usando água como fluido de referência manométrico.

O aquecedor de ar consiste em cinco resistências aletadas que funcionam independentemente cada uma delas com uma potência integral de 1,5 kW. O circuito elétrico do aquecedor foi ligado a um relé de estado sólido com dissipador de calor. Um controlador digital modelo N1100 (Novus, Inglaterra) foi programado pelo método PID e ligado ao relé para controlar de forma digital a temperatura do ar de secagem com uma defasagem de 0,1 °C.

O leito foi preenchido e operado segundo a partícula inerte usada. A quantidade de inertes para a operação do secador foi de 1,5 kg para vidro e 1,0 kg de ABS.

Nos experimentos realizados, a alimentação da suspensão foi contínua e uniforme por meio da regulagem da vazão usando um conjunto bomba peristáltica-mangueira. A alimentação foi localizada na zona de jorro a 5 cm de sua base e foi feita quando as leituras das temperaturas dentro do leito mostrassem que a temperatura estava em equilíbrio térmico com o ar de secagem (aproximadamente 40 minutos).

Um sistema de aquisição de dados FieldLogger-DigiRail-Field Chart (Novus, Inglaterra) foi usado para coletar os registros de temperatura do ar de secagem e queda de pressão no leito. O equipamento de aquisição foi programado para fazer varreduras de coleta de dados a cada minuto.

### **3.3.2 Condições experimentais de secagem**

Os estudos de secagem foram feitos utilizando esferas de termoplástico ABS e vidro como partículas inertes, usando as condições dadas nas Tabelas 1 e 2. Foi utilizado um planejamento experimental completo tipo  $2^3$  (Tabela 3). As variáveis fluidodinâmicas avaliadas, segundo a condição de estudo foram: a queda

de pressão máxima, altura de jorro e largura da fonte, e velocidade da partícula no ânulo e jorro.

**Tabela 1** Fatores e níveis do planejamento experimental usando ABS como partícula inerte

FATORES	NÍVEIS**				
	$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
T: Temperatura do ar de secagem, °C.	43,2	50	60	70	76,8
V: Vazão de pasta, g/min.	1,3	2	3	4	4,7
J: % vazão no jorro (Velocidade do ar no jorro, m/s)	43,2(4,8)	50(5,5)	60/(6,67)	70(7,78)	76,8(8,5)

\*A porcentagem de vazão no jorro foi baseado para uma vazão total do sistema constante de 100 m<sup>3</sup>/h

\*\* Valores de  $\alpha$  calculados pela expressão  $\alpha = (2^n)^{1/4}$ , sendo  $\pm 1,68$  neste caso.

**Tabela 2** Fatores e níveis do planejamento experimental usando vidro como partícula inerte

FATORES	NÍVEIS**				
	$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
T: Temperatura do ar de secagem, °C.	43,2	50	60	70	76,8
V: Vazão de pasta, g/min.	0,33	1	1,5	2	2,7
J: % vazão no jorro (Velocidade do ar no jorro, m/s)	43,2(4,8)	50(5,5)	60/(6,67)	70(7,78)	76,8(8,5)

\*A porcentagem de vazão no jorro foi baseado para uma vazão total do sistema constante de 100 m<sup>3</sup>/h.

\*\* Valores de  $\alpha$  calculados pela expressão  $\alpha = (2^n)^{1/4}$ , sendo  $\pm 1,68$  neste caso.

**Tabela 3** Matriz do planejamento experimental completo para as quatro variáveis do processo de secagem ( $2^3$ , mais 6 ensaios axiais e 2 repetições no ponto central) para vidro e ABS

Ensaio	Temperatura, (°C) T	Vazão de suspensão (g/min) V	Jorro %/Vj	Ânulo %/Va
1ABS	50	2	50/5,6	50/1,3
1V	50	1	50/5,6	50/1,3
2ABS	50	2	70/7,8	30/0,8
2V	50	1	70/7,8	30/0,8
3ABS	50	4	50/5,6	50/1,3
3V	50	2	50/5,6	50/1,3
4ABS	50	4	70/7,8	30/0,8
4V	50	2	70/7,8	30/0,8
5ABS	70	2	50/5,6	50/1,3
5V	70	1	50/5,6	50/1,3
6ABS	70	2	70/7,8	30/0,8
6V	70	1	70/7,8	30/0,8
7ABS	70	4	50/5,6	50/1,3
7V	70	2	50/5,6	50/1,3
8ABS	70	4	70/7,8	30/0,8
8V	70	2	70/7,8	30/0,8
9ABS	43,2	3	60/6,7	40/1
9V	43,2	1,5	60/6,7	40/1
10ABS	76,82	3	60/6,7	40/1
10V	76,82	1,5	60/6,7	40/1
11ABS	60	1,3	60/6,7	40/1
11V	60	0,3	60/6,7	40/1
12ABS	60	4,7	60/6,7	40/1
12V	60	2,7	60/6,7	40/1
13ABS	60	3	43,2/4,8	56,8/1,4
13V	60	1,5	43,2/4,8	56,8/1,4
14ABS	60	3	76,82/8,5	23,2/0,6
14V	60	1,5	76,82/8,5	23,2/0,6
15ABS	60	3	60/6,7	40/1
15V	60	1,5	60/6,7	40/1
16ABS	60	3	60/6,7	40/1
16V	60	1,5	60/6,7	40/1

V e ABS: inertes de vidro e partículas termoplásticas. Vj e Va são as velocidades do ar no jorro e ânulo (m/s), respectivamente.

Os dados experimentais foram ajustados ao seguinte modelo polinomial quadrático da Equação (4):

$$\hat{y} = b_0 + b_1 T + b_2 V + b_3 J + b_{11} T^2 + b_{22} V^2 + b_{33} J^2 + b_{12} TV + b_{13} TJ + b_{23} VJ \quad [4]$$

Nesta expressão,  $\hat{y}$  representa a variável resposta obtida experimentalmente (produção de pó, retenção de sólidos, teor de umidade, velocidade da partícula, altura de jorro, largura da fonte e propriedades reológicas). T, V e J são as variáveis codificadas para a temperatura de ar de secagem, vazão de suspensão e porcentagem de vazão de ar que passa pelo jorro,  $b_0$  e  $b_i$  são os coeficientes de ajuste do modelo obtido pela regressão. A análise estatística e obtenção das superfícies de respostas foi feita usando o software STATISTICA v 5.5 (Statsoft, USA) com um nível de significância de 5%.

Para avaliar as várias respostas simultaneamente e encontrar os valores operacionais ótimos das variáveis independentes foi usada a abordagem da técnica da desejabilidade “desirability”. Esta técnica consiste em converter cada resposta  $y_i$  em uma função individual de desejabilidade  $d_i$ , que varia em uma faixa de  $0 < d_i < 1$ . Se a resposta for desejável  $d_i=1$  e, para respostas fora da região aceitável  $d_i=0$ , escolhendo-se assim a intensidade das variáveis independentes de modo a maximizar a desejabilidade global. Os parâmetros  $s$  e  $t$  foram fixados iguais a um, sendo que quando  $s > 1$  é dada maior ênfase para os pontos próximos ao valor alvo e se  $s < 1$  isto se torna menos importante e  $t$  é o peso da variável resposta na desejabilidade global e, quando o valor é um, a função de desejabilidade é linear (HILL e LEWICKI, 2005).

### 3.3.3 Operação do secador

A operação de secagem iniciou-se com a introdução das partículas inertes (ABS ou vidro) no equipamento desligado. O jorro foi formado injetando o ar na base do leito e a circulação dos sólidos foi conseguida variando-se a quantidade

de ar que passava pelo jorro e ânulo por meio das válvulas globo instaladas na tubulação. Os ensaios do planejamento experimental foram realizados mantendo-se a vazão total de ar de secagem de 100 m<sup>3</sup>/h, que segundo os testes preliminares foi a máxima capacidade do equipamento capaz de fornecer simultaneamente as quantidades de ar requeridas no planejamento experimental. Com o estabelecimento do jorro segundo a condição de secagem, o aquecedor foi ligado e o ar aquecido até a temperatura desejada. Antes de se iniciar a alimentação de suspensão (xantana ou carragena), o leito de partículas inertes foi aquecido até atingir o equilíbrio térmico com o ar de secagem ( $\cong$  40 min). Uma vez atingida esta condição, a suspensão foi alimentada continuamente na região do jorro com a ajuda de um conjunto bomba peristáltica (LS Masterflex-mangueira). Logo, era ligado o sistema de aquisição de dados e programado para coletar registros a cada minuto. Para cada ensaio do planejamento experimental, 600 gramas de suspensão de goma xantana ou  $\lambda$ -carragena (1 % p/p) foram usados. Um ciclone foi instalado na saída do equipamento para coletar o pó. Uma vez finalizado o ensaio, as partículas inertes eram removidas por transporte pneumático e o aquecedor era desligado. Durante a secagem, as temperaturas dentro do leito, queda de pressão, altura do jorro, largura da fonte e as velocidades das partículas inertes no jorro e ânulo foram continuamente determinadas.

### **3.4 Avaliação do processo de secagem**

O processo de secagem segundo as condições definidas no planejamento experimental (Tabela 3), foi avaliado quanto ao desempenho do secador, características fluidodinâmicas do processo e de qualidade do produto final.

### 3.4.1 Desempenho do secador

#### 3.4.1.1 Eficiência de produção ( $\eta_p$ ) do pó biopolimérico

Foi avaliada segundo a metodologia definida por Medeiros (2001), comparando a quantidade de matéria seca alimentada sob a forma de solução ( $M_2$ ) e a quantidade de matéria seca coletada em pó no ciclone após o processo de secagem ( $M_1$ ). A eficiência foi calculada de acordo com a Equação (5):

$$\eta_p = \frac{M_1}{M_2} \quad [5]$$

#### 3.4.1.2 Retenção de sólidos ( $RS$ ) no leito

Uma vez finalizado o ensaio, as partículas inertes eram removidas do secador usando transporte pneumático e coletadas num recipiente. As partículas inertes com material retido eram pesadas ( $M_4$ ), logo, eram lavadas e esfregadas fortemente usando água. As partículas limpas eram levadas para uma estufa de convecção forçada a 65°C durante 24 horas e sua nova massa medida ( $M_3$ ). A porcentagem de retenção de sólidos no leito foi determinada de acordo com a Equação (6):

$$RS(\%) = \left[ \frac{M_4 - M_3}{M_2} \right] * 100 \quad [6]$$

### 3.4.2 Estudo fluidodinâmico do secador

#### 3.4.2.1 Velocidade mínima de Jorro e mínima de fluidização

Os valores da vazão de ar no jorro do planejamento experimental (Tabela 3) foram definidos em função da vazão mínima de jorro. A velocidade mínima no jorro ( $V_{mj}$ ) foi determinada usando goma xantana (1 %p/p) para uma temperatura

de secagem de 40°C e vazão de pasta de 3 g/min. Para determinar esta velocidade, a válvula que controla a vazão no ânulo foi fechada completamente enquanto que a válvula que controla a vazão de ar no jorro foi lentamente aberta até atingir uma queda de pressão no leito constante. Essa queda de pressão era a diferença de pressão entre a base e o topo do secador. Uma vez atingida esta condição de jorro estável, a vazão no jorro foi diminuída fechando-se lentamente a válvula que controla a entrada de ar. Nos processos de aumento e diminuição da vazão de ar foram registradas as quedas de pressão no leito. A vazão de ar no jorro foi determinada através da queda de pressão registrada pela placa de orifício calibrada, instalada na tubulação. As quedas de pressão na tubulação do jorro e no leito foram registradas usando transmissores de pressão e um sistema de aquisição de dados (FieldLogger-DigiRail-Field chart, Novus). As medidas foram feitas em triplicata com amostragem de dados feita a cada minuto.

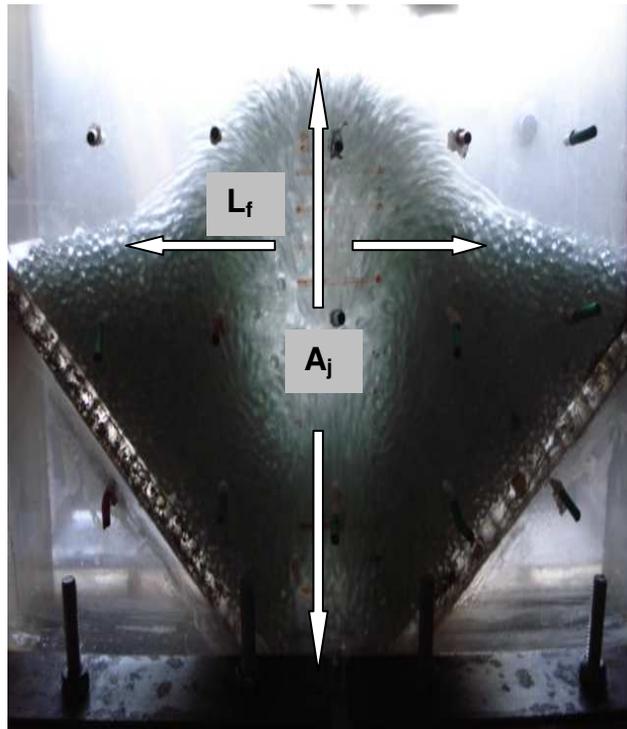
Para determinar a velocidade mínima de fluidização ( $V_{mf}$ ) um procedimento similar ao anterior foi feito. Neste caso, a válvula do jorro foi fechada completamente e se abriu lentamente a válvula que controla a vazão de ar no ânulo. As quedas de pressão no leito e na tubulação do ânulo foram coletadas no sistema de aquisição de dados fazendo amostragem de dados a cada minuto. As medidas foram feitas em triplicata.

#### **3.4.2.2 Queda de pressão no leito**

A queda de pressão máxima no leito foi determinada entre a base e o topo do secador usando um transmissor de pressão diferencial modelo R42 da Cole Parmer Instruments. O sensor de pressão foi conectado ao sistema de aquisição de dados para registrar os valores das medidas ao longo do tempo.

### 3.4.2.3 Altura do jorro e largura da fonte

Para cada condição de secagem do planejamento experimental, a altura do jorro ( $A_j$ ) e largura da fonte ( $L_f$ ) foram determinadas fazendo leituras diretamente na parede do secador com ajuda de uma escala numérica horizontal e vertical (Figura 6). As medidas foram feitas em quintuplicatas para cada ensaio experimental.



**Figura 6** Determinação da largura da fonte ( $L_f$ ) e altura máxima de jorro ( $A_j$ ) para o leito de partículas.

### 3.4.2.4 Velocidade da partícula no leito

A velocidade foi determinada fazendo filmagens separadas no ânulo e jorro com uma duração de 2 minutos cada. Uma câmera de vídeo (Sony HVR-HD 1000) e uma câmera digital Nikon D60 foi usada e os filmes foram analisados com o software *Windows Movie Maker®*. No filme foi localizada a trajetória de

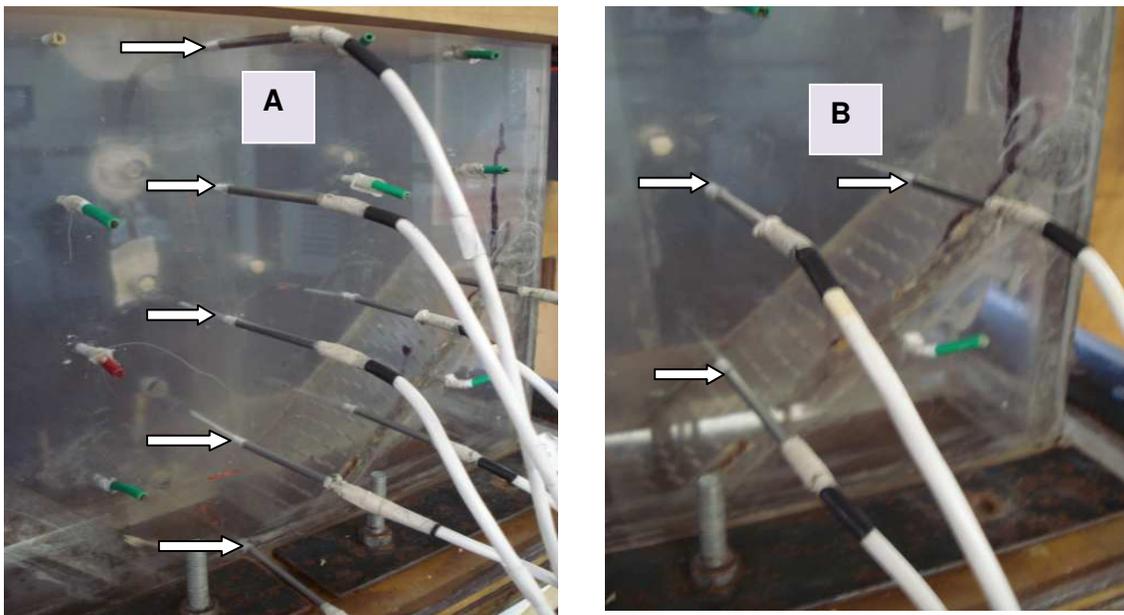
deslocamento da partícula para a determinação do tempo e distância percorrida pela mesma. A distância deslocada pela partícula foi estabelecida por uma escala numérica e os filmes foram feitos depois de 40 minutos após o início da alimentação da suspensão no secador. A velocidade ( $V_p$ ) foi determinada usando a Equação (7):

$$V_p = Z \left( \frac{x_p}{t_p} \right) \quad [7]$$

Onde  $Z$ ,  $x_p$  e  $t_p$  é o fator de escala, distância e tempo de deslocamento da partícula, respectivamente.

#### 3.4.2.5 Distribuição de temperatura no leito

O campo de distribuição de temperatura no leito foi medido através de nove termopares tipo PT100, sendo distribuídos cinco no jorro e o resto no ânulo (Figura 7). Os termopares foram conectados a um sistema de aquisição de dados (FieldLogger-DigiRail-Field Chart) marca Novus.



**Figura 7** Distribuição de temperatura no leito de jorro fluidizado bidimensional: Jorro (A) e Ânulo (B).

### 3.4.3 Propriedades do produto

#### 3.4.3.1 Caracterização reológica

As suspensões aquosas de goma xantana e  $\lambda$ -carragena, preparadas a partir do produto comercial e reconstituído, foram submetidas a ensaios reológicos estacionários e dinâmicos, usando um reômetro de tensão controlada Carri Med CSL<sup>2</sup> 500 (TA Instruments, New Castle, Delaware, USA), com geometria de cone-placa de aço inoxidável de 60 mm de diâmetro e ângulo de 1°59'.

##### 3.4.3.1.1 Determinação das curvas de escoamento

Primeiramente, as curvas de escoamento foram determinadas entre 0-300 s<sup>-1</sup> utilizando o módulo de deformação controlada, para quantificar o intervalo de tensão a ser aplicado. Posteriormente, três rampas contínuas de escoamento, foram efetuadas dentro do intervalo de tensão determinado, para a verificação da existência de dependência com o tempo. A primeira rampa (subida 1) teve tensão crescente (de 0 à tensão equivalente a 300 s<sup>-1</sup>) seguida por uma rampa decrescente (descida 1) e, posteriormente, por uma nova rampa crescente de tensão (subida 2). Este procedimento foi efetuado para eliminar o efeito do tempo nas suspensões.

Os dados de tensão e taxa de cisalhamento obtidos na última rampa (subida 2) foram ajustados aos diferentes modelos de escoamento, com obtenção dos parâmetros pelo método iterativo Quasi-Newton, realizado pelo software Statistica v.5.5 (STATSOFT, USA). As curvas de escoamento foram ajustadas utilizando-se os seguintes modelos:

Modelo lei da potência:

$$\eta_a = k(\dot{\gamma})^{n-1} \quad [8]$$

Modelo Herschel-Bulkley

$$\eta_a = k(\dot{\gamma})^{n-1} + \frac{\tau_o}{\dot{\gamma}} \quad [9]$$

Modelo de Cross:

$$\eta_a = \eta_\infty + \frac{\eta_o - \eta_\infty}{\left[1 + (\lambda \dot{\gamma})^m\right]} \quad [10]$$

Onde:

$\eta_a, \eta_o, \eta_\infty$  = Viscosidade aparente, viscosidade a taxa de cisalhamento zero e taxa de cisalhamento tendendo a infinito, Pa.s.

$k$  = Índice de consistência do fluido, Pa.s<sup>n</sup>

$m$  = Expoente do modelo de Cross, adimensional.

$n$  = índice de escoamento do fluido, adimensional.

$\tau$  = Tensão de cisalhamento, Pa.

$\tau_o$  = Tensão de cisalhamento residual, Pa.

$\lambda$  = Constante de tempo de Cross, s.

$\dot{\gamma}$  = Taxa de cisalhamento, s<sup>-1</sup>.

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o valor quadrático médio do erro (RMS) foram utilizados como parâmetros de controle de qualidade do ajuste. O valor quadrático médio do erro foi determinado como:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \left[ \sum_{i=1}^N \left( \frac{U_{\text{exp}} - U_p}{U_{\text{exp}}} \right)^2 \right]} * 100 \quad [11]$$

Onde  $U_{exp}$  e  $U_p$  são os valores experimentais e preditos pelo modelo respectivamente.

### 3.4.3.1.2 Ensaios oscilatórios ou em cisalhamento dinâmico

Inicialmente foram feitos ensaios de varredura de tensão em uma frequência de 0,1Hz para a determinação do intervalo de viscoelasticidade linear. As varreduras de frequência foram feitas sempre com o maior valor possível de tensão de cisalhamento dentro da linearidade, pois assim se minimizam os problemas referentes à sensibilidade do equipamento. Para a obtenção dos espectros mecânicos, os ensaios dinâmicos foram feitos com uma varredura de frequência entre 0,1 e 10 Hz, usando uma tensão fixa dentro do intervalo de viscoelasticidade linear das suspensões. As variáveis determinadas durante os ensaios oscilatórios dinâmicos foram:

- Módulo de armazenamento( $G'$ ):

$$G' = \frac{\tau^o \cos(\delta)}{\gamma^o} \quad [12]$$

- Módulo de perda ( $G''$ ):

$$G'' = \frac{\tau^o \sin(\delta)}{\gamma^o} \quad [13]$$

- Tangente de perda:

$$\tan(\delta) = \frac{G''}{G'} \quad [14]$$

O efeito da temperatura nas propriedades reológicas das suspensões foi avaliado em 25, 50, 60 e 70°C para a goma comercial xantana e 25°C para a goma obtida pelo processo de secagem. Para a  $\lambda$ -carragena, as suspensões foram avaliadas em 25 e 50°C para a goma comercial e 25°C para o material obtido pela secagem. A temperatura de análise foi mantida constante através de

um sistema “*Peltier*” instalado na placa inferior do reômetro. Todos os ensaios foram realizados em triplicatas.

#### **3.4.3.2 Teor de umidade final**

O teor de umidade das amostras foi determinado utilizando-se a metodologia da norma AOAC Official Method 920.151 (1995). As amostras de pó, com uma massa entre 2 e 3 g, foram colocadas em pesa-filtros e secas em estufa a vácuo, a 60 °C e sob pressão de 100 mm Hg, até o peso torna-se constante. Os ensaios foram feitos em duplicata.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Testes Preliminares

#### 4.1.1 Caracterização das partículas inertes

Num processo de secagem com partículas inertes a determinação das características físicas é fundamental pela importância na fluidodinâmica, desempenho e operação do secador. Na Tabela 4, encontram-se os valores médios do diâmetro, circularidade, densidade da partícula, densidade e porosidade “bulk” para o material inerte de vidro e termoplástico ABS. Os resultados mostram que as partículas de vidro são mais pesadas e esféricas do que as partículas de ABS que entretanto apresenta uma porosidade “bulk” menor. Assim, na secagem em leito de jorro o atrito entre as partículas é favorecido com o uso do vidro devido a seu maior peso enquanto que a transferência de calor é favorecida com uso do ABS devido ao aumento da área superficial de troca térmica (partículas de menor tamanho) e uma melhor circulação do ar no ânulo (maior porosidade “bulk”).

**Tabela 4** Características de partículas inertes de vidro e ABS

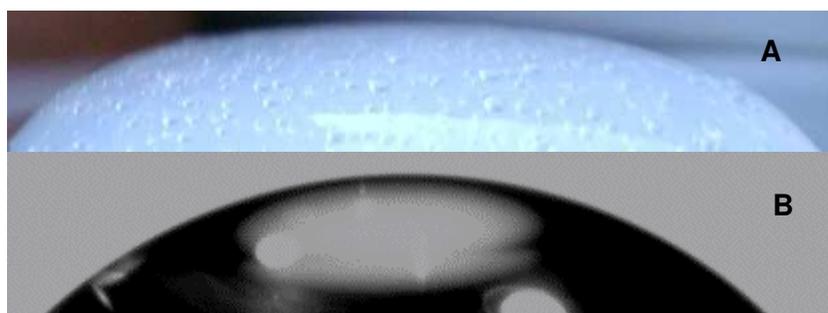
Partícula Inerte	Diâmetro (mm)	Circularidade (Adimensional)	Densidade Partícula (kg/m <sup>3</sup> )	Densidade “bulk” (kg/m <sup>3</sup> )	Porosidade “bulk” (%)
Vidro	3,6±0,1	0,9±0,1	2509,2±7,6	1512,7±6,1	39,1±2,5
ABS	2,7±0,3	0,8±0,1	1077,1±4,6	620,5±5,1	51,6±3,2

Na Tabela 5, apresentam-se os valores do ângulo de contacto entre as suspensões de goma xantana e carragena (1 % p/p) com o material inerte usado.

**Tabela 5** Ângulos de contato na interface com o material inerte

Suspensão	Ângulo de contato (°)	
	Vidro	ABS
Xantana	36,8±1,3	45,6±1,6
Carragena	19,25±2,2	36,7±0,9

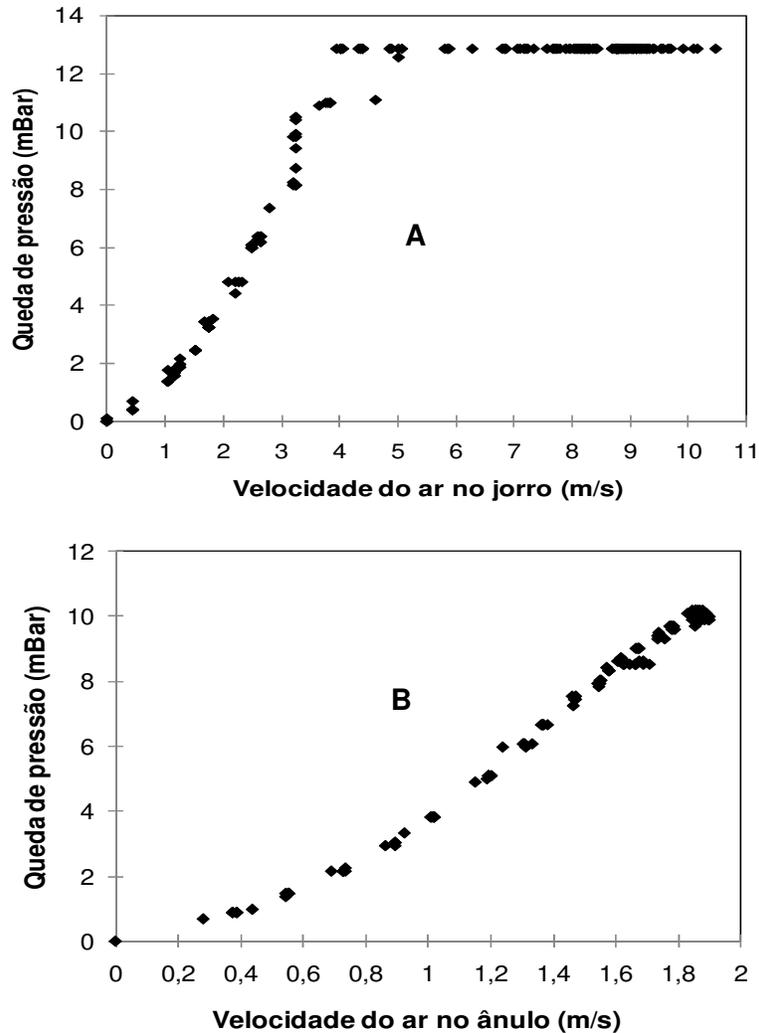
O ângulo de contato usando vidro como inerte foi menor para as suspensões de  $\lambda$ -carragena, sendo que com ABS-xantana observou-se o maior valor. Assim, as suspensões de carragena apresentam um maior grau de aderência superficial (menor ângulo de contato) o que dificulta a sua remoção após a secagem, particularmente, quando é usado o vidro como material inerte. De acordo com Vieira et al. (2004), um baixo ângulo de contato representa uma alta adesão da suspensão sobre a partícula inerte, melhorando assim o processo de recobrimento, processo contrário ao desejado. Na Figura 8 observam-se os ângulos de contato para a suspensão de xantana em vidro e ABS.



**Figura 8** Ângulo de contato para suspensões de goma xantana na interface sólida vidro (A) e ABS (B), respectivamente.

#### **4.1.2 Velocidade mínima de jorro e fluidização usando partículas inertes de vidro**

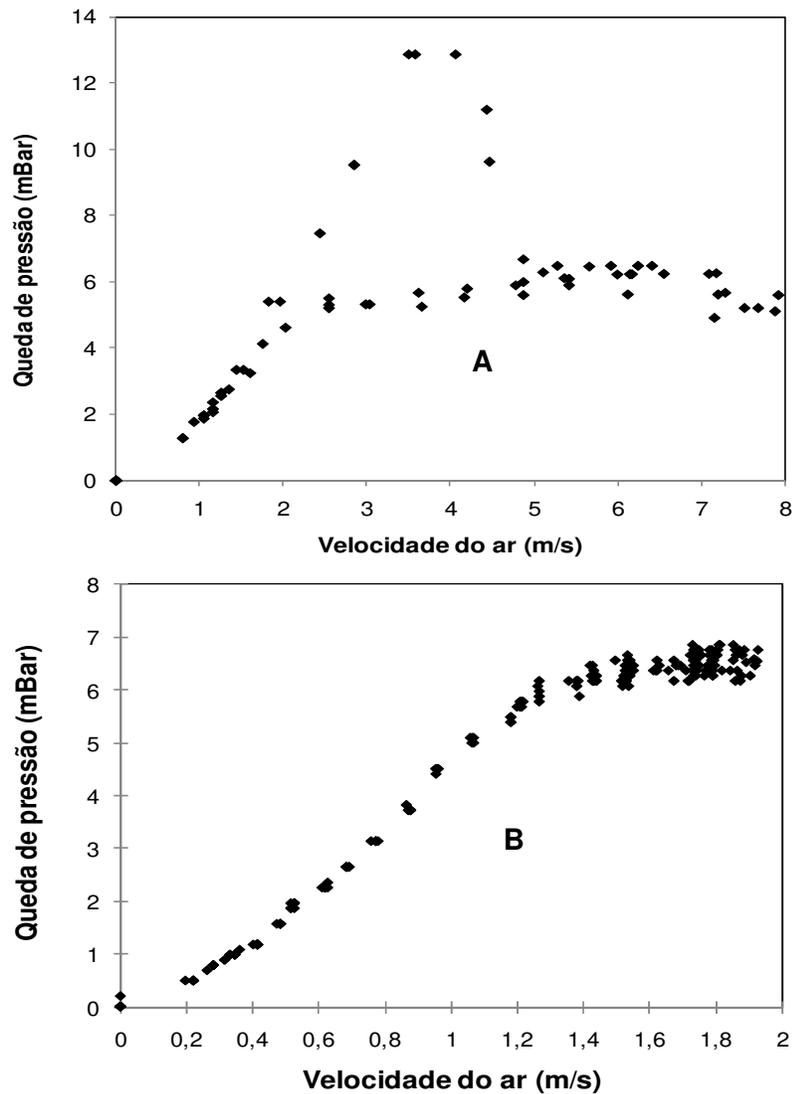
Na Figura 9, mostram-se as quedas de pressão no jorro e ânulo em função da velocidade do ar para o leito preenchido com 1,5 kg de esfera de vidro e sem aeração no ânulo. Os resultados da Figura 9A mostram que uma velocidade mínima de jorro de 4,5 m/s (40,5 m<sup>3</sup>/h) foi necessária para o estabelecimento do jorro. Este valor foi usado para definir o planejamento experimental. Além disso, os resultados da Figura 9B indica que não foi possível fluidizar o leito com as condições de vazão de ar no ânulo fornecido pelo ventilador do equipamento. Assim, para o planejamento experimental dado na Tabela 3 o equipamento foi operado sob condições de jorro aerado.



**Figura 9** Queda de pressão no leito com partículas de vidro: Jorro (A) e Ânulo (B).

#### 4.1.3 Velocidade mínima de jorro e fluidização usando partículas inertes de ABS

Na Figura 10 são mostradas as quedas de pressão no jorro e ânulo com o aumento da velocidade do ar para o leito preenchido com 1,0 kg de esferóides de ABS. Os resultados da Figura 10A mostram que a velocidade mínima de jorro foi de 3,6 m/s (32,4 m<sup>3</sup>/h). Os resultados da Figura 10B mostram que foi possível fluidizar o leito com uma velocidade na faixa de 1,4-1,6 m/s (55,44-63,36 m<sup>3</sup>/h) no ânulo.



**Figura 10** Queda de pressão no leito com partículas de ABS: Jorro (A) e Ânulo (B).

Comparando a velocidade mínima de fluidização com os valores do planejamento experimental (Tabela 3) existe a possibilidade de ter ocorrido regime de jorro fluidizado na secagem com ABS. Em algumas condições, a velocidade do ar no ânulo foi próxima ou maior que a velocidade mínima de fluidização, além de haver a contribuição da vazão de ar no jorro que pode passar ao ânulo.

#### 4.1.4 Estudo do colapso do leito para suspensão de $\lambda$ -carragena

Uma das limitações da secagem em leito de inertes é a remoção incompleta dos sólidos depositados sobre as partículas, resultando em tempos longos de processo que podem culminar no bloqueio do leito. Portanto, é necessário o estudo da máxima vazão de suspensão no qual se mantém uma adequada fluidização e circulação dos inertes no leito.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados de colapso do leito em função da vazão de alimentação da suspensão. O secador foi operado para uma vazão de ar tanto no jorro e no ânulo de 50 m<sup>3</sup>/h que correspondem a velocidades do ar no jorro de 5,55 m/s e no ânulo de 1,11 m/s e a temperatura de secagem foi de 70°C. Os resultados indicaram que não foi possível operar o leito com uma alimentação contínua para uma vazão de suspensão maior que 6,0 g/min. A circulação de sólidos no leito foi bloqueada para um tempo de processo de 45 minutos para partículas de vidro e 65 minutos para ABS.

**Tabela 6** Influência da vazão de alimentação de suspensão de  $\lambda$ -carragena no colapso de leito

Vazão de Alimentação (g/min)	Observação de colapso	
	Vidro	ABS
1	Não	Não
2	Não	Não
3	Não	Não
4	Não	Não
5	Não	Não
6	Sim	Sim

#### 4.1.5 Viabilidade de secagem da goma $\lambda$ -carragena

A possibilidade de secar a suspensão de carragena foi avaliada considerando a eficiência de produção de pó (Tabela 7), utilizando vazões de alimentação em que não ocorresse colapso do leito.

**Tabela 7** Viabilidade de secagem de suspensão de  $\lambda$ -carragena usando vidro e ABS como material inerte

Inerte	Vazão de suspensão (g/min)	Temp. (°C)	Vazão de ar		Produção de pó $\eta_p$ (%)	Retenção de sólidos RS (%)
			Jorro ( $m^3h^{-1}/ms^{-1}$ )	Ânulo ( $m^3h^{-1}/ms^{-1}$ )		
Vidro	1	70	50/5,6	50/1,3	0	100
	3	70	50/5,6	50/1,3	0	100
	4	70	50/5,6	50/1,3	0	100
ABS	1,5	70	50/5,6	50/1,3	31,25	63,75
	3	70	50/5,6	50/1,3	25,32	68,68
	5	70	50/5,6	50/1,3	11,23	80,77

Apesar de alimentar o secador com vazões de suspensão razoavelmente altas sem colapso (Tabela 7), os resultados mostraram que não foi possível remover a carragena seca usando partícula de vidro devido à alta afinidade entre a suspensão de goma carragena e o material inerte, o qual pode ser explicada pelo baixo ângulo de contato na interface sólido/líquido (vidro/carragena) o que pode ser observado na Tabela 5. Dessa forma, pode-se concluir que o “coating” do vidro é o processo mais favorecido quando se usa carragena. Por outro lado, usando ABS foi possível secar a suspensão, porém com uma alta retenção de sólidos e baixa produção de pó.

#### 4.1.6 Estudo de colapso do leito para suspensão de xantana

Na Tabela 8 são apresentados os resultados de colapso do leito em função da vazão de alimentação da suspensão para as mesmas condições de operação do secador avaliadas para a goma carragena. Os resultados indicaram que não foi possível operar o leito com uma alimentação contínua acima de 4,5 g/min usando partículas inertes de vidro e de 6 g/min usando ABS. A circulação de sólidos no leito foi bloqueada para um tempo de processo de 55 minutos.

**Tabela 8** Influência da vazão de alimentação de suspensão de xantana no colapso de leito

Vazão de alimentação (g/min)	Observação de colapso	
	Vidro	ABS
1	Não	Não
1,5	Não	Não
2	Não	Não
2,5	Não	Não
3	Não	Não
3,5	Não	Não
4	Não	Não
4,5	Não	Não
5	Sim	Não
5,5	Sim	Não
6,0	Sim	Sim

#### 4.1.7 Viabilidade de secagem de xantana

Mostra-se na Tabela 9 que foi viável secar suspensão de goma xantana usando o vidro e ABS como partículas inertes, apesar da alta retenção de sólidos e baixa produção de pó. Além disso, observa-se que para uma condição de operação do secador perto à vazão de colapso do leito a produção foi mínima e a retenção foi muito elevada.

**Tabela 9** Viabilidade de secagem de suspensão de xantana usando vidro e ABS como inerte

Inerte	Vazão de suspensão (g/min)	Temp. (°C)	Vazão de ar		Produção de pó $\eta_p$ (%)	Retenção de sólidos RS (%)
			Jorro ( $m^3h^{-1}/ms^{-1}$ )	Ânulo ( $m^3h^{-1}/ms^{-1}$ )		
Vidro	1,32	70	50/5,6	50/1,3	48,25	46,23
	3,0	70	50/5,6	50/1,3	36,32	57,68
	4,5	70	50/5,6	50/1,3	10,23	81,77
ABS	1,5	70	50/5,6	50/1,3	45,25	48,93
	3	70	50/5,6	50/1,3	38,32	55,68
	5	70	50/5,6	50/1,3	15,23	77,77

## **4.2 Secagem de suspensões de xantana usando vidro e ABS como material inerte**

### **4.2.1 Performance do secador**

Na Tabela 10, apresentam-se os resultados da produção de pó, retenção de sólidos no leito de inertes e teor final de umidade, para as diversas condições experimentais. Os resultados indicam que usando vidro como material inerte a melhor condição de secagem foi obtida com a menor vazão de pasta (0,32 g/min) com produção de pó em torno de 70% e uma retenção de material de 18%. Além disso, o teor final de umidade foi o mais baixo (3,5%) devido à maior facilidade de secagem (menor película de recobrimento), pois a razão entre as vazões de pasta e de ar foi muito baixa.

Observa-se da Tabela 10 e 11 que o uso do ABS como fonte de troca térmica melhorou o desempenho do secador em todas as condições de secagem avaliadas, obtendo-se a melhor produção de pó (58,64%) e a menor retenção de sólidos (35,66%) também com a menor vazão de suspensão no secador (1,3 g/min). Em geral, os teores de conteúdo de umidade do pó obtido usando ABS são ligeiramente maiores do que o pó obtido com o vidro, devido fundamentalmente a que o secador foi operado com vazões de pasta maiores e menor tempo de processamento.

**Tabela 10** Produção de pó, retenção de sólidos e teor de umidade para as diferentes condições de secagem de suspensões de xantana usando ABS

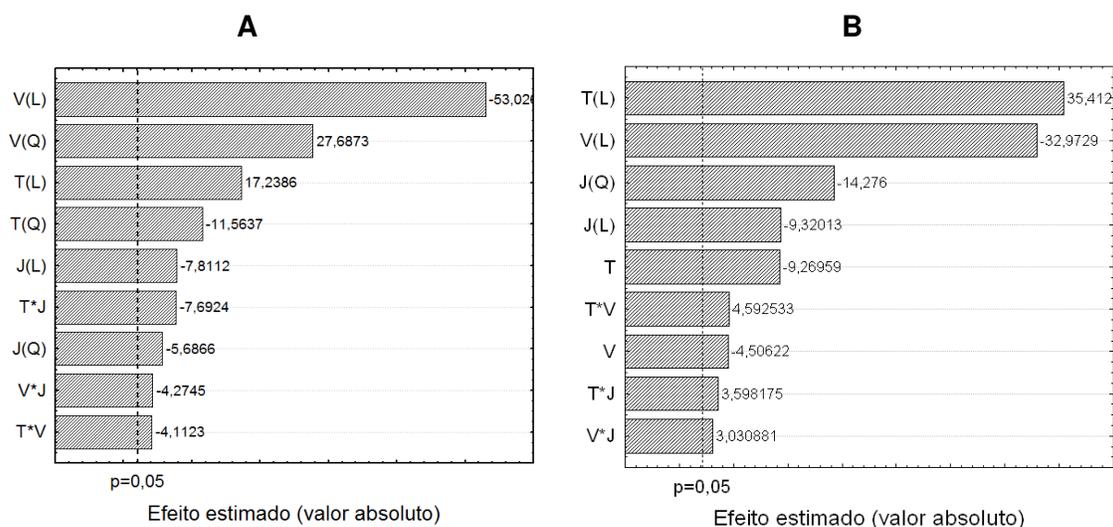
Ensaio	Temperatura de secagem (°C)	Vazão de pasta (g/min)	Ar no jorro (%)	Produção de pó (%)	Retenção de sólidos (%)	Teor final de umidade (%b.s)
	T	V	J			
1	-1 (50)	-1 (2)	-1 (50)	37,6±2,3	51,7±4,2	7,5±0,3
2	-1 (50)	-1 (2)	1 (70)	33,6±2,1	57,9±3,6	8,4±0,2
3	-1 (50)	1 (4)	-1 (50)	31,8±1,5	58,9±3,8	8,9±0,4
4	-1 (50)	1 (4)	1 (70)	27,5±1,1	62,5±2,1	9,4±0,3
5	1 (70)	-1 (2)	-1 (50)	43,6±1,3	48,7±2,5	7,8±0,4
6	1 (70)	-1 (2)	1 (70)	39,7±2,3	51,6±1,9	7,9±0,5
7	1 (70)	1 (4)	-1 (50)	38,8±2,3	52,2±2,6	7,8±0,2
8	1 (70)	1 (4)	1 (70)	37,6±1,7	52,1±1,5	8,0±0,1
9	-1,68 (43,2)	0 (3)	0 (60)	28,3±1,7	61,0±1,3	10,3±0,1
10	1,68 (76,82)	0 (3)	0 (60)	52,6±3,1	39,3±3,7	5,9±0,2
11	0 (60)	-1,68 (1,3)	0 (60)	58,7±2,8	35,7±4,6	6,4±0,7
12	0 (60)	1,68 (4,7)	0 (60)	28,7±2,2	61,2±2,7	11,5±0,6
13	0 (60)	0 (3)	-1,68(43)	39,6±2,1	52,5±1,8	7,8±0,5
14	0 (60)	0 (3)	1,68(77)	34,8±3,1	55,2±1,7	8,2±0,4
15	0 (60)	0 (3)	0 (60)	43,6±1,8	48,3±3,6	7,5±0,3
16	0 (60)	0 (3)	0 (60)	41,25±2,7	47,8±2,8	7,2±0,1

**Tabela 11** Produção de pó, retenção de sólidos e teor de umidade para as diferentes condições de secagem de suspensões de xantana usando vidro

Ensaio	Temperatura de secagem (°C)	Vazão de pasta (g/min)	Ar no jorro (%)	Produção de pó (%)	Retenção de sólidos (%)	Teor final de umidade (%b.s)
	T	V	J			
1	-1 (50)	-1 (1)	-1 (50)	23,7±0,1	63,3±4,1	6,9±0,6
2	-1 (50)	-1 (1)	1 (70)	30,3±1,8	60,8±2,1	7,2±0,6
3	-1 (50)	1 (2)	-1 (50)	23,8±2,1	63,3±8,3	10,1±0,4
4	-1 (50)	1 (2)	1 (70)	21,3±0,4	73,3±8,2	8,0±1,3
5	1 (70)	-1 (1)	-1 (50)	36,1±0,5	65,4±1,1	6,6±1,3
6	1 (70)	-1 (1)	1 (70)	30,9±0,4	46,6±4,1	5,7±1,3
7	1 (70)	1 (2)	-1 (50)	27,2±0,4	53,7±1,0	5,8±0,7
8	1 (70)	1 (2)	1 (70)	24,8±1,7	60,7±0,6	7,1±0,4
9	-1,68 (43,2)	0 (1,5)	0 (60)	22,2±1,4	60,9±0,2	6,9±0,4
10	1,68 (76,82)	0 (1,5)	0 (60)	30,5±3,4	61,1±2,1	5,1±0,1
11	0 (60)	-1,68 (0,32)	0 (60)	69,6±7,2	17,5±6,2	3,5±0,9
12	0 (60)	1,68 (2,7)	0 (60)	21,9±1,8	62,5±2,1	5,8±1,3
13	0 (60)	0 (1,5)	-1,68(43)	32,8±1,8	58,6±2,1	6,5±0,1
14	0 (60)	0 (1,5)	1,68(77)	25,7±2,9	57,3±5,9	6,3±0,4
15	0 (60)	0 (1,5)	0 (60)	27,6±0,3	65,2±1,6	8,3±0,2
16	0 (60)	0 (1,5)	0 (60)	27,4±0,3	66,6±1,3	8,1±0,2

#### 4.2.1.1 Efeito das condições de secagem sobre a eficiência de produção do pó

De acordo com a Figura 11, todas as variáveis estudadas apresentaram efeitos estatisticamente significativos sobre a produção de pó, dentro do intervalo de confiança de 95%. Tanto para as partículas de vidro como para ABS a vazão de suspensão (V) e a temperatura foram as variáveis mais relevantes.



**Figura 11** Diagrama de Pareto para a resposta produção de pó de xantana seca com partículas inertes de vidro (A) e ABS (B).

Na Tabela 12 são apresentados a análise de variância (ANOVA) e os coeficientes do modelo de regressão obtido para a produção de pó. A qualidade obtida para o ajuste foi de 79,53% para o vidro e 73,57% para o ABS, indicando um ajuste razoável entre os valores experimentais e previstos pelo modelo. O teste F para a falta de ajuste não foi significativo ( $F_{FA} < F_{tab}$ ), ou seja, o modelo pode ser considerado preditivo. Observa-se que a eficiência média de produção de pó para o vidro foi 28,2% e de 44,32% para ABS, mostrando uma menor aderência superficial e uma melhor eficiência na remoção dos sólidos que recobrem a partícula quando materiais termoplásticos de ABS são usados como partícula inerte na secagem de xantana. No entanto, os dois valores são menores

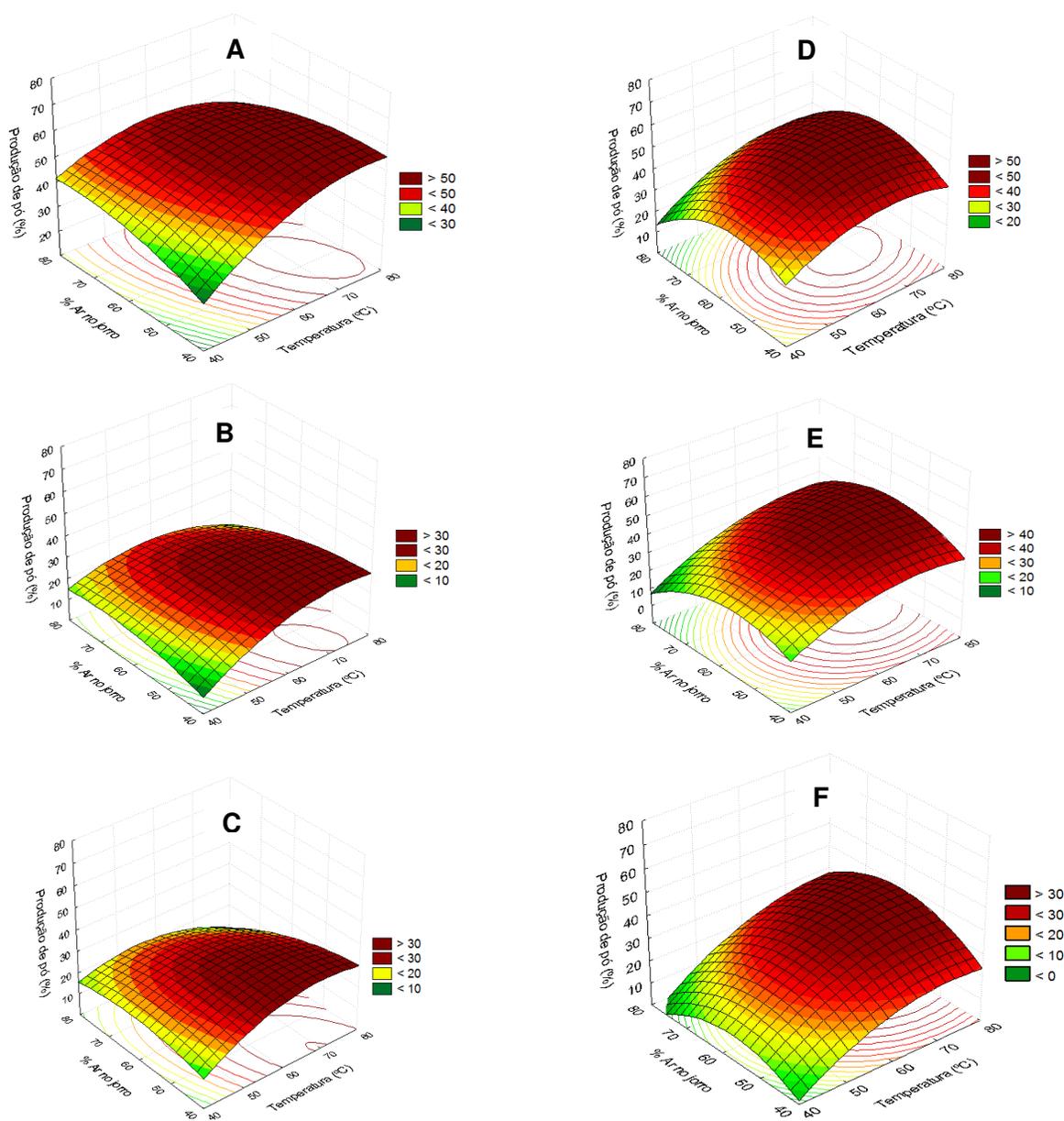
que os reportados na secagem de feijão preto concentrado (FERREIRA et al., 2002) e clara de ovo (CHRIST, 2006).

**Tabela 12** Coeficientes de regressão do modelo matemático codificado para a produção de pó de xantana

Valores	Material Inerte	
	Vidro	ABS
$F_{cal}/F_{tab}$	7,7	2,6
$F_{FA}/F_{tab}$	0,9	0,5
$R^2$	79,52	73,6
Média	28,204	44,314
Temperatura T	2,48	5,315
Temperatura T <sup>2</sup>	-2,019	-2,090
Vazão de pasta V	-7,628	-4,949
Vazão de pasta V <sup>2</sup>	4,835	-1,016
% Ar no jorro J	-1,124	-1,399
% Ar no jorro J <sup>2</sup>	-0,994	-3,219
T*V	-0,773	0,901
T*J	-1,447	0,706
V*J	-0,803	0,594

A Figura 12 mostra a produção de xantana em pó em função da temperatura de secagem e vazão de ar que passa pelo jorro em três níveis de vazão de suspensão. Os resultados da Figura 12 indicam que tanto para o leito operado com vidro como com partículas termoplásticas de ABS existe um considerável aumento da produção do pó com o aumento da temperatura de secagem. No entanto, a diminuição da quantidade de ar no jorro (aumento de aeração no ânulo) causou um efeito mais significativo quando o leito foi preenchido com vidro do que com ABS. O aumento da aeração no ânulo fornece uma transferência de calor mais eficiente e uma melhor circulação das partículas inertes favorecendo a evaporação de água da película líquida da suspensão que recobre as partículas inertes, ajudando a remoção dos sólidos. A vazão de alimentação de suspensão também teve um efeito significativo na produção do pó. Reduzindo-se a vazão de pasta produziu um aumento na produção de pó. Observou-se que para o leito operando com inertes de vidro, juntamente com temperaturas de secagem acima de 65°C, vazão de ar no jorro entre 50-60 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> e vazão de pasta menor que 1 g/min obteve-se a máxima produção de pó (50-60%).

Para o leito com ABS, a maior produção de pó (50-60%) foi obtida com temperaturas acima de 70°C, proporção de ar no jorro de 60% (60 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup>) e vazão de alimentação de pasta menor que 2 g/min. Assim, o ABS permitiu a operação do secador com maior vazão de pasta o que significou um menor tempo de processamento.

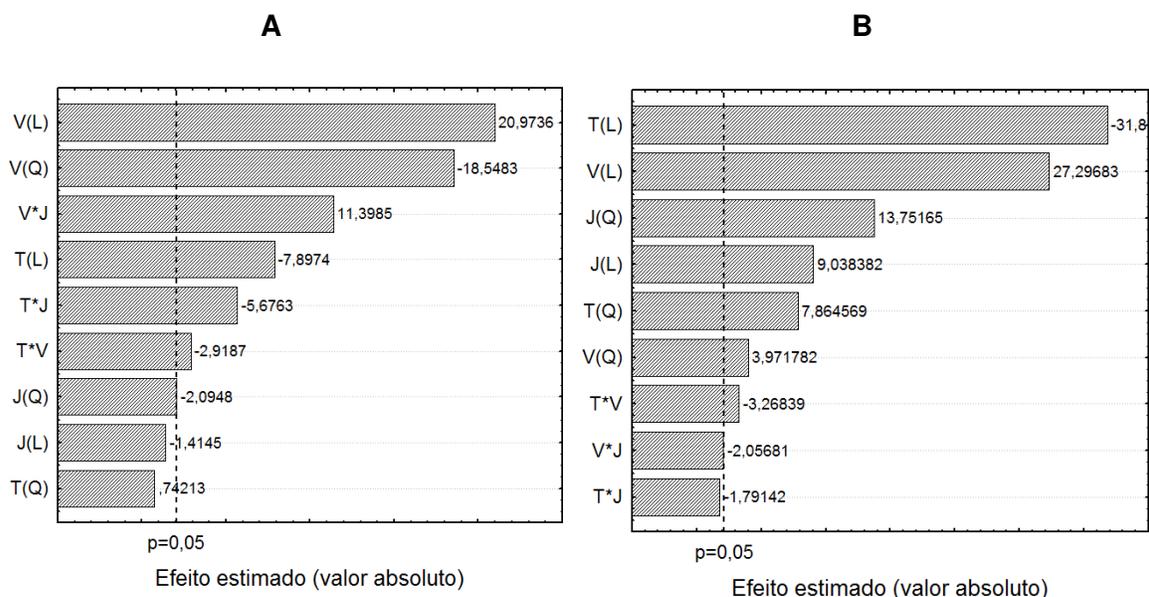


**Figura 12** Produção de pó de xantana em função da temperatura de secagem e % de vazão de ar no jorro para diferentes vazões de suspensão de goma xantana: A (0,33 g/min), B (1,5 g/min) e C (2,7 g/min) para vidro; D (1,3 g/min), E (3 g/min) e F (4,7 g/min) para ABS.

Os resultados das Figuras 9 e 10 mostraram que com as condições de operação do equipamento não foi possível trabalhar em jorro fluidizado utilizando partículas de vidro como inerte, entretanto esta condição podia ser atingida com as partículas de ABS ( $V_{mfABS}=1,4$  m/s). Para partículas de vidro uma análise de tendência da Figura 9 indica que uma velocidade aproximadamente de 2 m/s poderia fluidizar as partículas no ânulo, o que concorda com o valor teórico de 2,2 m/s calculado usando a metodologia sugerida por Kunni e Levenspiel (2003). De acordo com os resultados da Figura 12, a maior produção de pó é para uma porcentagem de vazão de ar no jorro de 60% ( $60$  m<sup>3</sup>/h), o que significou uma aeração no ânulo de 40% ( $40$  m<sup>3</sup>/h), ou ainda, uma velocidade do ar no ânulo ( $V_a$ ) de 1 m/s. De acordo com Kunni e Levenspiel (2003) a relação entre a velocidade do ar no leito e a velocidade mínima de fluidização ( $V_a/V_{mf}$ ) é um indicativo do efeito da turbulência criada dentro do leito. Para todas as condições experimentais (Tabela 3) esta relação é maior para as partículas de ABS e no caso de maior eficiência de produção é de 0,42 para o vidro e de 0,7 para o ABS. Portanto, uma menor aderência superficial somada aos efeitos de turbulência fluidodinâmica no ânulo melhorou de maneira geral a produção de pó usando partículas de ABS.

#### **4.2.1.2 Efeito das condições de secagem sobre a retenção de sólidos**

Os efeitos estatísticos das diferentes variáveis do processo de secagem sobre a retenção de sólidos (RS) no leito são apresentados na Figura 13. O efeito negativo da temperatura indicou que uma diminuição da temperatura do ar de secagem (T) aumentou a retenção de sólidos. Novamente, a temperatura e a vazão de suspensão (V) mostraram ser as variáveis mais influentes no processo de secagem.



**Figura 13** Diagrama de Pareto para a resposta retenção de sólidos de xantana seca com partículas de vidro (A) e ABS (B).

Na Tabela 13, apresenta-se a análise de variância (ANOVA) e os coeficientes de regressão para o modelo obtido para a retenção de sólidos (RS). Os resultados indicam que a regressão foi estatisticamente significativa ( $F_{cal} > F_{tab}$ ). A qualidade obtida para o ajuste foi de 78,85% e 77,66% para o vidro e ABS, respectivamente, o que indicou um ajuste razoável entre os valores experimentais e previstos pelo modelo. A falta de ajuste foi estatisticamente não significativa ( $F_{FA} < F_{tab}$ ), ou seja, o modelo pode ser usado para a predição dos dados experimentais. O valor médio da retenção de sólidos predito pelo modelo foi 65,55 % para o leite operado com vidro e de 49,45% para o leite operado com ABS. Isso mostra que existe uma elevada retenção de sólidos na superfície da partícula de vidro e que o material termoplástico ajudou a melhorar essa remoção.

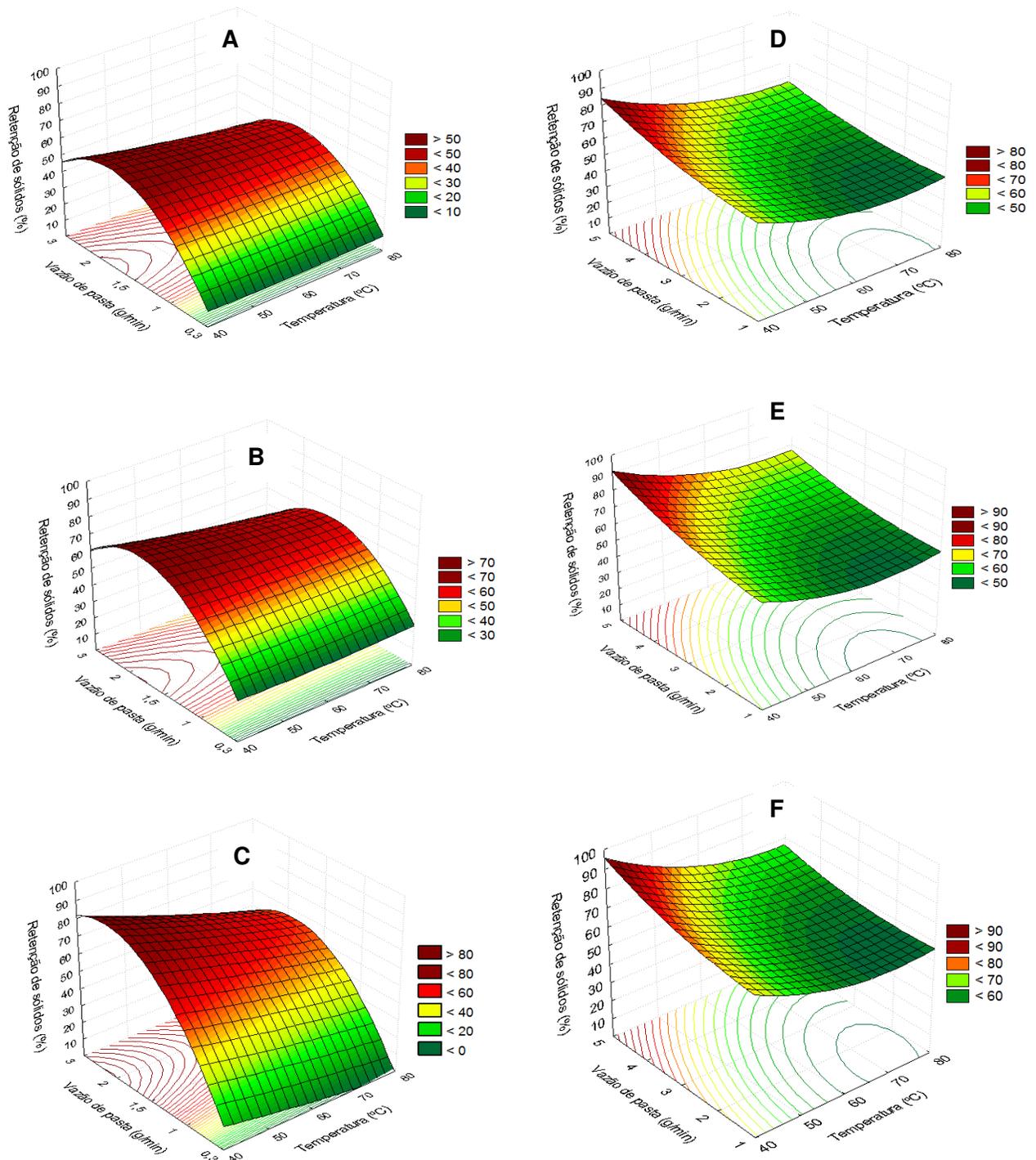
**Tabela 13** Coeficientes de regressão do modelo matemático codificado para prever a retenção de sólidos de xantana no leito de acordo com a partícula inerte

Valores	Material Inerte	
	Vidro	ABS
$F_{cal}/F_{tab}$	9,5	4,4
$F_{FA}/F_{tab}$	0,9	0,6
$R^2$	78,55	77,66
Média	65,552	49,447
Temperatura T	-2,508	-5,276
Temperatura T <sup>2</sup>	NS	1,959
Vazão de pasta V	6,664	4,526
Vazão de pasta V <sup>2</sup>	-7,153	0,989
% Ar no jorro J	NS	1,499
% Ar no jorro J <sup>2</sup>	-0,804	3,425
T*V	-1,208	-0,708
T*J	-2,354	NS
V*J	4,729	NS

NS: Efeito não significativo

A retenção de material no leito é mostrada na Figura 14 em função da temperatura do ar e a vazão de suspensão, para diversas porcentagens de vazão de ar no jorro para ambos materiais inertes. Observa-se que as superfícies de respostas apresentaram tendências semelhantes exceto na forma e valores. O acúmulo de sólidos dentro do leito aumentou a medida que a vazão de alimentação também aumentou. A retenção de material pode ser causada pela intensificação das forças coesivas devido à coexistência de camadas líquidas fixas e pontes líquidas, como consequência das baixas taxas de evaporação. O leito operado com inertes de vidro e uma vazão de suspensão maior que 2 g/min apresentou uma alta retenção de sólidos que atingiu valores de até 70%. Esta mesma retenção de sólidos foi obtida usando termoplásticos de ABS com uma vazão de pasta maior que 4 g/min. Usando inertes de vidro, esta retenção mostrou uma tendência a diminuir com o aumento da aeração no ânulo, o que também foi observado por Christ (2006) na secagem de clara de ovo. No entanto, com o uso de termoplásticos de ABS a retenção de sólidos foi mais dependente da temperatura de secagem que da aeração no ânulo. A alta afinidade de adesão observada entre a suspensão de xantana e as partículas de vidro pode ser devida

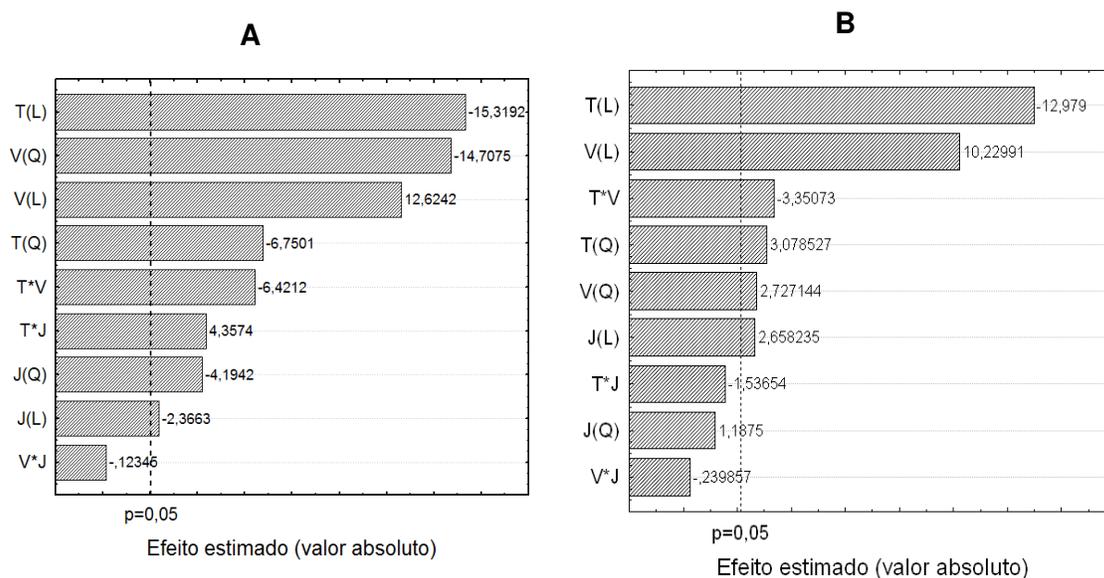
as forças de atração entre as partículas causada pela maior tensão superficial (MAZZONE et al.,1987).



**Figura 14** Retenção de sólidos em função da temperatura de secagem e vazão de suspensão de xantana para diferentes porcentagens de ar no jorro: A (43%), B (60%) e C (77%) para vidro; D (43%), E (60%) e F (77%) para ABS.

### 4.2.1.3 Efeito das condições de secagem sobre o teor final de umidade

Na Figura 15 pode-se observar os efeitos estatísticos das diferentes variáveis do processo de secagem sobre a umidade final do pó de xantana. A temperatura do ar de secagem (T) junto com a vazão de suspensão (V) foram novamente as variáveis que mais influenciaram no teor de umidade final do pó. O efeito da temperatura e da vazão de alimentação da suspensão foram negativo e positivo, respectivamente, no teor de umidade final da xantana.



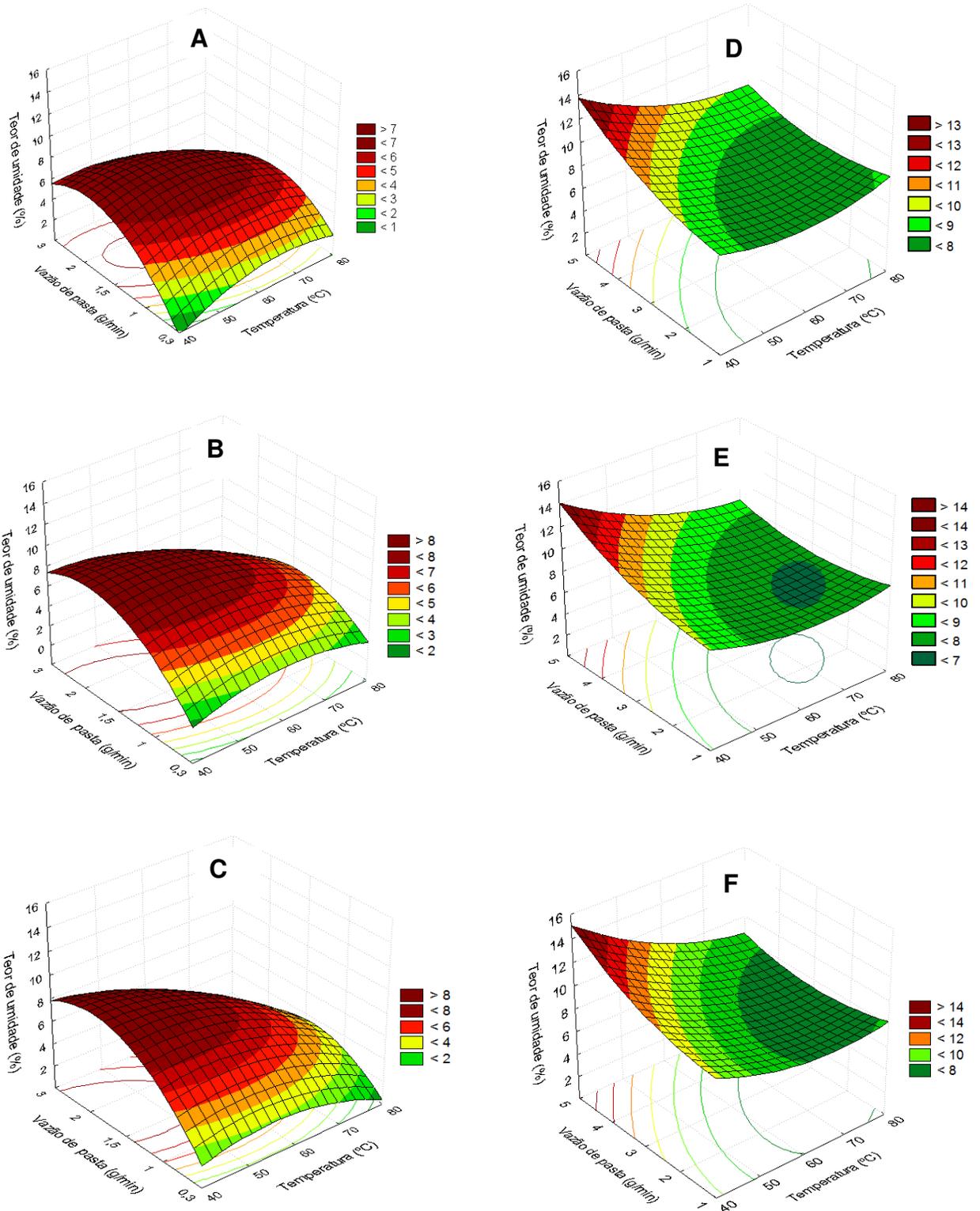
**Figura 15** Diagrama de Pareto para a resposta teor de umidade do pó de xantana seca com partículas de vidro (A) e ABS (B).

A análise de variância (ANOVA) para o teor de umidade e os coeficientes do modelo de regressão são apresentados na Tabela 14. De acordo com os resultados a regressão foi estatisticamente significativa ( $F_{cal} > F_{tab}$ ) com uma qualidade do ajuste de 52,43% para vidro e 72,83% para ABS, indicando um ajuste razoável entre os valores experimentais e previstos pelo modelo. A falta de ajuste não foi estatisticamente significativa ( $F_{FA} < F_{tab}$ ).

**Tabela 14** Coeficientes de regressão do modelo matemático codificado para prever o teor de umidade final do pó de xantana

Valores	Material Inerte	
	Vidro	ABS
$F_{cal}/F_{tab}$	2,3	4,1
$F_{FA}/F_{tab}$	0,95	0,83
$R^2$	52,43	72,83
Média	8,055	7,83
Temperatura T	-0,751	-1,708
Temperatura T <sup>2</sup>	-0,402	0,463
Vazão de pasta V	0,618	1,346
Vazão de pasta V <sup>2</sup>	-0,875	0,393
% Ar no jorro J	-0,116	0,349
% Ar no jorro J <sup>2</sup>	-0,250	NS
T*V	-0,411	-0,576
T*J	0,279	NS

Na Figura 16 é apresentado o teor de umidade final do pó de xantana. Baixas vazões de suspensão associadas com altas temperaturas do ar de secagem diminuíram a umidade do pó o qual é um efeito típico na secagem de suspensões (BACELOS et al., 2005; BENALI e AMAZOUS, 2006; PAGLIARUSSI et al., 2006; RÉ et al., 1990). O aumento da umidade do pó, com elevadas vazões de suspensão, poderia ser atribuído à tendência de saturação do ar de secagem que poderia levar ao colapso em condições extremas (CUNHA et al., 2006). Conseqüentemente, o aumento de areação no ânulo exerceu um efeito significativo. Observa-se que o leito operado com vidro forneceu um pó com um teor de umidade na faixa de 3,5-8% , o que foi menor ao obtido no leito de ABS (6-12%). Esta diferença pode ser atribuída, ao menos em parte, ao fato do leito ter operado com partículas termoplásticas a maiores taxas de alimentação de suspensão. No entanto, os teores de umidade estão dentro da escala de valores comumente obtidos em outros secadores comerciais. Altos valores do teor de umidade estão associados a baixas eficiências de produção de pó e a altas quantidades de sólidos retidos dentro do leito.



**Figura 16** Teor final de umidade em função da temperatura de secagem e vazão de suspensão de xantana para diferentes porcentagens de ar no jorro: A (43%), B(60%) e C (77%) para vidro; D (43%), E (60%) e F (77 %) para ABS.

#### 4.2.2 Avaliação das características fluidodinâmicas

Nas Tabelas 15 e 16 são apresentadas as variáveis fluidodinâmicas avaliadas de acordo com as condições do processo de secagem determinadas pelo planejamento experimental. Observa-se que quando o leito é operado com os inertes de ABS, a velocidade da partícula no ânulo e jorro, altura máxima de jorro e largura da fonte foram maiores do que o leito operado com partículas inertes de vidro o que é devido principalmente à menor densidade do termoplástico. Além disso, observa-se que para as partículas de ABS existe maior variação nas medidas particularmente na altura do jorro, indicando uma maior instabilidade dinâmica presente no leito (VIEIRA et al., 2004).

**Tabela 15** Variáveis fluidodinâmicas avaliadas na secagem de xantana usando partículas inertes de ABS

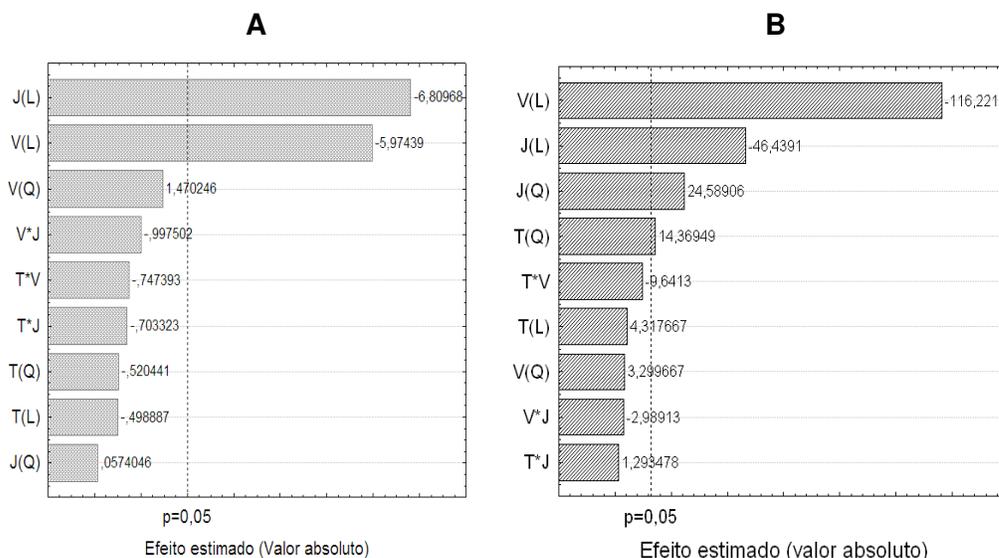
Ensaio experimental	Velocidade partícula no ânulo (m/min)	Velocidade partícula no jorro (m/min)	Altura de jorro (cm)	Largura da fonte (cm)
1	7,2±1,6	19,6±2,2	27,9±1,8	>30
2	6,5±1,0	18,1±2,1	29,3±2,1	>30
3	3,8±1,6	19,8±1,9	27,8±1,8	>30
4	3,3±1,3	18,1±2,3	29,4±1,6	>30
5	7,2±1,6	20,9±1,6	27,6±1,2	>30
6	6,7±0,9	19,1±0,9	29,4±1,6	>30
7	3,8±0,9	19,7±1,8	27,8±1,2	>30
8	3,1±1,4	18,8±1,8	29,4±0,9	>30
9	4,6±1,5	18,8±1,9	31,1±1,3	>30
10	4,6±1,6	18,7±1,8	31,3±1,9	>30
11	7,8±1,3	18,8±1,6	31,2±1,9	>30
12	2,9±1,5	16,3±2,1	24,8±1,2	>30
13	7,5±1,9	26,1±2,8	21,4±1,0	>30
14	3,4±0,9	19,7±2,	34,2±2,1	>30
15	4,6±1,1	18,8±2,6	31,8±2,2	>30
16	4,7±1,2	18,9±2,1	31,1±1,9	>30

**Tabela 16** Variáveis fluidodinâmicas avaliadas na secagem de xantana usando partículas inertes de vidro

Ensaio experimental	Velocidade partícula no ânulo (m/min)	Velocidade partícula no jorro (m/min)	Altura de jorro (cm)	Largura da fonte (cm)
1	1,6±0,4	3,9±0,6	16,5±0,1	16,1±2,1
2	1,1±0,4	4,4±0,8	17,7±0,2	17,59±1,9
3	1,5±0,3	3,9±0,8	16,5±0,3	15,2±2,1
4	0,8±0,3	4,5±0,5	17,9±0,3	16,85±1,9
5	1,6±0,5	3,9±0,7	16,2±0,4	16,21±2,0
6	1,1±0,2	4,6±0,9	17,8±0,2	17,56±2,5
7	1,4±0,1	4,1±0,9	16,8±0,1	15,32±2,1
8	0,5±0,1	4,4±0,5	17,9±0,2	16,28±1,9
9	1,2±0,3	4,2±0,3	17,3±0,3	16,58±2,0
10	1,2±0,3	4,1±0,9	17,3±0,1	16,62±2,3
11	2,2±0,3	4,3±0,2	17,2±0,1	17,1±1,6
12	0,9±0,1	4,3±0,7	17,4±0,2	16,38±1,8
13	1,6±0,4	3,9±0,5	14,90±0,2	14,36±1,9
14	0,9±0,3	6,3±0,4	19,4±0,2	18,32±2,1
15	1,2±0,2	4,8±0,8	17,3±0,2	16,32±2,2
16	1,2±0,1	4,3±0,6	17,3±0,2	16,45±1,9

#### 4.2.2.1 Efeito das condições de secagem sobre velocidade da partícula no Ânulo

O diagrama de Pareto apresentado na Figura 17 mostra os efeitos das variáveis estudadas sobre a velocidade da partícula no ânulo. Observa-se que a quantidade de ar que passa pelo jorro (J) e a vazão de suspensão (V) mostraram-se estatisticamente significativas e com efeitos negativos para ambos inertes. O aumento da vazão de suspensão e da quantidade de ar que passa pelo jorro (diminuindo a quantidade de ar que passa pelo ânulo) diminuiu a velocidade da partícula inerte. No entanto, a temperatura de secagem não teve efeito estatisticamente significativo sobre esta resposta fluidodinâmica.



**Figura 17** Diagrama de Pareto para a resposta velocidade da partícula no ânulo para suspensões de xantana seca com partículas inertes de vidro (A) e ABS (B).

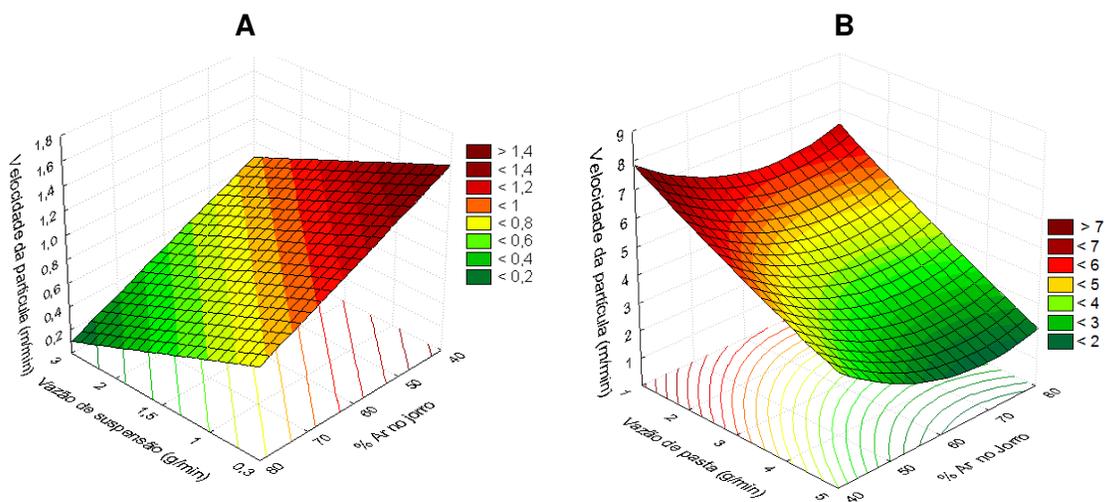
De acordo com os resultados apresentados na Tabela 17 a regressão foi significativa ( $F_{cal} > F_{tab}$ ) para um intervalo de confiança de 95% com uma qualidade de ajuste de  $R^2$  de 52,12% para o vidro e de 69,93% para ABS. A falta de ajuste apresentou um efeito não significativo ( $F_{FA} < F_{tab}$ ), portanto o modelo poder ser utilizado para a predição dos dados experimentais.

**Tabela 17** Coeficientes de regressão do modelo matemático codificado para prever a velocidade da partícula no ânulo na secagem de xantana

Valores	Material Inerte	
	Vidro	ABS
$F_{cal}/F_{tab}$	11,59	1,91
$F_{FA}/F_{tab}$	0,83	0,01
$R^2$	52,12	69,93
Média	1,233	3,97
Temperatura $T^2$	NS	0,277
Vazão de pasta V	-0,253	-2,046
% Ar no jorro J	-0,289	-0,817
% Ar no jorro $J^2$	NS	0,495

Mostra-se na Figura 18 a velocidade da partícula no ânulo para o processo de secagem para suspensões de goma xantana usando vidro e ABS como

material inerte. A velocidade da partícula decresceu com o aumento da vazão de suspensão e diminuição da aeração no ânulo. Neste caso, quando são usadas altas vazões de alimentação, as forças coesivas devido às pontes líquidas na superfície da partícula, são suficientemente elevadas para inibir o deslizamento partícula-partícula, o que impede seu livre deslocamento dentro do leito (SEVILLE et al., 2000). Assim, o atrito entre as partículas é altamente desfavorecido durante a secagem para altas vazões de suspensão o que pode dificultar a remoção dos sólidos aderidos à superfície do inerte. Também, nota-se que as velocidades de deslocamento no ânulo são maiores para as partículas termoplásticas de ABS, o que leva a taxas de cisalhamentos maiores e conseqüentemente, melhores desempenho da secagem quanto à produção de pó e retenção de sólidos. Para o leito com vidro as velocidades ficaram dentro da faixa de 0,2-2 cm/min e para ABS de 2-8 cm/min situação que pode ter levado à alta turbulência encontrada no ânulo. Baixas velocidades de partículas podem ser associadas com alta retenção de sólidos (Figura 14) no leito e altos teores de umidade (Figura 16).



**Figura 18** Velocidade da partícula inerte no ânulo em função da vazão de suspensão de xantana e % de vazão de ar no jorro: Vidro (A) e ABS (B).

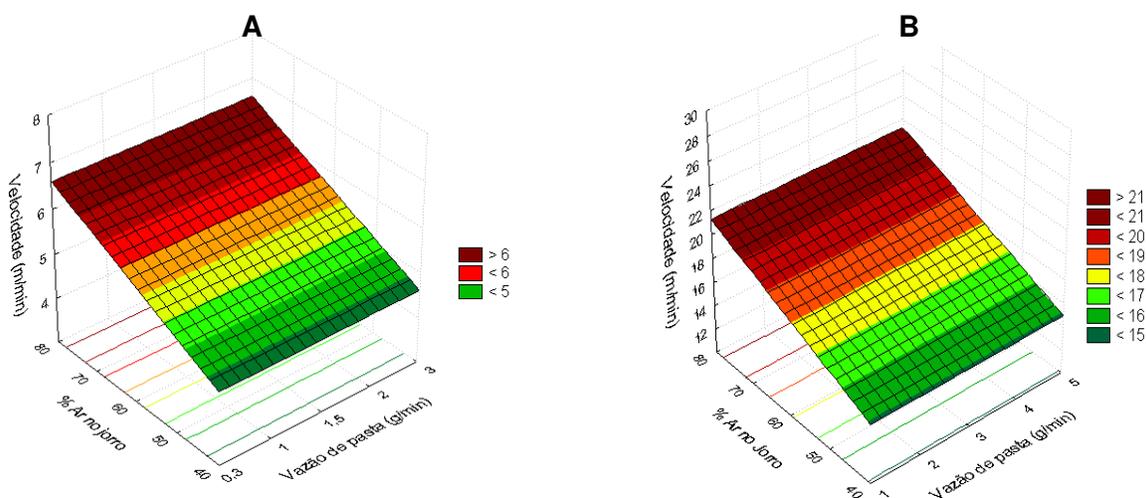
#### 4.2.2.2 Efeito das condições de secagem sobre a velocidade da partícula no jorro

A análise de variância (ANOVA) e os coeficientes do modelo para a velocidade da partícula no jorro é apresentada na Tabela 18. De acordo com os resultados, a regressão foi estatisticamente significativa ( $F_{cal} > F_{tab}$ ), porém a falta de ajuste é significativa ( $F_{FA} > F_{tab}$ ) mostrando que o modelo pode ser usado somente para indicar tendências.

**Tabela 18** Coeficientes de regressão do modelo matemático codificado para a velocidade da partícula no jorro na secagem de xantana

Valores	Material Inerte	
	Vidro	ABS
$F_{cal}/F_{tab}$	1,47	1,21
$F_{FA}/F_{tab}$	1,3	3,2
$R^2$	59,60	51,25
Média	5,582	18,033
% Ar no jorro J	0,521	1,562

Na Figura 19, observa que a velocidade da partícula no jorro aumenta com o aumento da vazão de ar no jorro, tanto com as partículas de vidro e ABS. No entanto, o aumento foi mais relevante para as partículas de ABS.

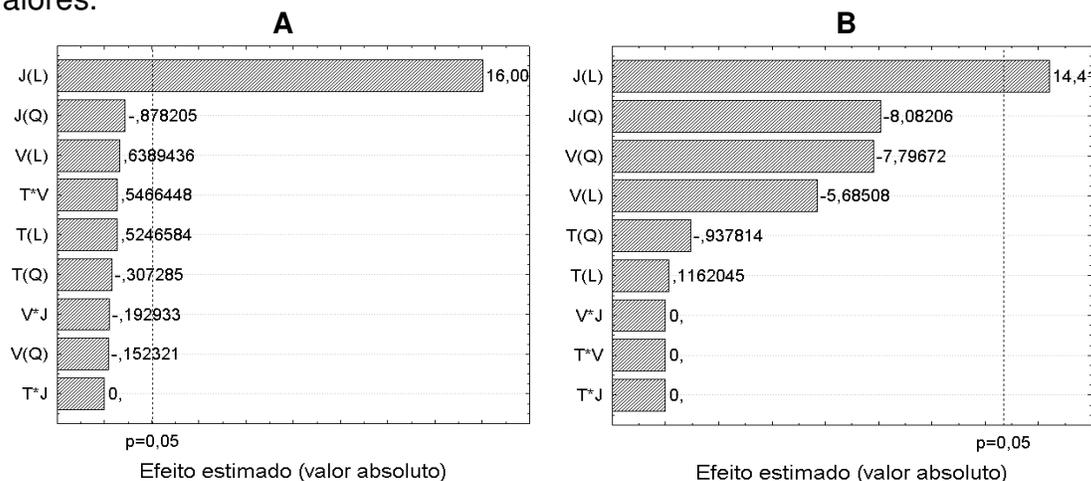


**Figura 19** Velocidade da partícula inerte no jorro em função da vazão de suspensão de xantana e % de vazão de ar no jorro: Vidro (A) e ABS (B).

As velocidades das partículas de vidro 2-7 m/min foram menores comparadas com as velocidades das partículas termoplásticas 11-28 m/min. Esta diferença de velocidades das partículas pode ser explicada pela diferenças em suas velocidades terminais ( $V_t$ ) e a relação para velocidades relativas de uma partícula se deslocando dentro de um fluido  $U_p = V_f - V_t$  (YANG, 2003) . O valor da velocidade terminal ( $V_t$ ) para as partículas de ABS e vidro foi calculada usando os dados da Tabela 4 e seguindo a metodologia de cálculo sugerida por Kunni e Levenspiel (2003). Os resultados mostraram valores para o vidro de  $V_{TV} = 17,40$  m/s e para ABS de  $V_{TABS} = 4,7$  m/s. Por tanto, para as mesmas condições de vazão de ar no jorro a velocidade relativa da partícula é maior para o ABS o que concorda com a Figura 19. Nota-se também que teoricamente dentro do jorro deve ser estabelecida uma velocidade superficial do ar maior que 17,40 m/s no caso do vidro e de 4,7 m/s para o ABS para que se inicie o deslocamento das partículas.

#### 4.2.2.3 Efeito das condições de secagem sobre a altura do jorro

Apresenta-se na Figura 20 os efeitos das condições de secagem sobre a altura máxima de jorro. A quantidade de ar que passa pelo jorro (J) é a única variável estatisticamente significativa e mostrou um efeito positivo. Assim, um aumento da porcentagem de vazão no ar no jorro faz que a partícula atinja alturas maiores.



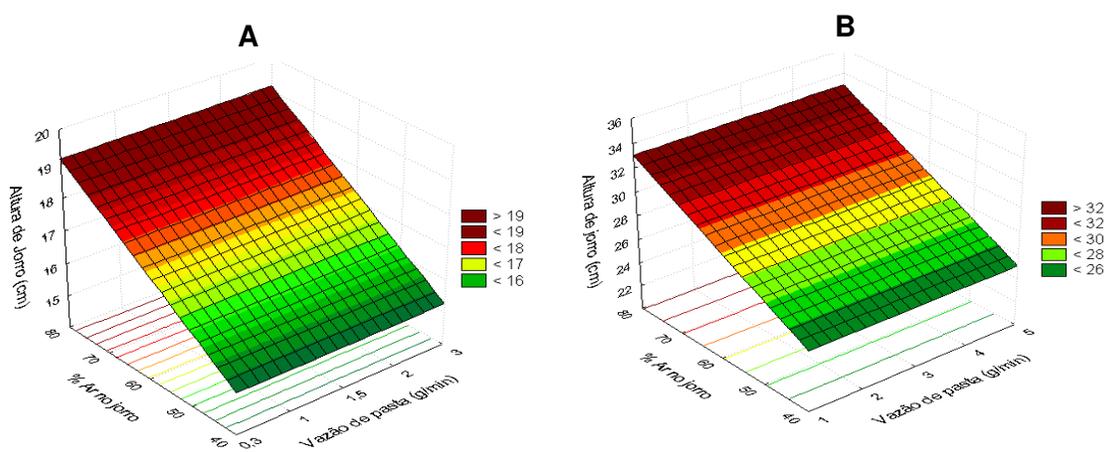
**Figura 20** Diagrama de Pareto para a variável altura máxima de jorro (Aj) em função da partícula inerte: Vidro (A) e ABS (B).

A Tabela 19 apresenta a análise de variância (ANOVA) e os coeficientes do modelo da regressão para a altura de jorro. Os resultados indicam que a regressão foi estatisticamente significativa ( $F_{cal} > F_{tab}$ ) para as duas partículas inertes. Para o vidro a qualidade obtida para o ajuste foi de 74,52 % e para o ABS foi de 84,90 %. A falta de ajuste foi estatisticamente não significativa ( $F_{FA} < F_{tab}$ ) para ambos modelos, ou seja, podem ser usados para prever os dados experimentais de altura do jorro.

**Tabela 19** Coeficientes de regressão do modelo matemático para a altura de jorro na secagem de xantana em função da partícula inerte

Valores	Material Inerte	
	Vidro	ABS
$F_{cal}/F_{tab}$	33,10	10,31
$F_{FA}/F_{tab}$	0,85	0,1
$R^2$	74,52	84,09
Média	17,292	29,083
% Ar no Jorro J	0,952	1,986

A altura do jorro no processo de secagem para as partículas de vidro e ABS é apresentada na Figura 21. Aumentando a vazão de ar no jorro a velocidade da partícula foi maior (Figura 19) fazendo que a partícula dispusesse de maior energia cinética e, portanto, potencial atingindo alturas maiores.

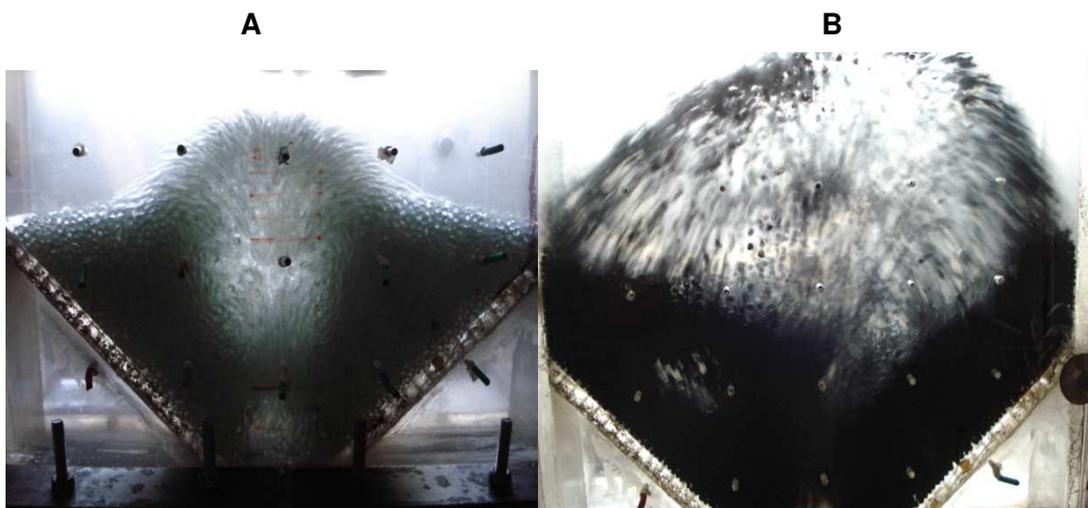


**Figura 21** Altura de jorro ao final do processo de secagem em função das condições de processo para suspensões de xantana secas com vidro (A) e ABS (B).

As medições da altura do leito para as partículas de vidro nas condições experimentais de secagem não apresentaram variação com relação ao leito sem fluidizar (leito fixo), portanto conclui-se que o ânulo atua praticamente como um leito empacotado, de porosidade aproximadamente igual ao do leito fixo de vidro e com altura de 12,30 cm. Para as partículas de ABS, a altura do leito fixo foi de 13,5 cm e para as condições de secagem particularmente, para porcentagens de vazão de ar no ânulo acima de 40% ( $40 \text{ m}^3/\text{h}$ ) de 15,2 cm. Assim, o leito com partículas de ABS trabalhou em regime de jorro fluidizado fornecendo uma maior turbulência e circulação das partículas, levando um melhor desempenho do secador.

#### 4.2.2.4 Efeito das condições de secagem sobre a largura da fonte

A análise de variância para um nível de significância de 5% não mostrou efeito estatístico das condições de secagem sobre a largura da fonte para o leito com vidro (Figura 22A). Assim, um valor médio de 16,45 cm pode ser considerado representativo para a largura da fonte em leito com vidro. Para a largura da fonte do leito com ABS as partículas colidiam nas paredes laterais do secador o que não permitiu determinar quantitativamente sua medição. Assim, a largura da fonte formada foi considerada igual ou maior à largura do secador (Figura 22B).

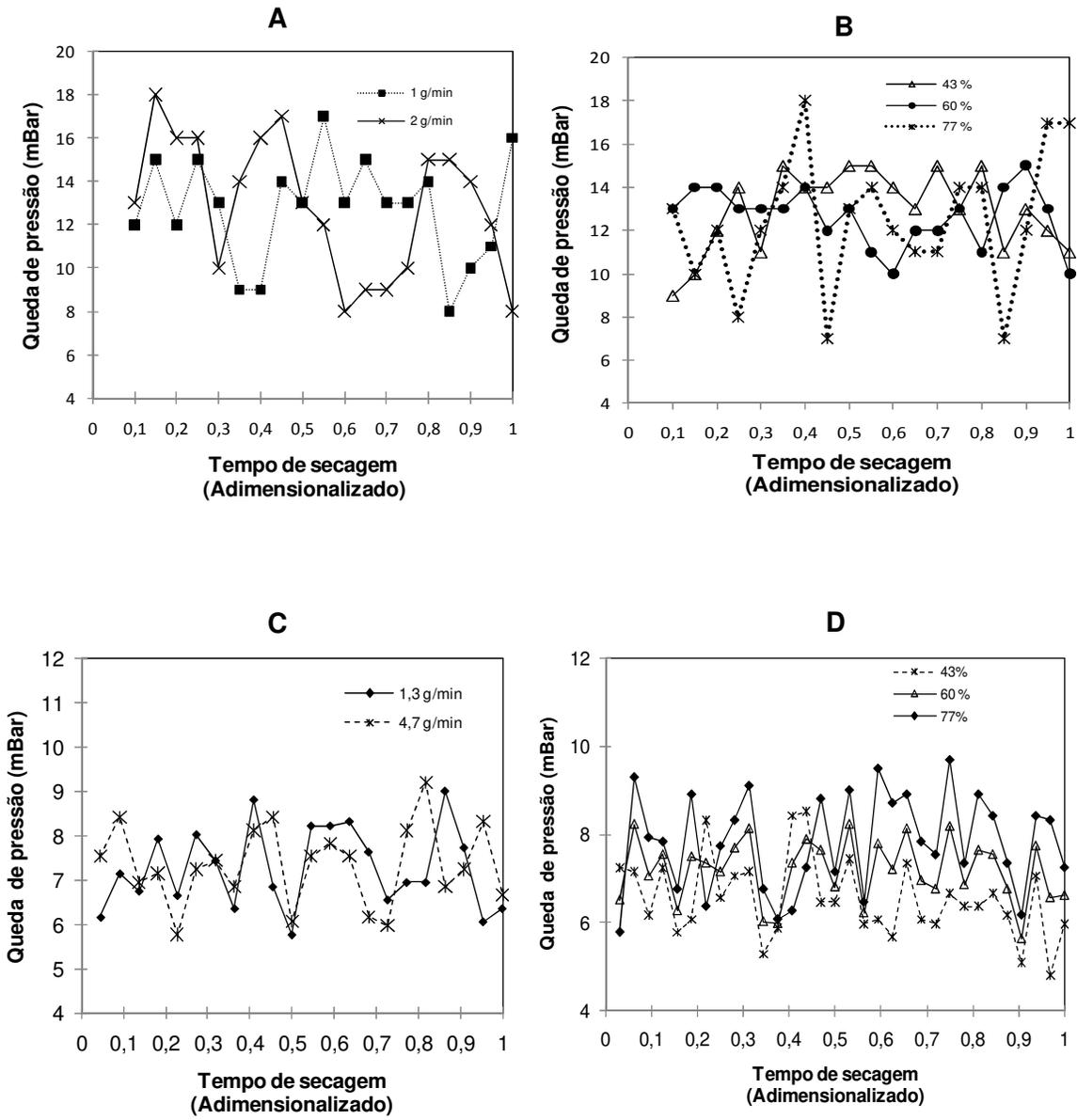


**Figura 22** Largura da fonte para o leito de partículas: Vidro (A) e ABS (B).

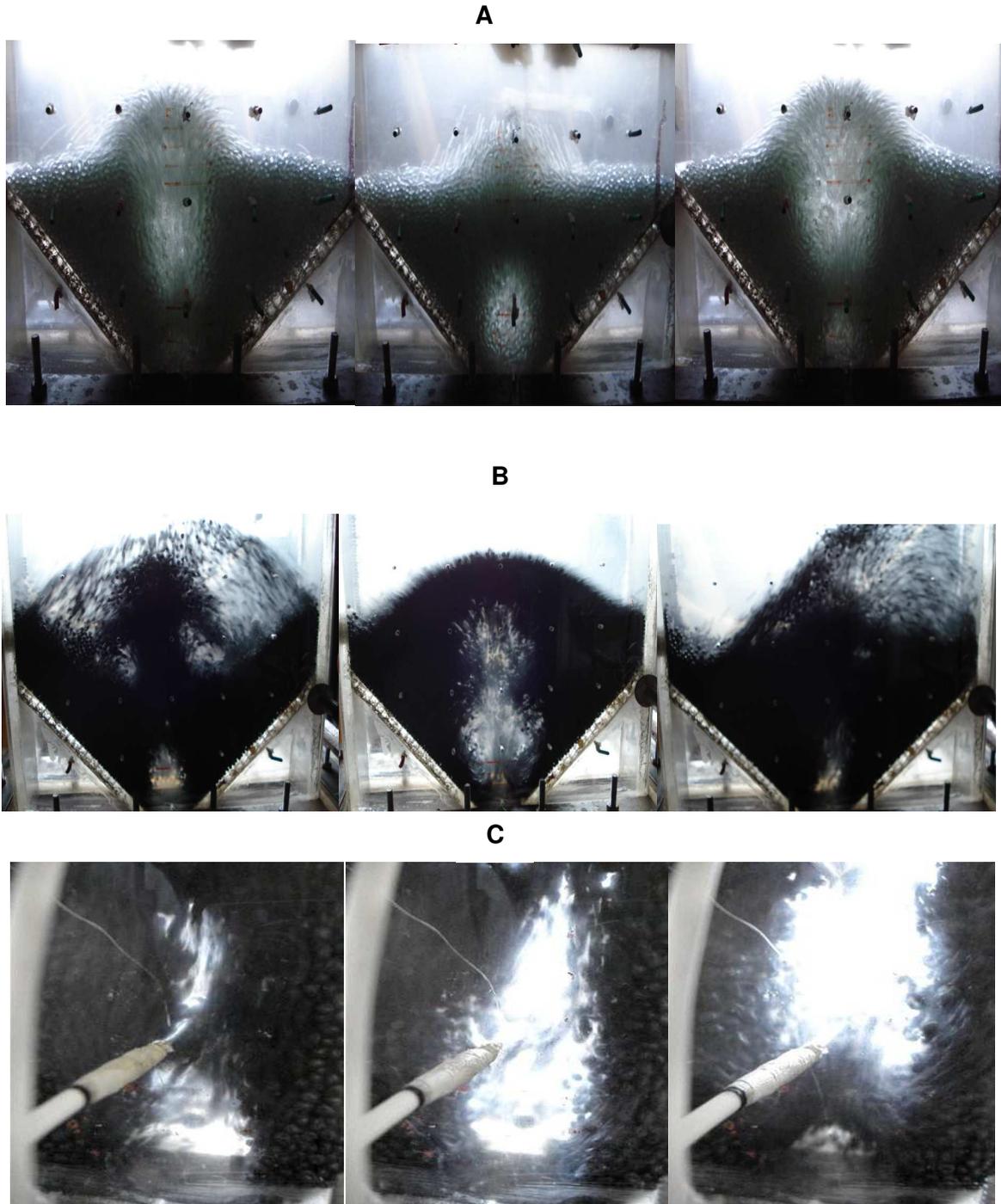
#### 4.2.2.5 Queda de pressão no leito

Apresenta-se na Figura 23 a variação da queda de pressão no leito para diversas condições experimentais. Os resultados indicaram que o escoamento do ar no leito de jorro resultou num leito pulsante e instável com uma faixa de variação de 8-20 mBar para o vidro e para o ABS de 6-10 mBar. De acordo com Liu et al.(2008) e Zhong et al.(2006a,b) este resultado pode ser devido ao estrangulamento do jorro levando a mudanças periódicas da forma e geometria do jorro. Observa-se na Figura 23 (A,C) que as maiores variações de queda de pressão (máximas e mínimas) foram verificadas quando foi aumentada a vazão de ar no jorro. Além disso, as quedas de pressão no leito foi maior no leito de partículas de vidro devido a que o secador foi operado com um peso maior (1,5 kg). As altas variações de pressão do leito não permitiram visualizar as alterações de pressão com o aumento da vazão de suspensão (Figuras 23 B, D). Medeiros et al. (2002) e Vieira et al. (2004) e constataram uma diminuição da queda de pressão para um leito mais úmido, devido a que quando a umidade aumenta, o ânulo torna-se mais compactado, fazendo com que uma fração de ar passe através de canais preferenciais. Em neste caso, foi observada a formação de cavidades dentro do jorro (Figura 24), próximo à placa distribuidora de ar que levaram a uma instabilidade fluidodinâmica (variação de pressão), concordando com Zhonghua e Mujumdar (2008).

Na Figura 24, encontra-se fotografia do sistema em intervalos de tempo de 0,03 s. Observa-se que existe um deslocamento da cavidade ao longo do jorro e que se inicia na placa distribuidora de ar e termina no topo do jorro originando uma alta instabilidade na variação de pressão, altura de jorro e largura da fonte, principalmente com as partículas de ABS.



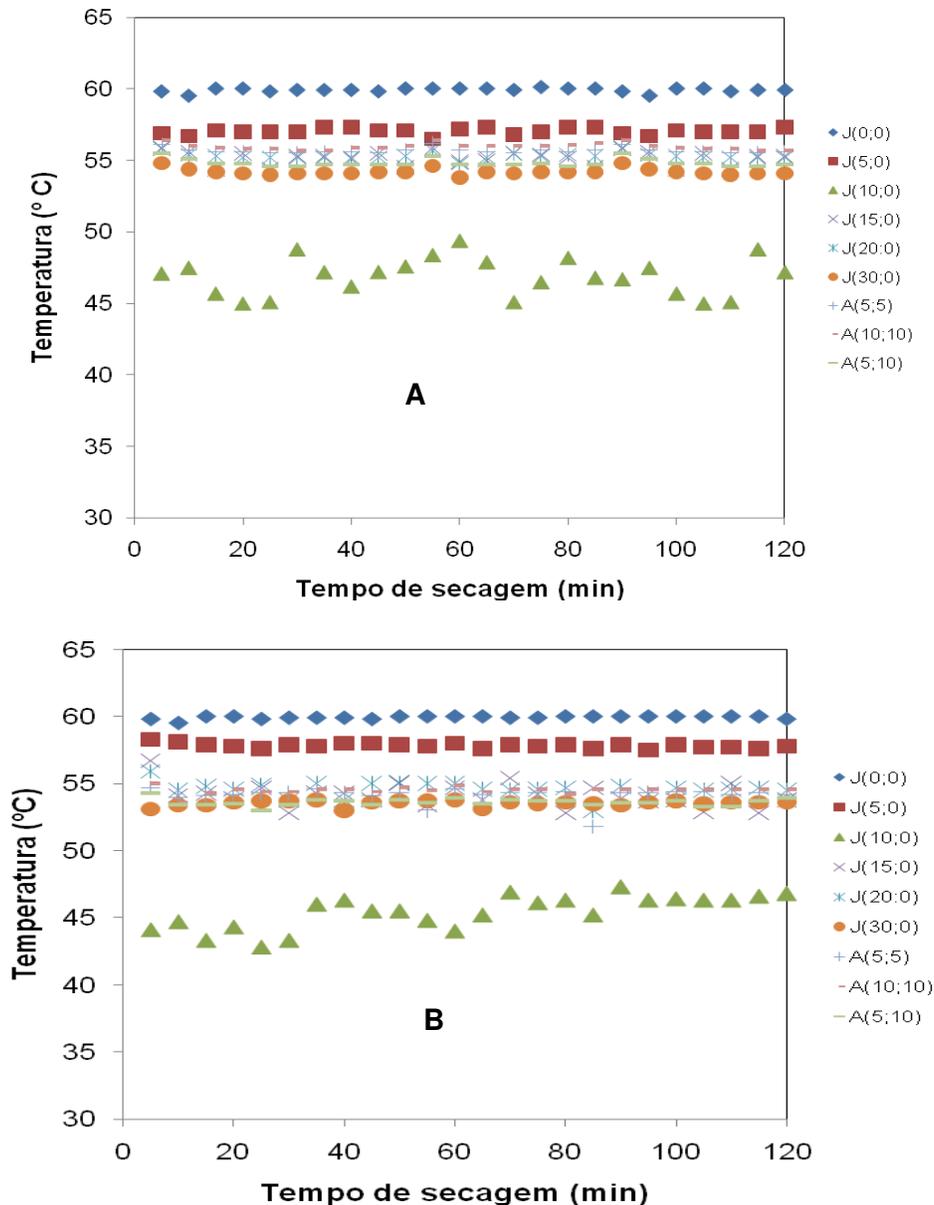
**Figura 23** Variação da queda de pressão no leito ao longo do tempo do processo para diferentes condições de secagem de xantana usando vidro (A e B) e ABS (C e D).



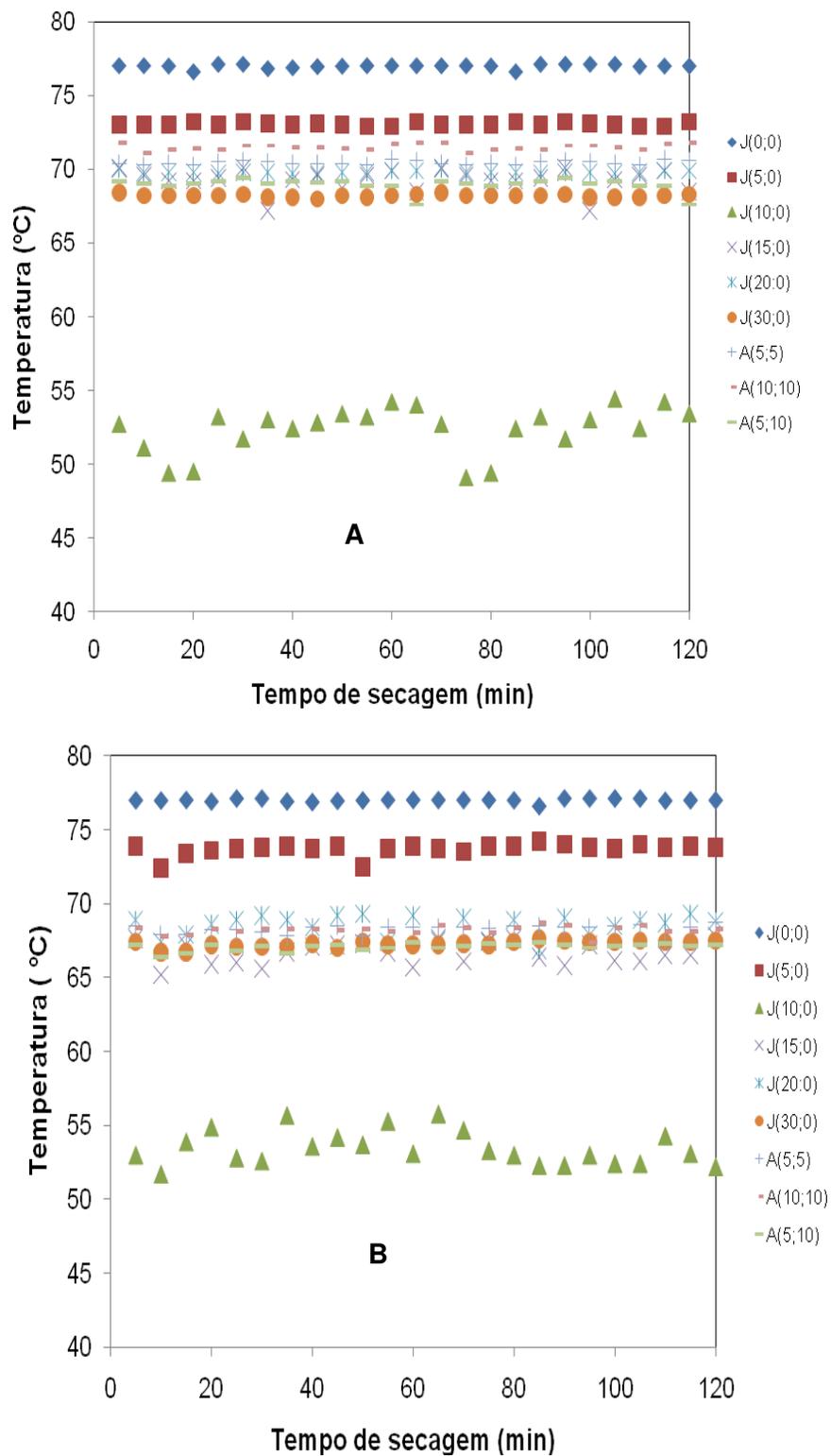
**Figura 24** Formação de cavidades, estrangulamento e mudanças na geometria do jorro com tempos de defasagem de 0,03 s na secagem de xantana usando vidro (A) e ABS (B e C).

#### 4.2.2.6 Distribuição de temperaturas dentro do leito

Mostra-se nas Figuras 25 e 26 uma distribuição típica de temperaturas em função do tempo de secagem para diferentes posições no leito. As diferentes posições no jorro J (x;y) e ânulo A (x;y), sendo que as posições x e y estão em cm e foram referenciadas com relação ao eixo central do jorro.



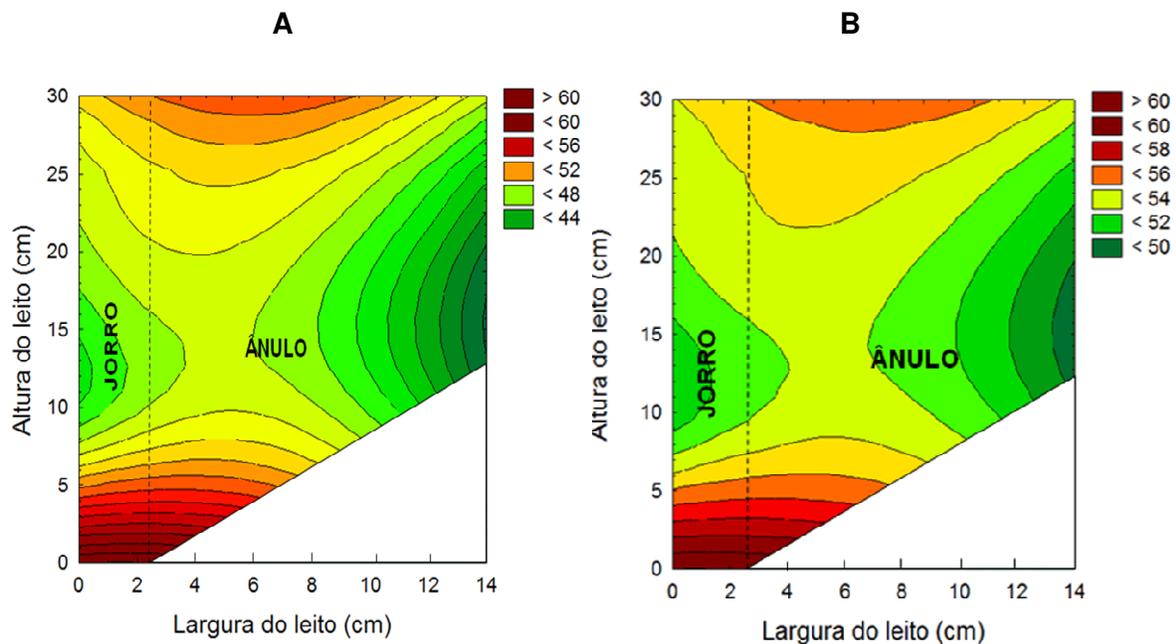
**Figura 25** Distribuição de temperatura no leito em função do tempo de secagem e posição no Jorro (J) e Ânulo (A) usando um leito de partículas de vidro (A) e ABS (B) com uma vazão de pasta de xantana de 1,5 g/min.



**Figura 26** Distribuição de temperatura no leito em função do tempo de secagem e posição no Jorro (J) e Ânulo (A): vidro (A) e ABS (B) com uma vazão de pasta de xantana de 3 g/min.

As temperaturas dentro do leito operado com partículas de vidro e ABS variaram com a posição, mas se mantiveram constantes ao longo do tempo de secagem. Portanto, o secador operou em regime estável para todas as condições de secagem. Observa-se que a temperatura dentro do ânulo foi quase constante fazendo atingir condições isotérmicas. De acordo com Arsenijevic et al. (2002) esta condição isotérmica no ânulo é originada pela rápida e elevada mistura de partículas. As temperaturas mais baixas foram localizadas a 10 cm da base (J(10,0)), o que pode ser associado à formação de uma zona fria estabelecida pela alimentação da suspensão que foi localizada a 5 cm da base do jorro.

Os mapas de distribuição típicos de temperatura são mostrados na Figura 27, indicando que a evaporação tomou lugar no jorro e na base do ânulo (BARRETT e FANE, 1990).



**Figura 27** Distribuição de temperatura dentro do leito de partículas inertes de vidro na secagem de xantana: A (vazão de pasta 1,5 g/min) e B (vazão de pasta 3 g/min).

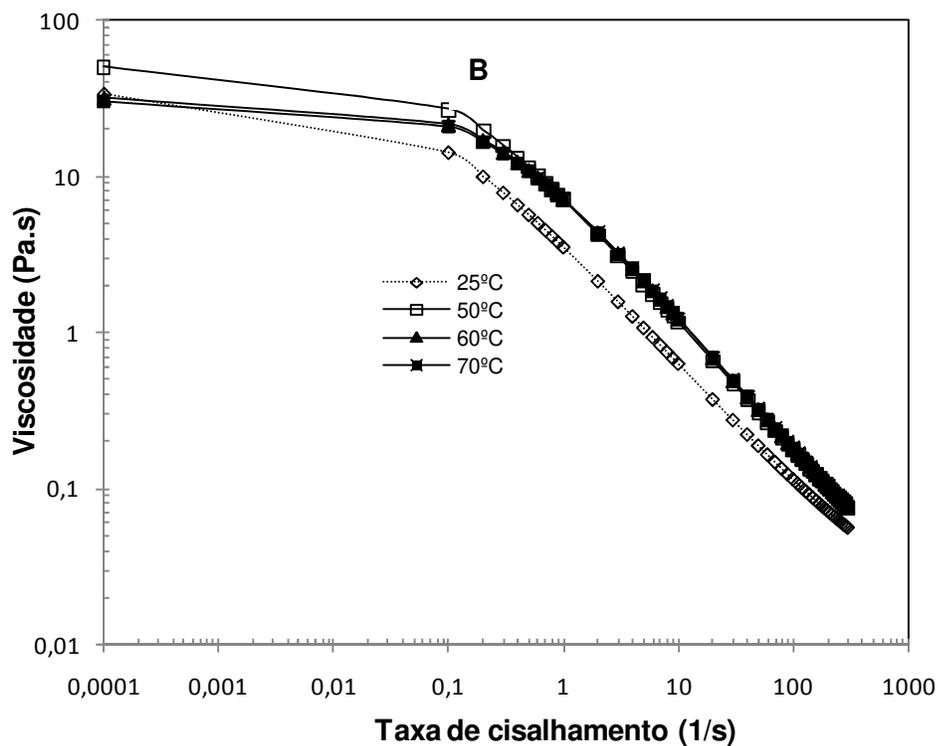
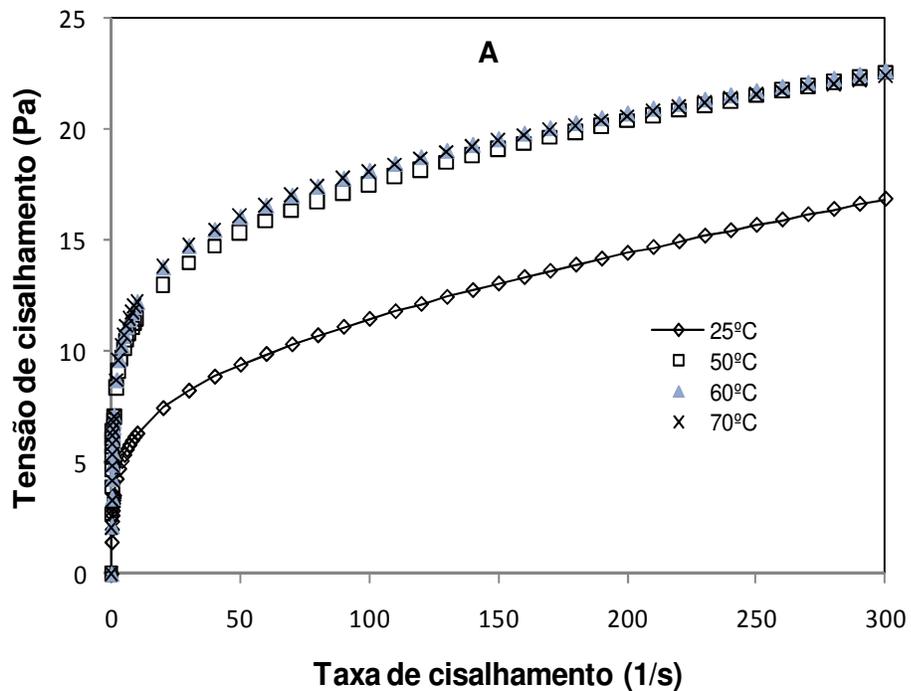
A zona fria no jorro que foi criada pelo ponto de alimentação da pasta pode ser observada com a queda da temperatura do ar tendendo a diminuir com a altura. Este decréscimo de temperatura deve-se à quantidade de água que estava

sendo evaporado pelo ar quente ao longo do jorro (ARSENIJEVIC et al., 2002). Também, nota-se na base do ânulo a existência de uma zona quente criada possivelmente pela passagem de ar quente da base do jorro para o ânulo e que próximo à parede lateral do secador existiria uma zona fria. No entanto, esta última predição não é fisicamente possível e pôde ser originada pela falta de dados nessa região.

### **4.3 Reologia das suspensões de goma xantana**

#### **4.3.1 Curvas de escoamento para xantana comercial**

Na Figura 28, apresentam-se os reogramas para as suspensões de xantana comercial (1% p/p) para diferentes temperaturas. Além da pseudoplasticidade (Figura 28A) apresentada para todas as temperaturas estudadas, os resultados mostram que a viscosidade da xantana em suspensão, aumentou com a temperatura. O forte aumento da viscosidade ocorreu até 50°C e acima desta temperatura o efeito sobre a viscosidade não foi significativo (Figura 28B). Este comportamento atípico parece estar associado à transição de mudança estrutural desta macromolécula que passa de uma forma ordenada “rod-like” para uma desordenada “random coil” com o aumento da temperatura (ROCHEFORT e MIDDLEMAN, 1987). De acordo com Pelletier et al. (2001), para suspensões de xantana 1% (p/p), a temperatura de transição do ponto médio ( $T_m$ ) é próxima de 52°C, o que concorda com os resultados obtidos.



**Figura 28** Curvas de escoamento para suspensões de goma xantana comercial em função da taxa de cisalhamento: Tensão (A) e Viscosidade (B).

Na Tabela 20, apresenta-se o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o valor quadrático médio do erro (RMS) para os diferentes modelos ajustados em função da temperatura. Os resultados mostraram que foi o modelo de Cross que apresentou o maior valor de  $R^2$  e menor valor do RMS, o que pode ser atribuído a que é o modelo com maior número de parâmetros de ajuste (Quatro).

**Tabela 20** Parâmetros de comparação dos modelos de ajuste para suspensões de xantana comercial

Temperatura (°C)	MODELO DE AJUSTE					
	Lei da Potência		Herschel	Buckley	Modelo de Cross	
	$R^2$	RMS	$R^2$	RMS	$R^2$	RMS
25	0,96	1,423	0,96	1,521	0,99	0,352
50	0,95	1,123	0,97	1,623	0,99	0,563
60	0,96	1,852	0,97	1,856	0,99	0,321
70	0,96	1,765	0,96	1,524	0,99	0,345

Na Tabela 21 são mostrados os parâmetros de ajuste do modelo de Cross para suspensões de xantana comercial a diferentes temperaturas junto com o teste de Tukey para um nível de significância de 5%. Os valores indicaram uma alta pseudoplasticidade ( $m < 1$ ), característica representativa de moléculas semi-rígidas (ANDREWS et al., 1998), como a xantana.

**Tabela 21** Coeficientes do modelo de Cross para as suspensões de xantana comercial

Temperatura (°C)	Parâmetros do modelo de Cross				$R^2$
	$\eta_0$ (Pa.s)	$\eta_\infty$ (Pa.s)	$\lambda$ (s)	m	
25	33,62 <sup>A</sup>	0,011 <sup>A</sup>	13,11 <sup>A</sup>	0,776 <sup>A</sup>	0,99
50	50,15 <sup>B</sup>	0,0097 <sup>A</sup>	8,47 <sup>B</sup>	0,83 <sup>A</sup>	0,99
60	32,82 <sup>A</sup>	0,0077 <sup>A</sup>	4,25 <sup>C</sup>	0,86 <sup>A</sup>	0,99
70	31,74 <sup>A</sup>	0,0065 <sup>A</sup>	3,98 <sup>D</sup>	0,86 <sup>A</sup>	0,99

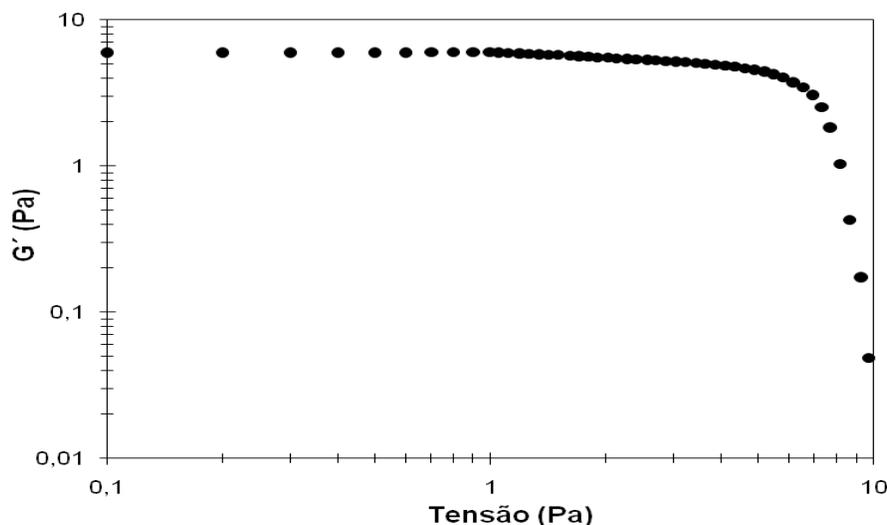
\*Valores médios com letra diferente são estatisticamente diferentes para um nível de significância de 5%.

O teste de Tukey indicou que existe um efeito estatisticamente significativo da temperatura da suspensão para as variáveis  $\eta_0$  e  $\lambda$ . Portanto, o melhor efeito estabilizante da suspensão (maior  $\eta_0$ ) é estabelecido na temperatura de transição na qual ocorre a mudança da estrutura da goma xantana e aumento considerável

da viscosidade (Figura 28). Os valores para a constante de tempo do modelo de Cross ( $\lambda$ ), que está relacionado com os tempos de relaxação do polímero em suspensão e taxa de agregação das partículas devido ao movimento Browniano, diminuiriam estatisticamente com o aumento da temperatura o que esta de acordo com a teoria de estrutura molecular de suspensões poliméricas do modelo de Williams (LAPASIN e PRICL, 1999). O aumento da temperatura incrementa a energia cinética das moléculas e, portanto, o tempo de agregação e sobreposição molecular diminui. Observa-se na Tabela 19, que o valor de “m” do modelo de Cross não foi alterado com o aumento da temperatura o que concorda com os resultados obtidos para suspensões de goma xantana (YASEEN et al., 2005; SPEERS e TUNG, 1986).

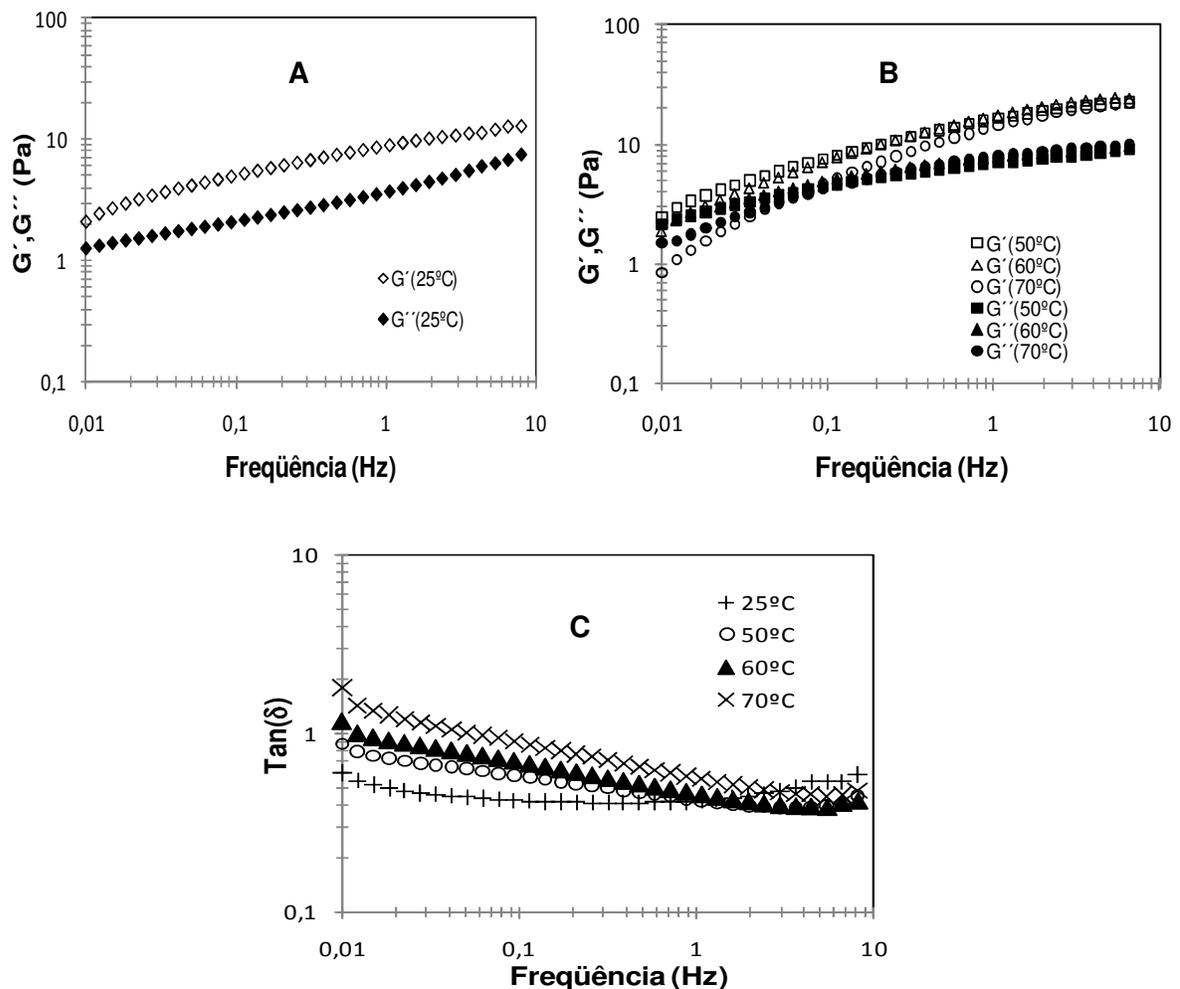
#### 4.3.2 Ensaio reológico dinâmico da xantana comercial

Mostra-se na Figura 29 a varredura de tensão a 25°C para suspensões de goma xantana comercial em uma frequência de 0,1 Hz. Os valores mostram que o máximo valor de tensão oscilatória que pode ser aplicada dentro do intervalo linear seria de  $\tau^0 = 0,8$  Pa. No entanto, a caracterização viscoelástica foi estabelecida para uma tensão máxima de 0,2 Pa.



**Figura 29** Varredura de tensão para determinar a faixa linear para as suspensões de goma xantana (1 % p/p).

Na Figura 30, pode-se observar o comportamento viscoelástico da goma comercial de xantana na solução aquosa 1% (p/p) a 25, 50, 60 e 70°C. Para 25°C e 50°C (conformação ordenada),  $G'$  foi maior que  $G''$  em todo o intervalo de freqüência estudado (Figura 30 A,B), o que é característico do comportamento de polímeros rígidos (gel fraco) em suspensões relativamente concentradas (LAPASIN e PRICL, 1999; MORSE, 1998; PARADOSSI et al., 2002,). De acordo com a Figura 30 C, o ponto de cruce entre  $G'$  e  $G''$  ( $G'=G''$  e  $\text{Tan}(\delta)=1$ ), se deslocou para freqüências mais elevadas a medida que a temperatura aumentou (60 e 70°C). Os valores de ambos módulos diminuíram com o aumento da temperatura, particularmente em baixas freqüências.

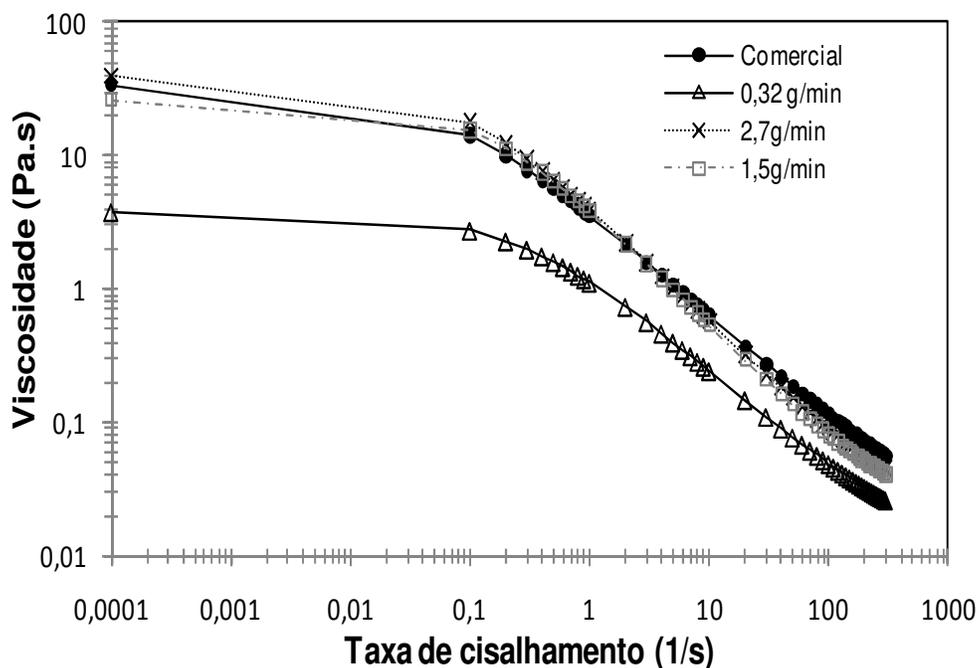


**Figura 30** Características viscoelásticas de xantana comercial: A: Módulo de armazenamento ( $G'$ ) e perda ( $G''$ ) a 25°C, B: Módulos de armazenamento ( $G'$ ) e perda ( $G''$ ) a 50, 60 e 70°C e C: Tangente de perda a 25,50,60 e 70°C.

### 4.3.3 Efeito das condições de secagem na reologia das suspensões de xantana em leito de jorro usando partículas de vidro como inerte

#### 4.3.3.1 Curvas de escoamento

Na Figura 31, apresentam-se os reogramas para a suspensão de xantana reconstituída a 25°C para diferentes vazões de suspensão, temperatura de secagem de 60°C e % de vazão de ar no jorro de 60% ( $60 \text{ m}^3\text{h}^{-1}/6,7\text{ms}^{-1}$ ).



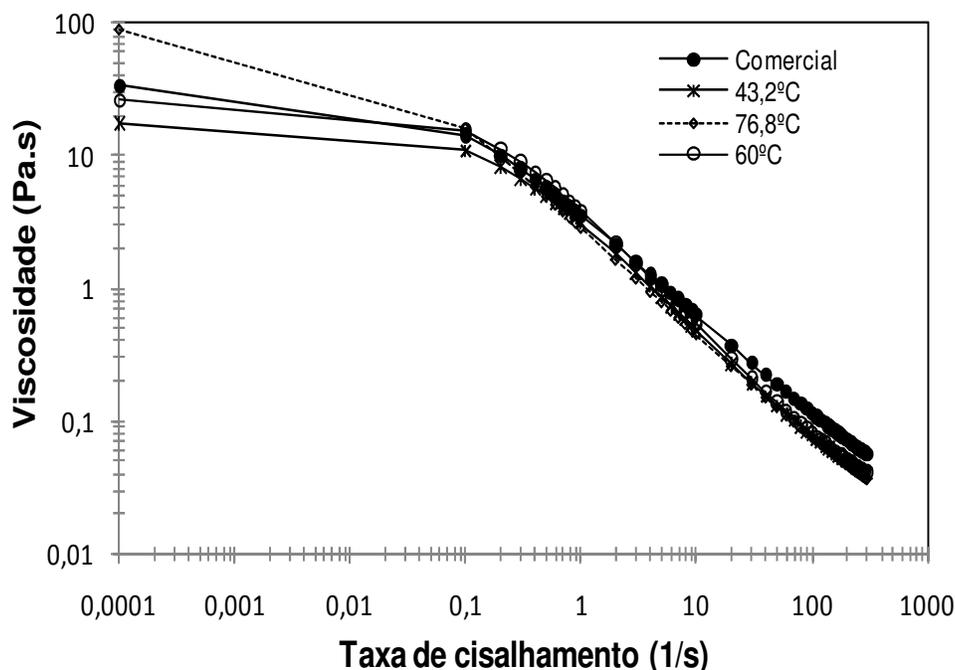
**Figura 31** Reogramas a 25°C para xantana reconstituída em função da vazão de suspensão e condições de secagem com inertes de vidro para  $T= 60^{\circ}\text{C}$  e  $J= 60\%$  ( $60 \text{ m}^3\text{h}^{-1}/6,7 \text{ ms}^{-1}$ ).

Os resultados mostram que as baixas vazões de alimentação diminuíram a viscosidade da suspensão indicando que elevados tempos de secagem ocasionam um severo dano à estrutura da goma xantana. De acordo com Soldi (2005), a viscosidade de sistemas poliméricos diminui com a extensão do tempo de processamento e temperatura, ainda que a xantana é considerada bastante resistente à degradação térmica (MARCOTTE et al., 2001; SWORN, 2000). Assim, a diminuição da viscosidade também pode estar associada ao cisalhamento por

tempo mais longo e desta maneira, uma maior vazão de alimentação é necessária para manter a qualidade reológica.

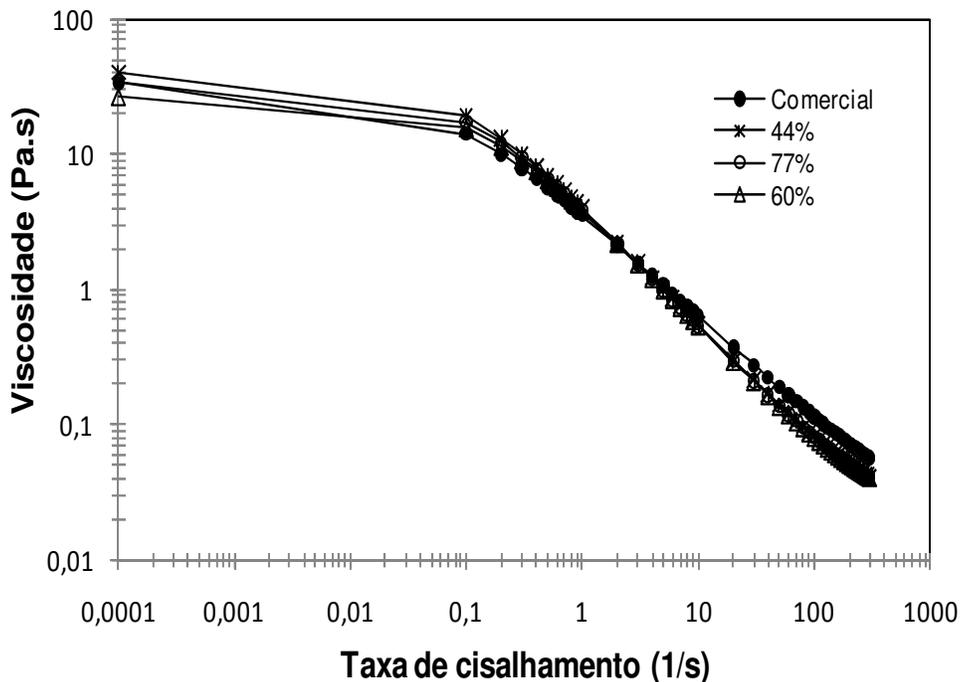
As propriedades reológicas das suspensões de xantana variam com a natureza do polímero, dependendo basicamente da massa molecular média e dos conteúdos de acetato e piruvato (CASAS et al., 2000). O alto conteúdo de acetatos e piruvatos da goma xantana promovem um incremento da viscosidade das suspensões aquosa, devido a que as associações moleculares são favorecidas (TAKO e NAKAMURA, 1984). Assim, os resultados da Figura 28 mostram que o grau de acetatos e piruvatos poderia ter sofrido uma leve diminuição durante o processo de secagem para baixas vazões de alimentação favorecendo a queda de viscosidade.

De acordo com a Figura 32 a temperatura de secagem não parece exercer um efeito significativo na viscosidade para altas vazões de alimentação de suspensão. Por outro lado, as suspensões reconstituídas se mostraram estáveis dentro da faixa de temperatura de secagem estudada (43°C-77°C), fornecendo propriedades espessantes e de estabilização similares ao produto comercial.



**Figura 32** Reogramas a 25°C para a xantana reconstituída em função da temperatura e condições de secagem usando partículas inertes de vidro para  $V = 1,5 \text{ g/min}$  e  $J = 60\%$  ( $60 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}/6,7 \text{ ms}^{-1}$ ).

Na Figura 33, apresenta-se o efeito da vazão de ar que passa pelo jorro mantendo a temperatura de secagem a 60°C e a vazão de alimentação da suspensão fixa a 1,5 g/min. Da mesma maneira como ocorreu com a temperatura (Figura 32), as vazões de ar no jorro e aeração no ânulo não exerceram um efeito claro na viscosidade da suspensão.



**Figura 33** Reogramas a 25°C para a goma xantana reconstituída seca com partículas inertes de vidro em função da vazão no jorro para  $V = 1,5$  g/min e  $T = 60^\circ\text{C}$ .

Apresenta-se na Tabela 22, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) do ajuste para os diferentes modelos reológicos e o valor quadrático médio do erro (RMS) para nas diferentes condições de secagem de goma xantana usando vidro como partícula inerte de acordo com o planejamento experimental. Os resultados mostraram que o ajuste utilizando o modelo de Cross apresentou o maior valor de  $R^2$  e menor valor do RMS para as distintas suspensões obtidas.

**Tabela 22** Parâmetros de comparação dos modelos de ajuste na secagem de xantana com partículas inertes de vidro

Ensaio	MODELO DE AJUSTE					
	Lei da Potência		Herschel	Buckley	Modelo de Cross	
	R <sup>2</sup>	RMS	R <sup>2</sup>	RMS	R <sup>2</sup>	RMS
1	0,95	1,158	0,94	1,158	0,99	0,456
2	0,96	1,617	0,96	1,615	0,99	0,326
3	0,94	1,263	0,95	1,264	0,99	0,257
4	0,95	1,652	0,95	1,752	0,99	0,325
5	0,94	1,235	0,94	1,236	0,99	0,489
6	0,96	1,123	0,96	1,125	0,99	0,258
7	0,96	1,489	0,96	1,489	0,99	0,253
8	0,96	1,586	0,96	1,489	0,99	0,397
9	0,95	1,623	0,95	1,624	0,99	0,391
10	0,95	1,542	0,95	1,544	0,99	0,268
11	0,95	1,243	0,95	1,321	0,99	0,276
12	0,96	1,785	0,95	1,788	0,99	0,458
13	0,95	1,456	0,95	1,510	0,99	0,521
14	0,95	1,485	0,95	1,486	0,99	0,523
15	0,94	1,235	0,94	1,485	0,99	0,461
16	0,94	1,623	0,95	1,630	0,99	0,468

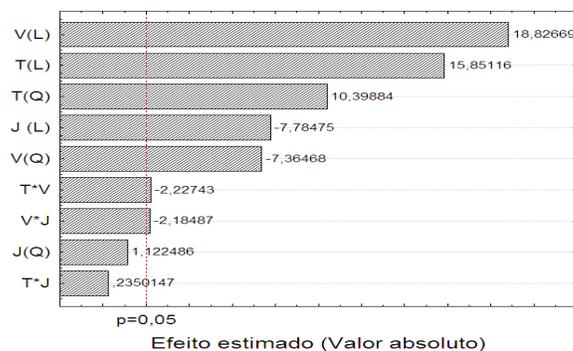
Os diferentes parâmetros de ajuste para o modelo de Cross de acordo com as condições de secagem são mostrados na Tabela 23. Observa-se, que a viscosidade a taxa de cisalhamento zero ( $\eta_0$ ) foi muito mais elevada do que a segunda viscosidade do platô ( $\eta_\infty$ ), o que é uma característica fundamental para sistemas de polissacarídeos em suspensão concentrada. Os valores de “m” indicaram um comportamento pseudoplástico ( $m < 1$ ) e mostraram uma ampla distribuição dos valores de  $\eta_0$ . Em sistemas biopoliméricos de concentração elevada, a taxa de cisalhamento necessária para atingir o valor de ( $\eta_0$ ) pode ser muito difícil de se observar na prática e muitas vezes é um parâmetro estimado obtido pela extrapolação de um ajuste de dados, o que foi nosso caso. Este fato, juntamente com uma modificação estrutural durante a secagem, pode ser considerado como uma explicação razoável para o amplo espectro dos valores obtidos para  $\eta_0$ . Por outro lado, os resultados da Tabela 23 indicaram que o menor efeito estabilizante (baixo  $\eta_0$ ) correspondeu ao obtido na condição de melhor performance do secador, em que a produção de pó foi mais alta e a retenção de

sólidos foi menor, porém com maior tempo de residência do material no secador (menor vazão de suspensão).

**Tabela 23** Coeficientes do modelo de Cross de acordo com planejamento experimental na secagem de xantana usando partículas inertes de vidro

Ensaio	Parâmetros do modelo de Cross				R <sup>2</sup>
	$\eta_0$ (Pa.s)	$\eta_\infty$ (Pa.s)	$\lambda$ (s)	m	
1	17,99	0,016	6,52	0,87	0,99
2	11,74	0,014	4,96	0,87	0,99
3	45,31	0,015	11,91	0,93	0,99
4	28,16	0,018	7,82	0,92	0,99
5	20,96	0,018	7,41	0,87	0,99
6	10,49	0,011	4,59	0,86	0,99
7	37,26	0,019	9,52	0,92	0,99
8	25,63	0,018	7,39	0,91	0,99
9	17,41	0,017	5,62	0,89	0,99
10	90,67	0,010	64,57	0,82	0,99
11	3,80	0,010	2,99	0,8	0,99
12	39,85	0,017	12,54	0,88	0,99
13	40,38	0,017	11,27	0,91	0,99
14	34,05	0,017	9,54	0,91	0,99
15	26,27	0,018	6,81	0,92	0,99
16	27,36	0,019	7,12	0,92	0,99

O diagrama de Pareto apresentado na Figura 34 apresenta os efeitos das variáveis de secagem sobre a viscosidade à taxa de cisalhamento zero ( $\eta_0$ ). Observa-se que a vazão de suspensão (V) junto com a temperatura de secagem (T) foram as variáveis que mais exerceram efeito no valor de  $\eta_0$ .



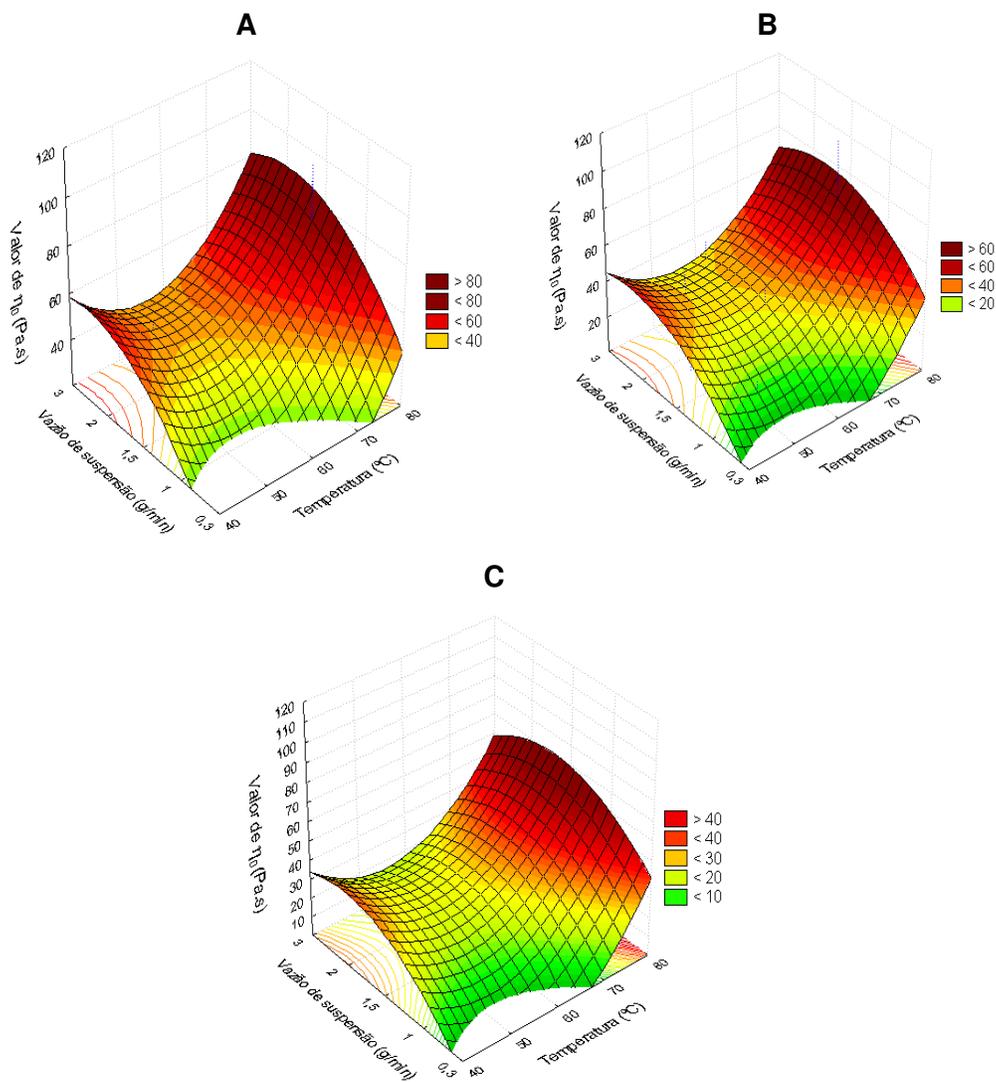
**Figura 34** Diagrama de Pareto para a viscosidade à taxa de cisalhamento zero ( $\eta_0$ ) de xantana usando partículas inertes de vidro.

Na Tabela 24, apresenta-se a avaliação através de análise de variância (ANOVA) e os coeficientes do modelo de regressão para a viscosidade a taxa de cisalhamento zero. Os resultados indicam que a regressão foi estatisticamente significativa ( $F_{cal} > F_{tab}$ ). A qualidade obtida para o ajuste foi de 61,85% o que indica um ajuste razoável entre os valores experimentais e previstos pelo modelo. A falta de ajuste foi estatisticamente não significativa ( $F_{FA} < F_{tab}$ ) indicando que o modelo pode ser usado para a predição dos valores experimentais.

**Tabela 24** Coeficientes de regressão do modelo matemático codificado para prever o valor de  $\eta_o$  para xantana seca usando partículas inertes de vidro

Variável	Valor
$F_{cal}/F_{tab}$	22,21
$F_{FA}/F_{tab}$	0,83
$R^2$	61,85
Média	27,473
Temperatura T	8,372
Temperatura T <sup>2</sup>	6,666
Vazão de pasta V	9,944
Vazão de pasta V <sup>2</sup>	-4,723
% Ar no jorro J	-4,111
T*V	-1,537
V*J	-1,507

A Figura 35 mostra a viscosidade à taxa de cisalhamento zero em função da temperatura de secagem e vazão de alimentação da suspensão. Os resultados indicaram que o valor de  $\eta_o$  aumentou para altas temperaturas de secagem e altas vazões de alimentação. Assim as características de estabilização foram favorecidas sob estas condições de operação do secador. Baixas vazões de suspensão em conjunto com a secagem a baixas temperaturas produzem suspensões de baixa qualidade de estabilização, devido ao elevado tempo de residência no secador. Por outro lado, as características estabilizantes de suspensões de goma xantana foram favorecidas com o aumento da aeração no ânulo e baixa retenção de sólidos.

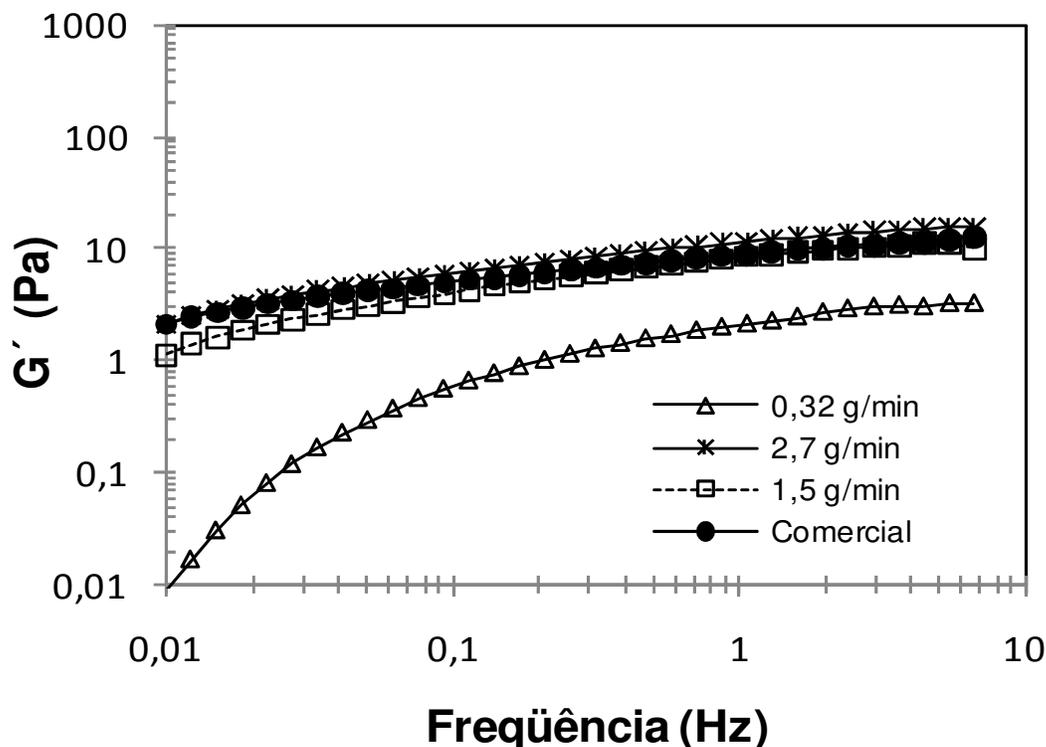


**Figura 35** Viscosidade à taxa de cisalhamento zero ( $\eta_0$ ) em função da temperatura e vazão de suspensão para diferentes porcentagens de ar no jorro na secagem de goma xantana com partículas de vidro: A (43%), B (60%) e C (77 %).

#### 4.3.3.2 Ensaio reológico dinâmico

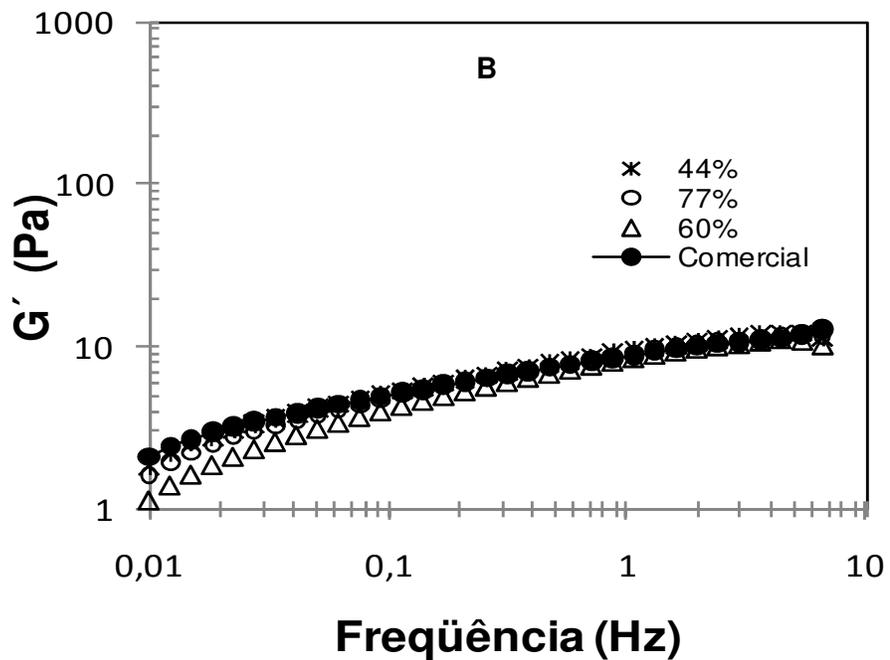
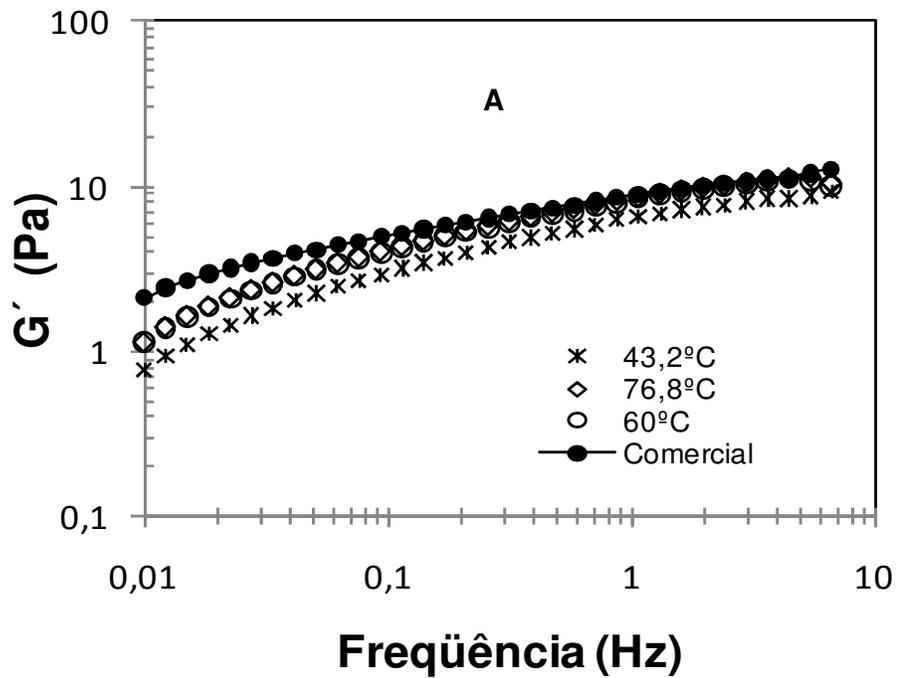
As propriedades viscoelásticas são um fator importante para avaliar o uso da goma xantana como agente espessante. Portanto, foi determinado o espectro mecânico das diversas amostras secas para diferentes condições do planejamento experimental à temperatura de 25°C.

De acordo com a Figura 36, a vazão de alimentação da suspensão aparece novamente como um fator importante para preservar a qualidade reológica da suspensão. Os resultados indicaram que a utilização de vazões de suspensão maiores que 2 g/min não alterou a estrutura elástica da xantana, mantendo-a com características similares à goma comercial. Entretanto para uma vazão de pasta baixa (0,32 g/min), houve um decréscimo considerável do módulo elástico,  $G'$ .



**Figura 36** Módulo elástico ou de armazenamento para xantana seca usando partículas inertes de vidro em função da vazão de suspensão:  $T= 60^{\circ}\text{C}$  e  $J=60\%$  ( $60 \text{ m}^3\text{h}^{-1}/6,7 \text{ ms}^{-1}$ ).

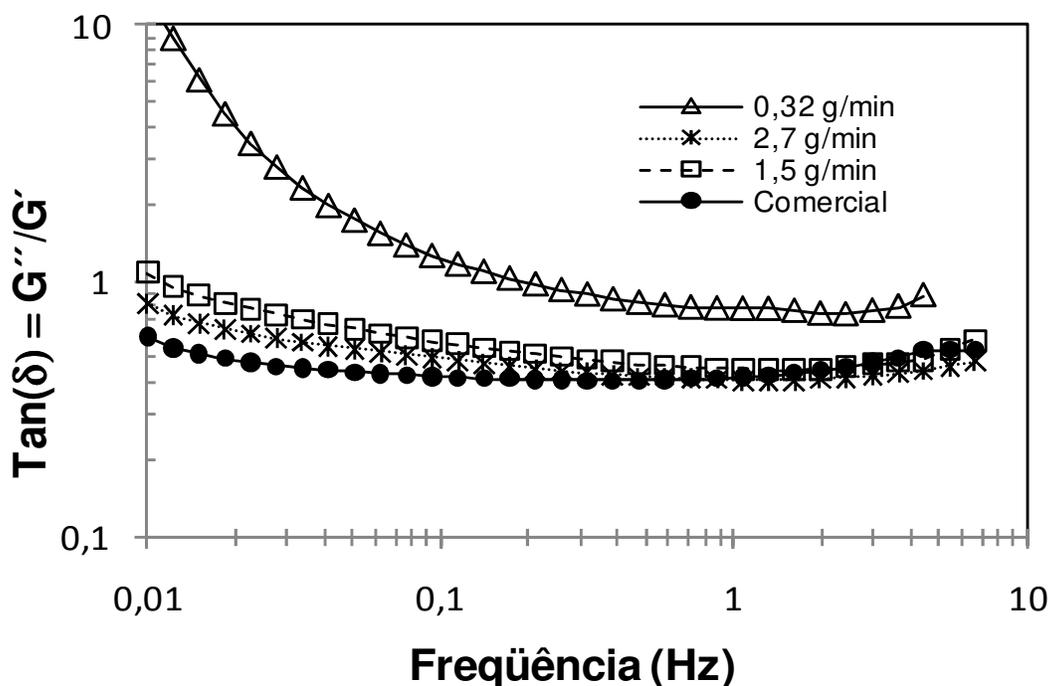
Os resultados das Figuras 37 A e B, indicaram também que os aumentos da temperatura de secagem e da aeração no ânulo contribuíram para manter as características viscoelásticas da xantana. As gomas comerciais de xantana são obtidas geralmente usando secadores por aspensão com a utilização de altas temperaturas, altas vazões de alimentação e condições de taxa de cisalhamento elevadas. Conseqüentemente, características similares as gomas comerciais podem ser obtidas usando um secador de jorro fluidizado.



**Figura 37** Módulo elástico ou de armazenamento para xantana seca usando partículas inertes de vidro ( $G'$ ): A:  $V=1,5 \text{ g/min}$  e  $J=60\%$  ( $60 \text{ m}^3\text{h}^{-1}/6,7 \text{ ms}^{-1}$ ) a diferentes temperaturas de secagem e B:  $T=60^\circ\text{C}$  e  $V=1,5 \text{ g/min}$  a diferentes % de vazão de ar no jorro.

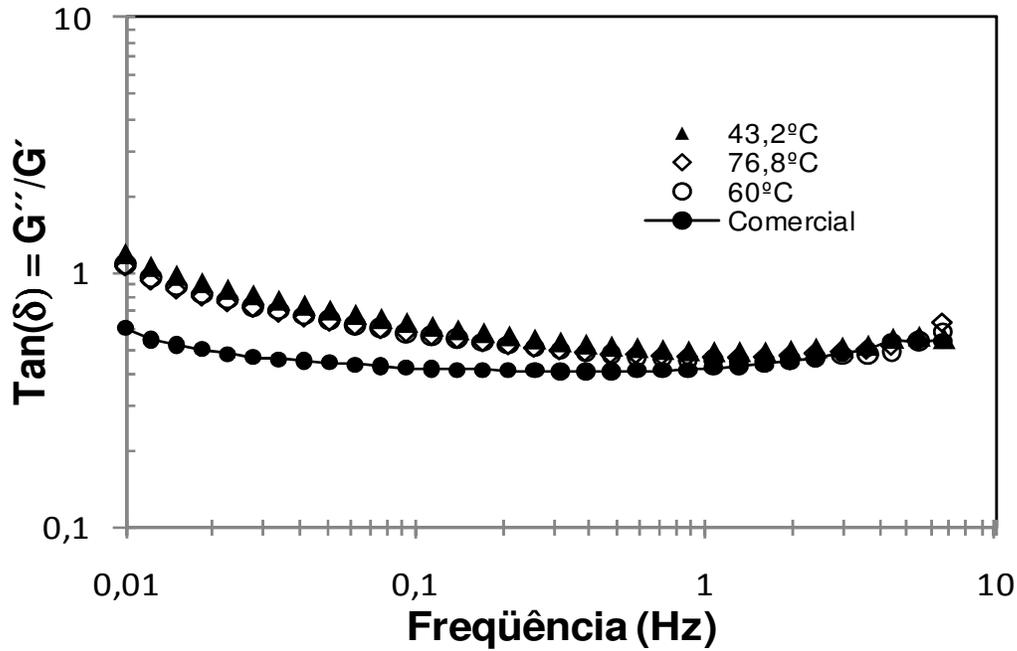
Os valores da tangente de perda,  $\text{Tan}(\delta)=G''/G'$ , o qual é uma medida da contribuição relativa do componente viscoso nas propriedades elásticas do material, são apresentados nas Figuras 38, 39 e 40.

Uma suspensão de comportamento semi-diluído ( $G'' > G'$ ) com forte dependência da frequência foi observado para o produto obtido para baixa vazão de alimentação (Figura 38) em comparação a goma comercial que mostrou valores de  $G'$  prevalecendo sobre  $G''$  com uma ligeira dependência da frequência. Além disso, o caráter elástico das suspensões de xantana aumentou a medida que a vazão de alimentação aumentou.

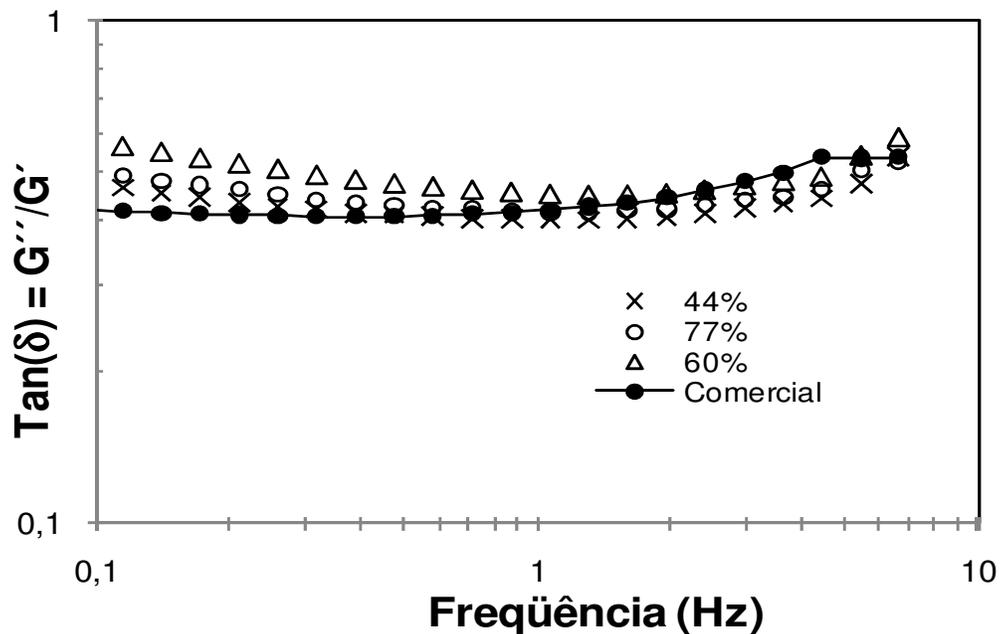


**Figura 38** Tangente de perda ( $G''/G'$ ) para diferentes vazões de suspensão nas condições de secagem de  $T= 60^{\circ}\text{C}$  e  $J=60\%$  ( $60 \text{ m}^3\text{h}^{-1}/6,7 \text{ ms}^{-1}$ ) para xantana seca usando partículas inertes de vidro.

Na Figura 39, mostra-se que a temperatura de secagem não exerceu efeito considerável de mudança na estrutura da goma. As suspensões de goma xantana reconstituídas formaram uma estrutura de gel fraco com rede ligeiramente menos elástica do que a goma comercial. Por outro lado, o aumento da aeração do ânulo contribuiu de maneira geral na manutenção da estrutura elástica (Figura 40).



**Figura 39** Tangente de perda ( $G''/G'$ ) para xantana seca usando partículas inertes de vidro a diferentes temperaturas de secagem com  $V=1,5\text{g/min}$  e  $J=60\%$  ( $60\text{ m}^3\text{h}^{-1}/6,7\text{ ms}^{-1}$ ).



**Figura 40** Tangente de perda ( $G''/G'$ ) para xantana seca usando partículas inertes de vidro para diferentes % de vazão de ar no jorro e condições de secagem de  $V=1,5\text{g/min}$  e  $T=60^\circ\text{C}$ .

#### 4.3.3.3 Viscosidade aparente no leito

Com a finalidade de avaliar as variáveis que influenciam na aglomeração das partículas de inertes no leito, foi avaliada a viscosidade aparente da suspensão nas diversas condições operacionais dentro do secador. A viscosidade aparente no leito foi determinada utilizando o modelo de Cross (Equação 10). Os valores dos parâmetros do modelo de Cross para as diversas condições de secagem foram obtidos a partir da Tabela 23. A taxa de cisalhamento no ânulo  $\dot{\gamma}_A$  foi determinada considerando que o valor da variação de velocidade correspondia à velocidade média da partícula no ânulo para cada condição de secagem ( $V_{pA}$ ) dividido pela distância de separação ( $\Delta Y_{pA}$ ) entre as partículas (CUNHA et al., 2000).

$$\dot{\gamma}_A = \frac{\partial V}{\partial Y} \cong \frac{V_{pA}}{\Delta Y_{pA}} \quad [15]$$

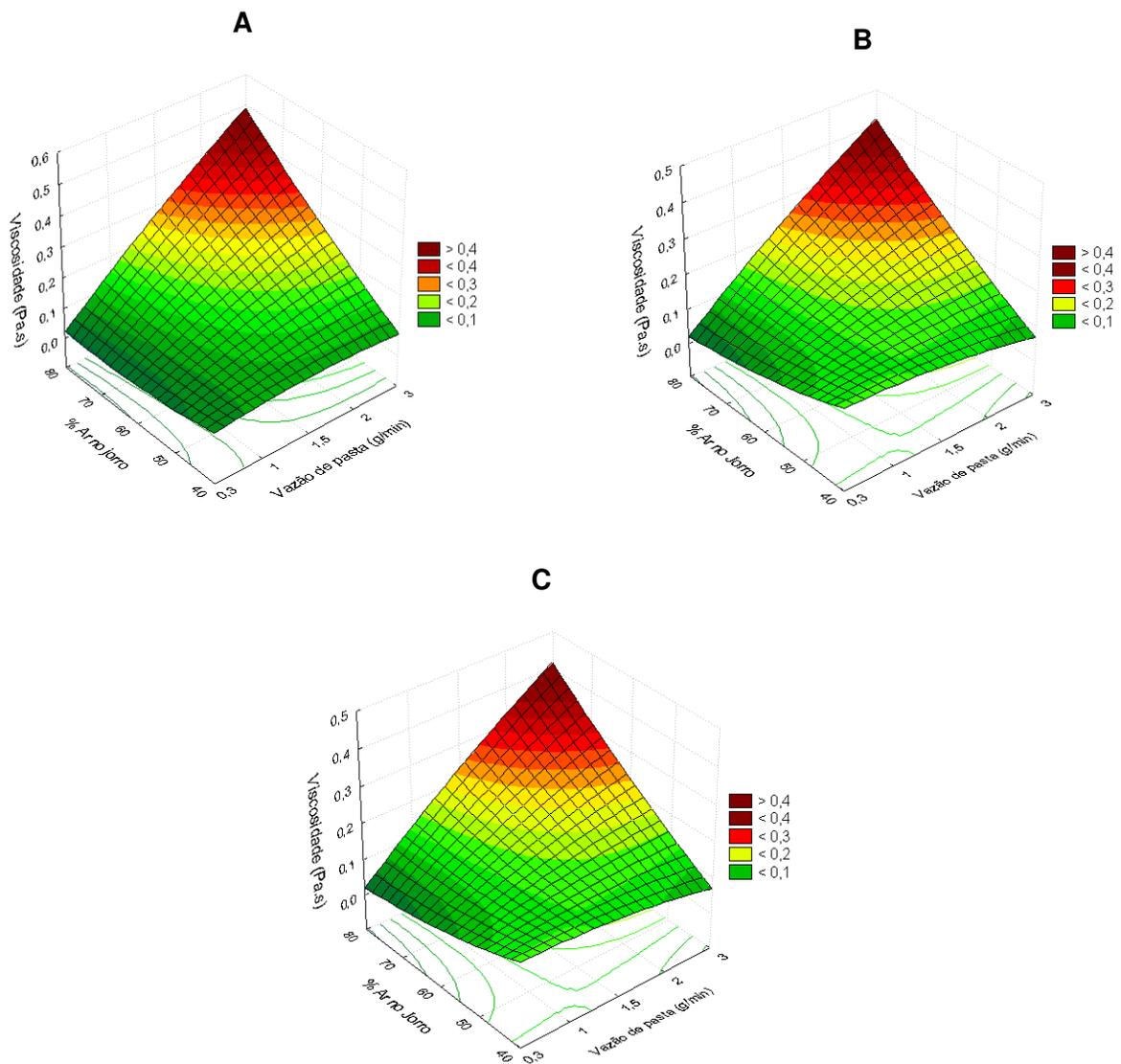
Inicialmente, tentou-se determinar a distância de separação entre as partículas através de fotografias. Os resultados mostraram que não era possível obter um valor representativo da distância de separação para as condições de secagem devida a falta de aproximação focal. A máxima distância de aproximação de foco ao acrílico da parede do secador foi de 5 mm que somado à espessura do acrílico (1cm) e do material aderido na parede do leito não permitiu uma visualização muito precisa, sendo necessária ampliação da imagem. Assim, tomou-se um valor de 0,43 mm para  $\Delta Y_{pA}$  que está dentro dos valores medidos.

Na Tabela 25, apresenta-se a avaliação através de análise de variância (ANOVA) e os coeficientes do modelo de regressão para a viscosidade aparente no leito. Os resultados indicam que a regressão foi estatisticamente significativa ( $F_{cal} > F_{tab}$ ) com um ajuste foi de 91,85%. A falta de ajuste foi estatisticamente significativa ( $F_{FA} > F_{tab}$ ) indicando que o modelo é preditivo.

**Tabela 25** Coeficientes de regressão do modelo matemático codificado para prever o valor da viscosidade aparente no leito para xantana seca usando partículas inertes de vidro

Variável	Valor
$F_{cal}/F_{tab}$	36,33
$F_{FA}/F_{tab}$	0,833
$R^2$	0,9182
Média	0,1568
Temperatura T	0,0082
Temperatura T <sup>2</sup>	-0,003
Vazão de pasta V	0,0415
Vazão de pasta V <sup>2</sup>	-0,0032
% Ar no jorro J	0,0292
% Ar no jorro J <sup>2</sup>	0,0049
T*V	0,011
T*J	0,0103
V*J	0,0287

Na Figura 41, apresenta-se a viscosidade da suspensão nas condições de secagem. A taxa de cisalhamento calculada variou na faixa de 18-82 s<sup>-1</sup>. Uma alta viscosidade correspondeu a vazões de suspensão acima de 1,5 g/min em conjunto com baixas vazões na aeração do ânulo. Segundo os resultados obtidos, esta condição está associada com baixa produção de pó, alta retenção de sólidos e teor de umidade, além da baixa velocidade da partícula no ânulo. Entretanto um teor de umidade mais elevado no leito juntamente com uma camada de maior espessura depositada nas partículas permitiu um menor dano na despolimerização da xantana e uma melhor qualidade reológica.



**Figura 41** Viscosidade aparente de xantana no leito em função da vazão de suspensão e porcentagem de vazão de ar que passa pelo jorro: A (43 °C), B (60 °C) e C (77 °C).

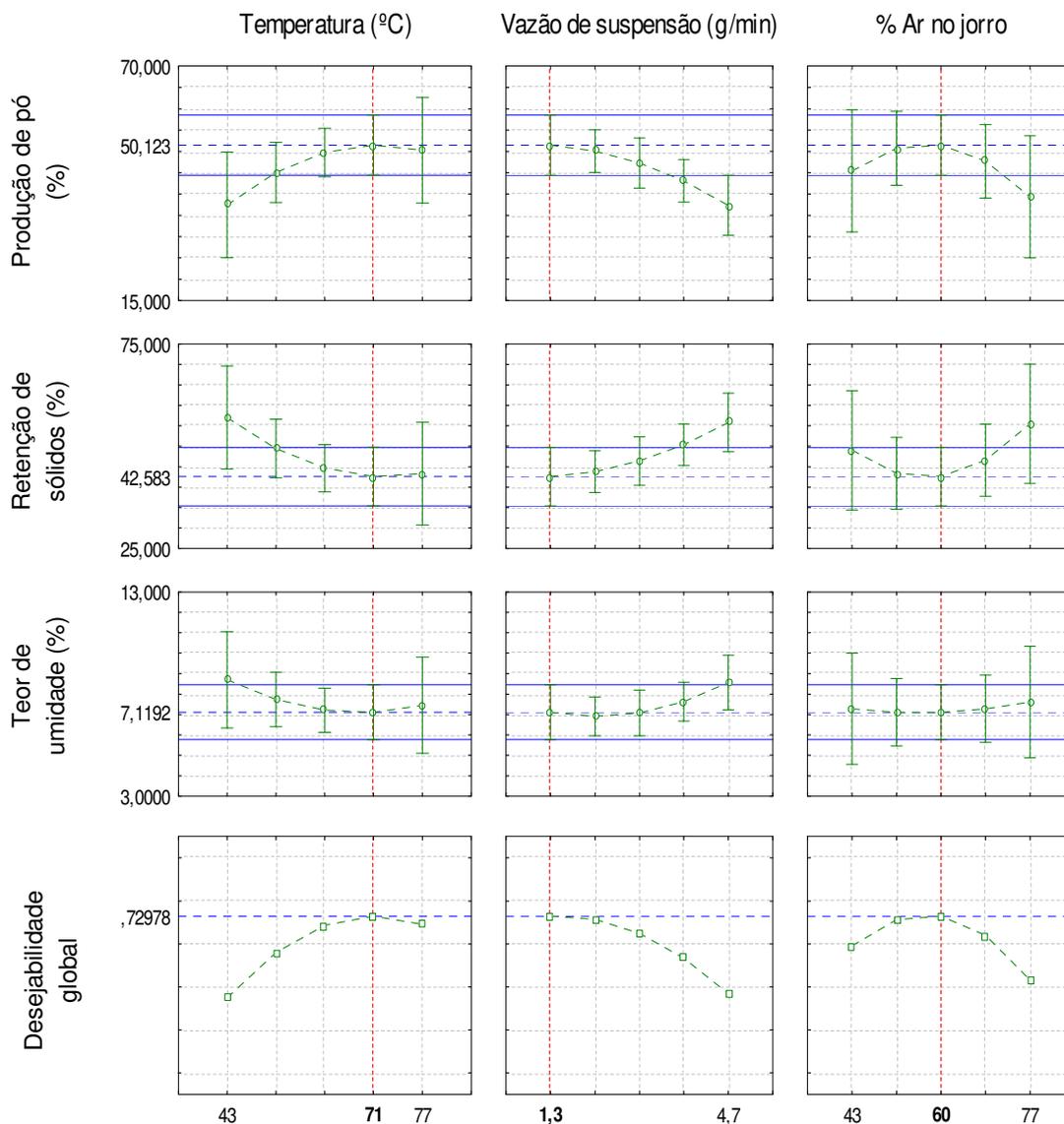
#### **4.4 Otimização do sistema de secagem para suspensões de goma xantana usando vidro e ABS e efeitos na qualidade do produto**

Industrialmente os secadores devem ser operados sob condições que permitam obter a máxima produção de material com um mínimo impacto na qualidade final do produto. Assim, para determinar as condições de secagem que maximizem tanto o desempenho como a qualidade do produto final, foram utilizadas técnicas de otimização considerando os dados obtidos do planejamento experimental.

##### **4.4.1 Efeito no desempenho do secador**

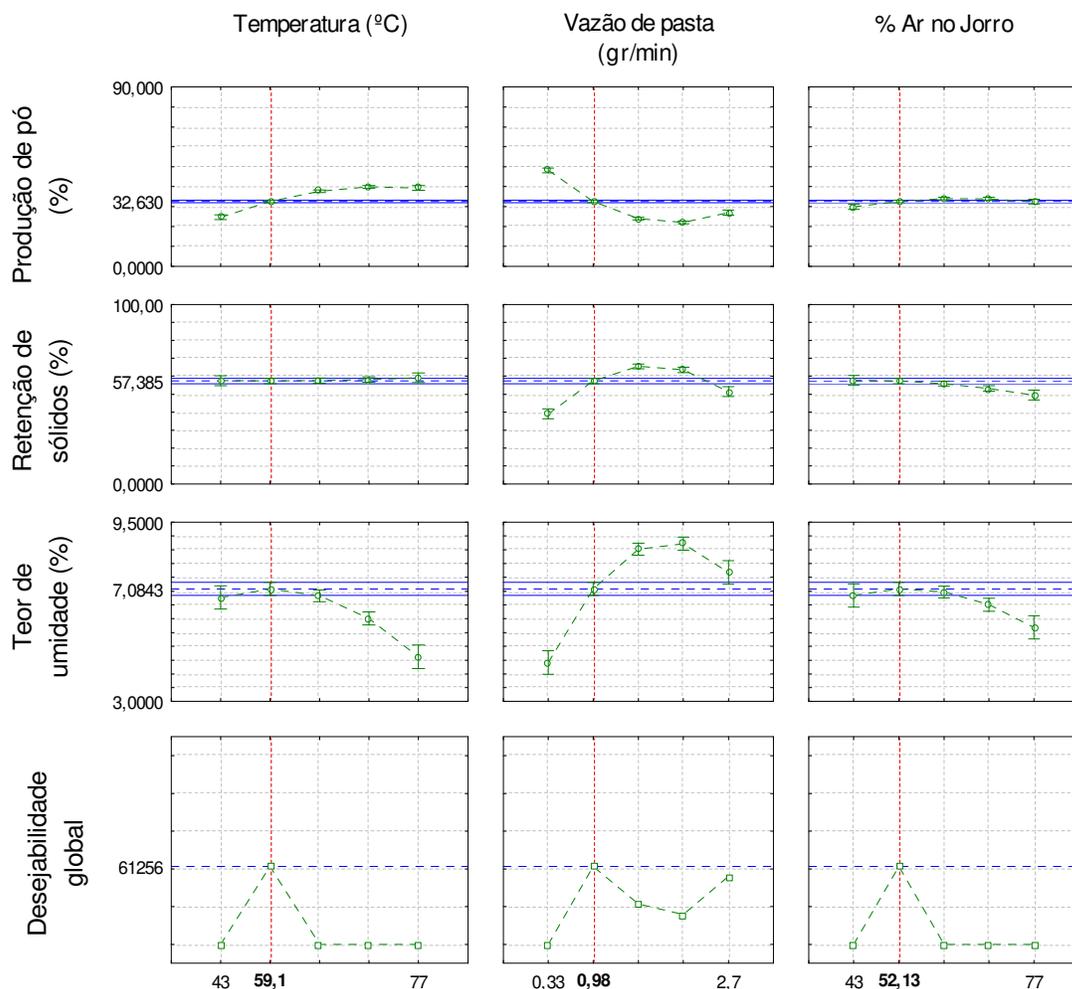
Para avaliar as respostas simultaneamente e encontrar as condições ótimas de operação das variáveis independentes (temperatura de secagem, vazão de pasta e porcentagem de ar que passa pelo jorro) foi aplicada a técnica estatística denominada desejabilidade. As indicações dos valores relacionados às respostas são dadas pelo índice de desejabilidade (d). Quanto mais próximo de 1, a resposta é altamente desejada e quando este valor se aproxima a zero é totalmente indesejada. Assim, a otimização foi feita maximizando a produção de pó, minimizando a retenção de sólidos no leito e mantendo fixo o teor de umidade em 7%.

Os resultados da análise de desejabilidade são mostrados na Figura 42 para o leito operado com partículas de ABS e Figura 43 para o leito preenchido com as partículas de vidro. Nota-se, uma boa desejabilidade global, quando nas condições apresentadas se alcança o valor máximo de 73% das respostas desejadas para o planejamento experimental com ABS e 61% para o vidro.



**Figura 42** Análise de desejabilidade para a secagem de xantana com leito de partículas de ABS.

Observa-se da Figura 42 que a condição ótima do secador é alcançada para uma temperatura de secagem de 71°C, vazão de pasta de 1,3 g/min e porcentagem de vazão de ar no jorro de 60%, obtendo-se uma produção de pó de 50%, uma retenção de sólidos no leito de 43% e um teor final de umidade de 7,1%. Para uma porcentagem de vazão de ar no jorro de 60% ( $60 \text{ m}^3\text{h}^{-1}/6,7 \text{ ms}^{-1}$ ) é estabelecida uma aeração no ânulo de 40% ( $40 \text{ m}^3\text{h}^{-1}/1 \text{ ms}^{-1}$ ).



**Figura 43** Análise de desejabilidade para a secagem de xantana com leito de partículas de vidro.

Na Figura 43, mostram-se as condições ótimas de operação do secador com o leito de partículas de vidro. Observa-se que a maior eficiência de produção de pó foi de 33 %, uma retenção de sólidos no leito de 57 % e um teor final de umidade de 7,1%, resultados obtidos operando o secador com uma temperatura de secagem de 59 °C, vazão de pasta de 1 g/min e porcentagem de vazão de ar no jorro de 52%. Para uma porcentagem de vazão de ar no jorro de 52% ( $52 \text{ m}^3\text{h}^{-1}/5,8 \text{ ms}^{-1}$ ) é estabelecida uma aeração no ânulo de 48 % ( $48 \text{ m}^3\text{h}^{-1}/1,4 \text{ ms}^{-1}$ ).

Na Tabela 26 são apresentados os valores experimentais obtidos nas condições de operação ótimas de secagem (Figuras 42 e 43) e as diferenças com relação aos valores teóricos preditos pelo modelo otimizado. Os resultados mostraram que tanto para o leite com partículas de vidro e ABS o modelo subestimou as variáveis produção de pó e teor de umidade e sobreestimou a variável retenção de sólidos.

**Tabela 26** Desempenho do secador com leite de ABS e vidro no ponto de otimização

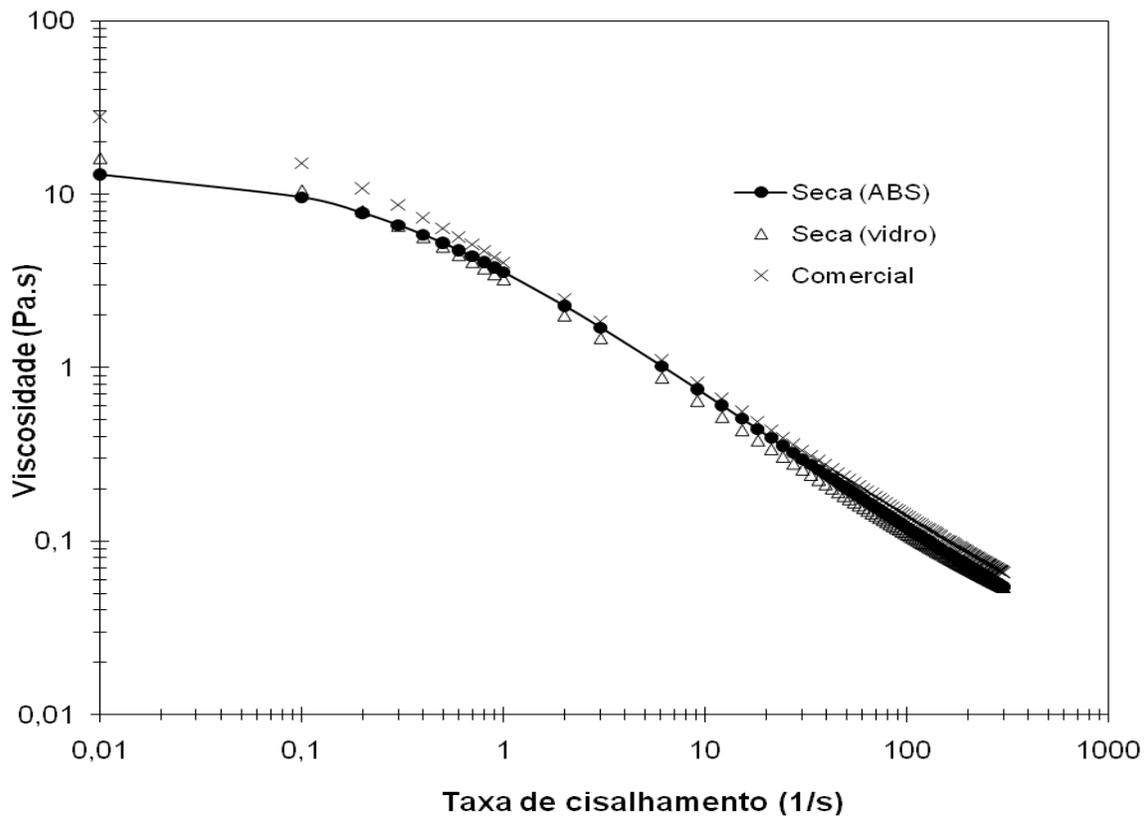
Partícula	Variáveis de resposta	Valor experimental (%)	Diferença (%)
ABS	Produção de pó	58,23	14,13
	Retenção de sólidos	35,25	-22
	Teor de umidade	8,73	18,55
Vidro	Produção de pó	36,89	11,55
	Retenção de sólidos	50,23	-14,24
	Teor de umidade	9,11	22,28

Observa-se que o leite operado com partículas de ABS apresenta melhor desempenho que o leite operado com partículas de vidro. O leite com ABS apresenta um acréscimo de 57% na produção de pó e um decréscimo de 30% na retenção de sólidos comparado com o leite operado com vidro. Por outro lado, a porcentagem de produto seco de xantana não coletada pelo ciclone e colada nas paredes do secador é 9% para ABS e 13% para o vidro.

#### 4.4.2 Efeito nas propriedades reológicas

Na Figura 44, apresentam-se os reogramas de viscosidade a 25°C para a suspensão de xantana comercial e reconstituída de acordo com as condições de secagem otimizadas. Os resultados mostraram uma alta pseudoplasticidade característica das suspensões de goma xantana em meio aquoso. Por outro lado não existem diferenças significativas que façam prever mudanças na estrutura da

goma obtida pelo processo de secagem em seu ponto de otimização. Existem ligeiras diferenças nas viscosidades para taxas acima de  $10 \text{ s}^{-1}$  que não superam 10%. Assim, a qualidade reológica da goma foi preservada durante o processo de secagem.



**Figura 44** Reograma para xantana obtida nas condições de secagem otimizadas para o leito usando partículas inertes de vidro e ABS.

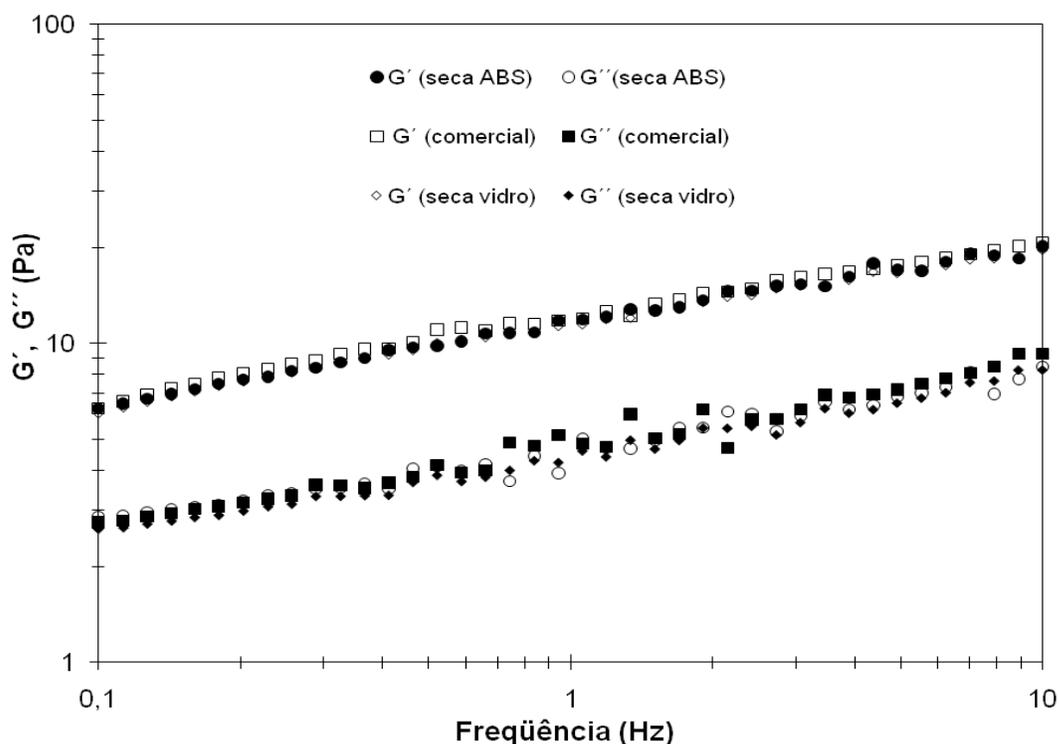
Na Tabela 27 são apresentados os parâmetros do modelo de Cross para suspensões de goma xantana comercial e reconstituída para a secagem feita com os leitos de ABS e vidro. Os resultados indicam que a goma comercial teve o melhor efeito estabilizante (maior valor de  $\eta_0$ ), embora, este valor seja obtido por extrapolação e altamente dependente da sensibilidade do equipamento para medir em baixas taxas de cisalhamento.

**Tabela 27** Parâmetros do modelo de Cross para suspensões de xantana seca usando partículas inertes de ABS e vidro

Suspensão	Parâmetros do Modelo de Cross				Valor R <sup>2</sup>
	$\eta_0$ (Pa.s)	$\eta_\infty$ (Pa.s)	$\lambda$ (s)	$m$	
Comercial	33,62	0,0111	13,105	0,776	0,99
Seca (ABS)	13,84	0,00937	3,6944	0,816	0,99
Seca (vidro)	17,99	0,016	6,517	0,812	0,99

Uma melhor avaliação dos efeitos das condições de secagem otimizadas na estrutura da goma xantana pode ser obtida através da análise dos espectros mecânicos.

Na Figura 45, pode-se observar o comportamento viscoelástico da goma xantana na solução aquosa a 25°C e 1% (p/p) para a amostra comercial e reconstituída. Obteve-se um valor de  $G'$  maior que  $G''$  em todo o intervalo de frequência estudado, não sendo observadas diferenças entre as amostras avaliadas. Consequentemente, nas condições operacionais otimizadas a qualidade reológica foi preservada mantendo as características do produto original, situação que concorda com os resultados obtidos nas curvas de escoamento (Figura 44).



**Figura 45** Varredura de freqüência para as suspensões de xantana obtidas pelo método de secagem com partículas inertes de ABS e vidro no ponto ótimo.

Os resultados obtidos nas Figuras 31 a 33 juntamente com os resultados reológicos no ponto ótimo para a secagem de suspensões de goma xantana (Figuras 44 e 45), mostram que a vazão da suspensão é uma condição fundamental para conservar a qualidade do produto. Portanto, baixas vazões de suspensão menores de 1g/min com elevados tempos de processamento foram condições que alteram e ocasionam severos danos à rede estrutural da goma xantana.

## **4.5 Secagem de suspensões de $\lambda$ -carragena usando ABS como inerte**

Produto reconstituído de  $\lambda$ -carragena, foi obtido pela secagem de suspensões em um leito de jorro fluidizado com partículas termoplásticas de ABS para diferentes condições de temperatura de secagem (43-77°C), vazão de pasta (1,3-4,7 g/min) e porcentagens de vazão de ar no jorro (43-77%) que corresponderam a vazões de ar de 43 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup>/4,8 ms<sup>-1</sup>-77 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup>/8,6 ms<sup>-1</sup>. Devido à alta aderência superficial na interface vidro/carragena não foi possível usar partículas de vidro para remover a camada de suspensão seca (Tabela 7) e, portanto, não foi realizado planejamento experimental para secagem da carragena em leito de partículas inertes de vidro.

### **4.5.1 Desempenho do secador em leito com partículas inertes de ABS**

Os resultados de produção de pó, retenção de sólidos no leito de inertes e teor final de umidade do pó são mostrados na Tabela 28. De forma geral houve uma baixa produção e uma alta retenção de sólidos dentro do leito devido à alta aderência entre a suspensão e o inerte. Os resultados indicaram que usando partículas termoplásticas de ABS como material inerte a melhor condição de secagem foi obtida com a menor vazão de pasta (1,3 g/min) com uma produção de pó de 48 % e uma retenção de material de 47%. Novamente a menor vazão de pasta levou à máxima produção de pó devido aos maiores tempos de processamento.

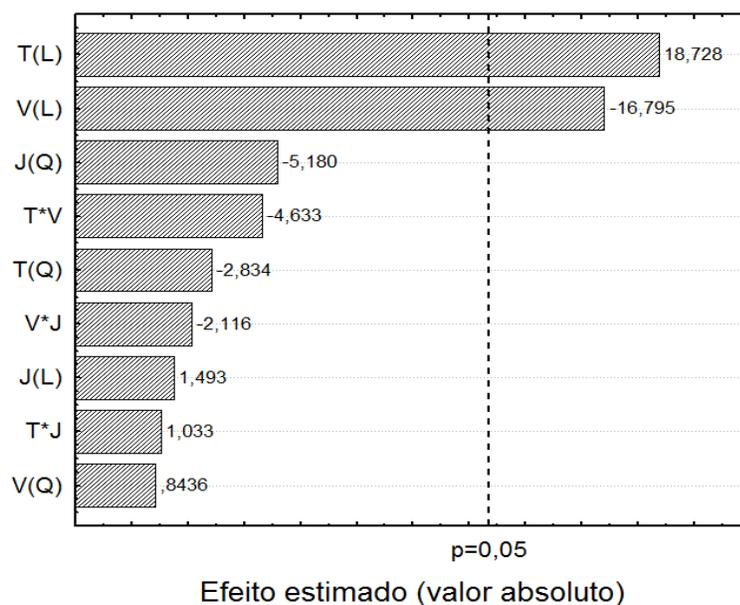
**Tabela 28** Produção de pó, retenção de sólidos e teor de umidade para as diferentes condições de secagem de suspensões de  $\lambda$ -carragena usando ABS como material inerte

Ensaio	Temperatura de secagem (°C)	Vazão de pasta (g/min)	Ar no jorro (%)	Produção de pó (%)	Retenção de sólidos (%)	Teor final de umidade (%)
	T	V	J			
1	-1 (50)	-1 (2)	-1 (50)	14,1±2,3	78,8±1,9	9,78±1,3
2	-1 (50)	-1 (2)	1 (70)	18,8±4,2	74,6±3,6	9,66±1,2
3	-1 (50)	1 (4)	-1 (50)	10,4±1,9	80,6±2,1	11,91±1,4
4	-1 (50)	1 (4)	1 (70)	11,6±1,6	81,4±1,6	11,91±1,4
5	1 (70)	-1 (2)	-1 (50)	35,4±2,1	59,7±2,0	7,66±1,3
6	1 (70)	-1 (2)	1 (70)	44,5±2,6	51,5±3,1	7,96±1,4
7	1 (70)	1 (4)	-1 (50)	22,2±1,7	70,2±2,2	10,31±1,5
8	1 (70)	1 (4)	1 (70)	24,7±1,7	70,6±2,1	10,31±1,6
9	-1,68 (43,2)	0 (3)	0 (60)	10,6±2,8	82,7±2,7	11,08±1,6
10	1,68 (76,82)	0 (3)	0 (60)	38,8±3,1	55,6±2,4	6,77±1,4
11	0 (60)	-1,68 (1,3)	0 (60)	48,1±1,4	43,9±1,7	8,13±1,5
12	0 (60)	1,68 (4,7)	0 (60)	11,2±1,8	80,1±1,7	12,10±1,7
13	0 (60)	0 (3)	-1,68(43,2)	22,9±1,4	71,1±2,1	9,69±1,2
14	0 (60)	0 (3)	1,68(76,82)	18,7±1,9	74,8±2,2	9,57±1,1
15	0 (60)	0 (3)	0 (60)	26,5±2,2	66,3±1,8	9,52±1,3
16	0 (60)	0 (3)	0 (60)	28,4±2,2	64,6±1,9	9,66±1,2

Uma comparação entre as Tabelas 10, 11 e 28 indicam que para o leito operado com o mesmo tipo de partícula (ABS) e com as mesmas condições operacionais, de forma geral, a secagem de suspensões de goma xantana é mais vantajosa em termos de eficiência de produção e retenção de sólidos do que  $\lambda$ -carragena. Uma possível explicação pode ser relacionada ao ângulo de contato na interface xantana-ABS, que foi ligeiramente maior e, conseqüentemente a tensão superficial é menor, fazendo com que a energia para desprender a camada de suspensão sobre a superfície seja mais baixa facilitando sua remoção pelo atrito. Além disso, de acordo com o tipo de polissacarídeo e partícula inerte avaliada, os resultados das Tabelas 10, 11 e 28 mostraram que a combinação xantana-ABS foi a que ofereceu as melhores condições de desempenho de secagem usando a tecnologia de leito de jorro bidimensional.

#### 4.5.1.1 Efeito das condições de secagem sobre a eficiência de produção do pó

Na Figura 46 são mostrados os efeitos das condições de secagem sobre a produção de pó. Os resultados indicaram que a temperatura de secagem (T) e vazão de suspensão (V) foram as únicas variáveis estatisticamente significativas que influenciaram na produção de pó ( $\eta_p$ ) num intervalo de confiança de 95%.



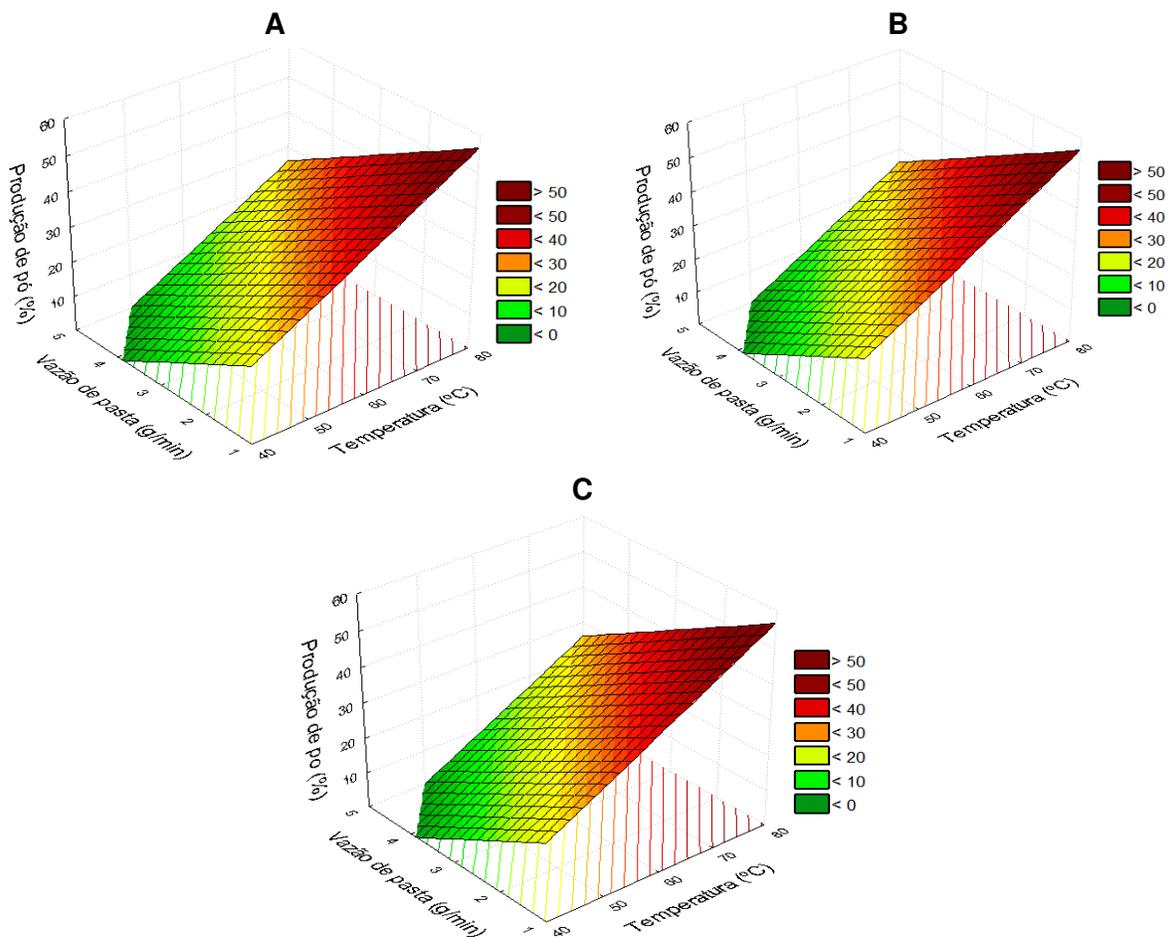
**Figura 46** Diagrama de Pareto para a produção de pó de  $\lambda$ -carragena usando ABS como partícula inerte.

Na Tabela 29 são apresentados a avaliação através de análise de variância (ANOVA) e os coeficientes do modelo de regressão para a produção de pó. A qualidade obtida para o ajuste foi de 83,6% o que indica um ajuste razoável entre os valores experimentais e previstos pelo modelo. O teste F para a falta de ajuste não foi significativo ( $F_{FA} < F_{tab}$ ), ou seja, o modelo pode ser considerado preditivo para os dados experimentais. Observa-se que a eficiência média de produção de pó foi 23%, valor menor do que a produção para xantana-vidro de 28,2% e xantana-ABS de 44,32%, indicando uma alta aderência superficial.

**Tabela 29** Coeficientes de regressão do modelo matemático codificado para predição da produção de pó de  $\lambda$ -carragena seca com partículas inertes de ABS

Coeficiente da Regressão	Valor
$F_{ca}/F_{tab}$	8,72
$F_{FA}/F_{tab}$	0,04
$R^2$	83,6
Média	23,11
Temperatura T	8,60
Vazão de pasta V	-7,713

As superfícies de resposta para produção do pó de  $\lambda$ -carragena em função da temperatura de secagem e vazão de pasta para três níveis de porcentagens de ar que passa pelo jorro são mostradas na Figura 47.

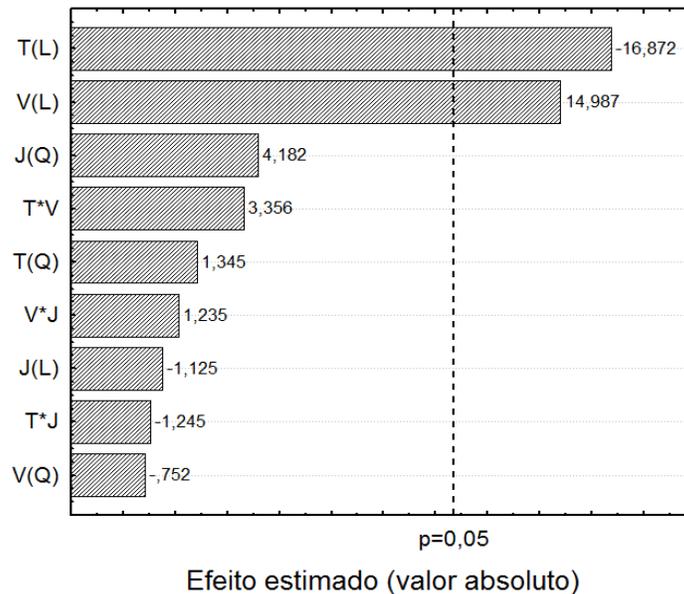


**Figura 47** Produção de pó de  $\lambda$ -carragena seca usando partículas inertes de ABS em função da temperatura de secagem e vazão de pasta para diferentes % de vazão de ar no jorro: A (43%/43 m<sup>3</sup>/h), B (60%/ 60m<sup>3</sup>/h) e C (77%/77 m<sup>3</sup>/h).

A variação da aeração no ânulo não teve um efeito significativo e relevante na produção de pó de carragena. Assim, um aumento da temperatura de secagem junto com uma diminuição de vazão de suspensão levou ao aumento da produção de pó. O aumento da temperatura de secagem teve maior efeito quando se trabalhou a baixas vazões de pasta, enquanto que o aumento da vazão de suspensão provocou um decréscimo na produção quando a secagem foi realizada a altas temperaturas. Conseqüentemente, temperaturas acima de 70°C e vazão de suspensão menor de 2 g/min, obtiveram-se os máximos níveis de produção. Portanto, o aumento das taxas de evaporação devido ao aumento da temperatura e menores camadas de suspensão na superfície do inerte favoreceram a produção de  $\lambda$ -carragena. Ferreira et al. (2002) observaram um aumento na eficiência de recuperação em função do aumento da temperatura de secagem atribuindo tal fato a uma maior queda no teor de umidade do pó e um maior facilidade de desprendimento deste das partículas inertes.

#### **4.5.1.2 Efeito das condições de secagem sobre a retenção de sólidos**

Os efeitos estatísticos das diferentes variáveis do processo de secagem sobre a retenção de sólidos (RS) no leito são apresentados na Figura 48. Foi encontrado um efeito negativo da temperatura indicando que o aumento da temperatura do ar de secagem (T) reduz a retenção de sólidos. Novamente a vazão de suspensão (V) demonstrou ser uma variável relevante no processo de secagem, mostrando um efeito positivo na retenção de sólidos no leito para o qual o aumento da vazão de pasta aumenta a retenção de sólidos dentro do secador.



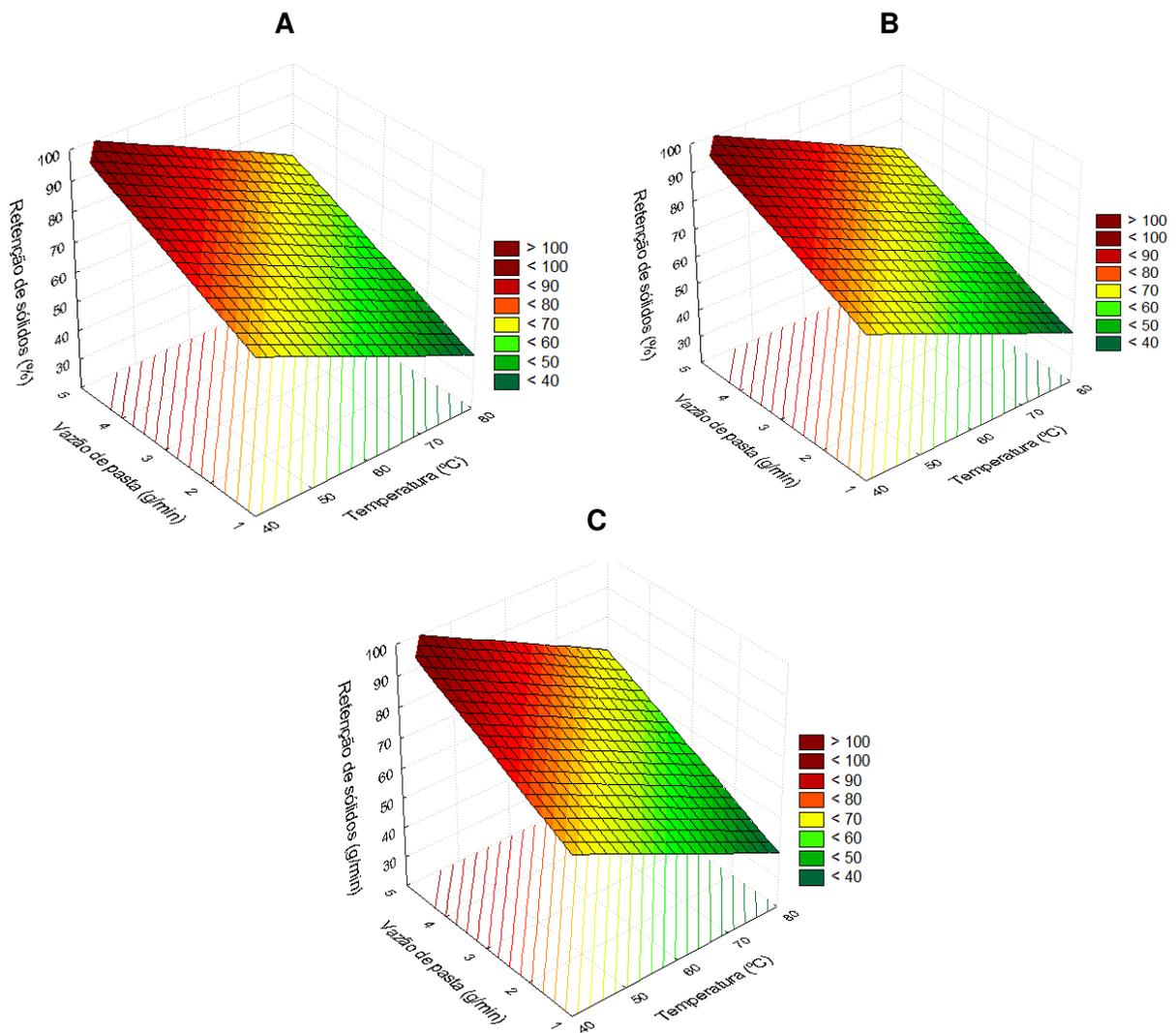
**Figura 48** Diagrama de Pareto para a resposta retenção de sólidos de  $\lambda$ -carragena seca usando partículas inertes de ABS.

A análise de variância (ANOVA) e os coeficientes de regressão para o modelo retenção de sólidos (RS) são apresentados na Tabela 30. Os resultados indicam que a regressão foi estatisticamente significativa ( $F_{cal} > F_{tab}$ ) com uma qualidade obtida para o ajuste de 88,93%, indicando um ajuste razoável entre os valores experimentais e previstos pelo modelo. Apresenta-se uma falta de ajuste estatisticamente não significativa ( $F_{FA} < F_{tab}$ ) o que faz com que o modelo possa ser usado para a predição dos dados experimentais. Observa-se que o valor médio do modelo é 72 %, ou seja, a retenção de sólidos dentro do leito foi maior que nos leitões operados com xantana-vidro (65,55%) e xantana-ABS (49,45%).

**Tabela 30** Coeficientes de regressão do modelo matemático codificado para prever a retenção de sólidos de  $\lambda$ -carragena usando partículas inertes de ABS

Coeficiente da Regressão	Valor
$F_{cal}/F_{tab}$	15,28
$F_{FA}/F_{tab}$	0,01
$R^2$	88,93
Média	71,998
Temperatura T	-8,601
Vazão de pasta V	7,713

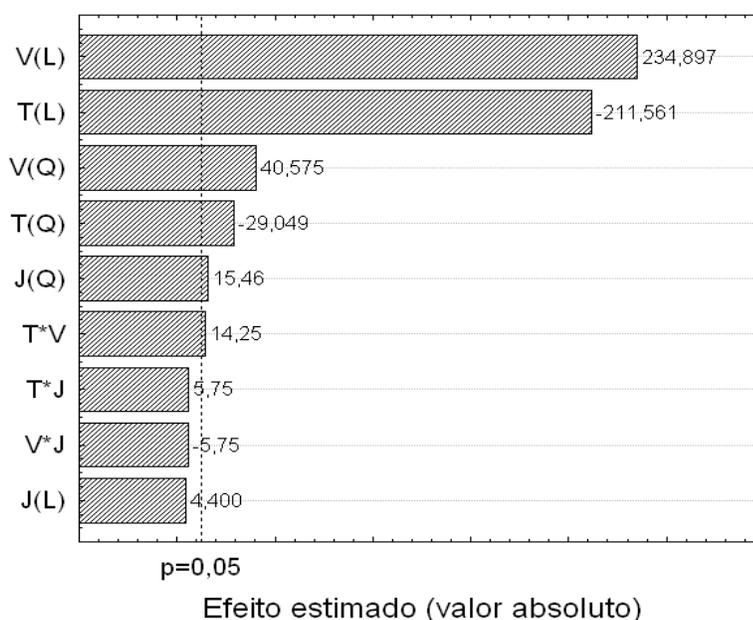
A retenção de material no leito é mostrada na Figura 49 em função da temperatura do ar e a vazão de suspensão, para diversas porcentagens de vazão de ar no jorro. O acúmulo de sólidos dentro do leito aumentou a medida que a vazão de alimentação aumentou e a temperatura reduzida, o que está de acordo com os resultados obtidos para produção de pó (Figura 47). A retenção de material foi causada pela intensificação das forças adesivas (aumento da vazão) junto às baixas taxas de evaporação (diminuição da temperatura).



**Figura 49** Retenção de sólidos de  $\lambda$ -carragena usando um leito de partículas ABS em função da temperatura de secagem e vazão de suspensão para diferentes porcentagens de ar no jorro: A (43%/ 43 m<sup>3</sup>/h), B (60%/60 m<sup>3</sup>/h) e C (77%/77 m<sup>3</sup>/h).

#### 4.5.1.3 Efeito das condições de secagem sobre o teor final de umidade

Na Figura 50 são apresentados os efeitos estatísticos das diferentes variáveis do processo de secagem para o conteúdo final de umidade. A temperatura de secagem (T) junto com a vazão de suspensão (V) foram as variáveis que mais influenciaram no teor de umidade final do pó. A temperatura e a vazão de alimentação da suspensão apresentaram efeito negativo e positivo no teor de umidade, respectivamente.



**Figura 50** Diagrama de Pareto para a resposta teor de umidade de  $\lambda$ -carragena seca usando partículas inertes de ABS.

A análise de variância (ANOVA) e os coeficientes do modelo de regressão para o teor de umidade são apresentados na Tabela 31. De acordo com os resultados, a regressão foi estatisticamente significativa ( $F_{cal} > F_{tab}$ ), com uma qualidade do ajuste de 73,10%. A falta de ajuste foi estaticamente significativa ( $F_{FA} > F_{tab}$ ), assim o modelo só pode ser usado para indicar tendências.

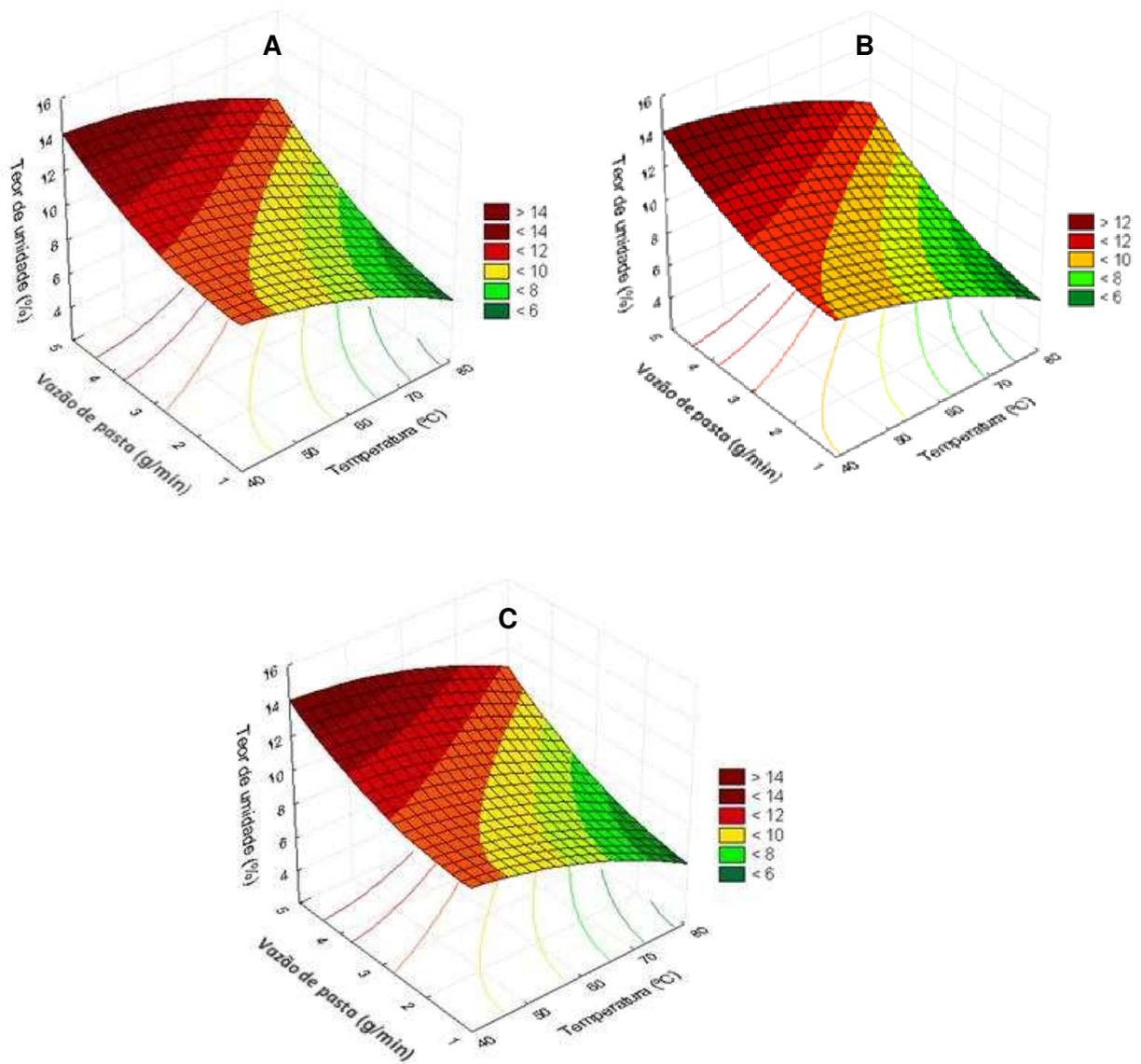
O valor médio do teor de umidade (8,98%) foi maior em comparação com os valores para xantana seca em vidro (8,055%) e ABS (7,83%). De acordo com Ferreira et al. (2002) este fato pode ser atribuído ao pouco desprendimento da

camada de suspensão que recobre as partículas. Além disso, o ar de secagem fica mais saturado dentro do leito pela formação de camadas finas úmidas sobre o inerte.

**Tabela 31** Coeficientes de regressão do modelo matemático codificado para prever o teor de umidade final do pó de  $\lambda$ -carragena seca usando partículas inertes de ABS

Coeficiente da Regressão	Valor
$F_{ca}/F_{tab}$	19,73
$F_{FA}/F_{tab}$	0,95
$R^2$	73,10
Média	9,635
Temperatura T	-1,053
Temperatura T <sup>2</sup>	-0,175
Vazão de pasta V	1,168
Vazão de pasta V <sup>2</sup>	0,245
% Ar no jorro J <sup>2</sup>	0,093
T*V	0,093

Na Figura 51 é apresentado o teor de umidade final do pó de carragena em função das condições de secagem. Baixas vazões de suspensão associadas com altas temperaturas do ar de secagem diminuíram a umidade do pó. A redução da umidade final do pó em temperaturas elevadas foi verificada por outros autores (CHRIST, 2006; FERREIRA et al., 2002; MARRETO et al., 2006). O aumento da temperatura conduziu a maiores taxas de secagem e a umidade de equilíbrio do material tendeu a ser menor em temperaturas mais baixas, o que pode explicar o decréscimo do teor de umidade. Altos valores do teor de umidade estão associados a baixa eficiência de produção de pó e a alta porcentagem de retenção de sólidos dentro do leito.



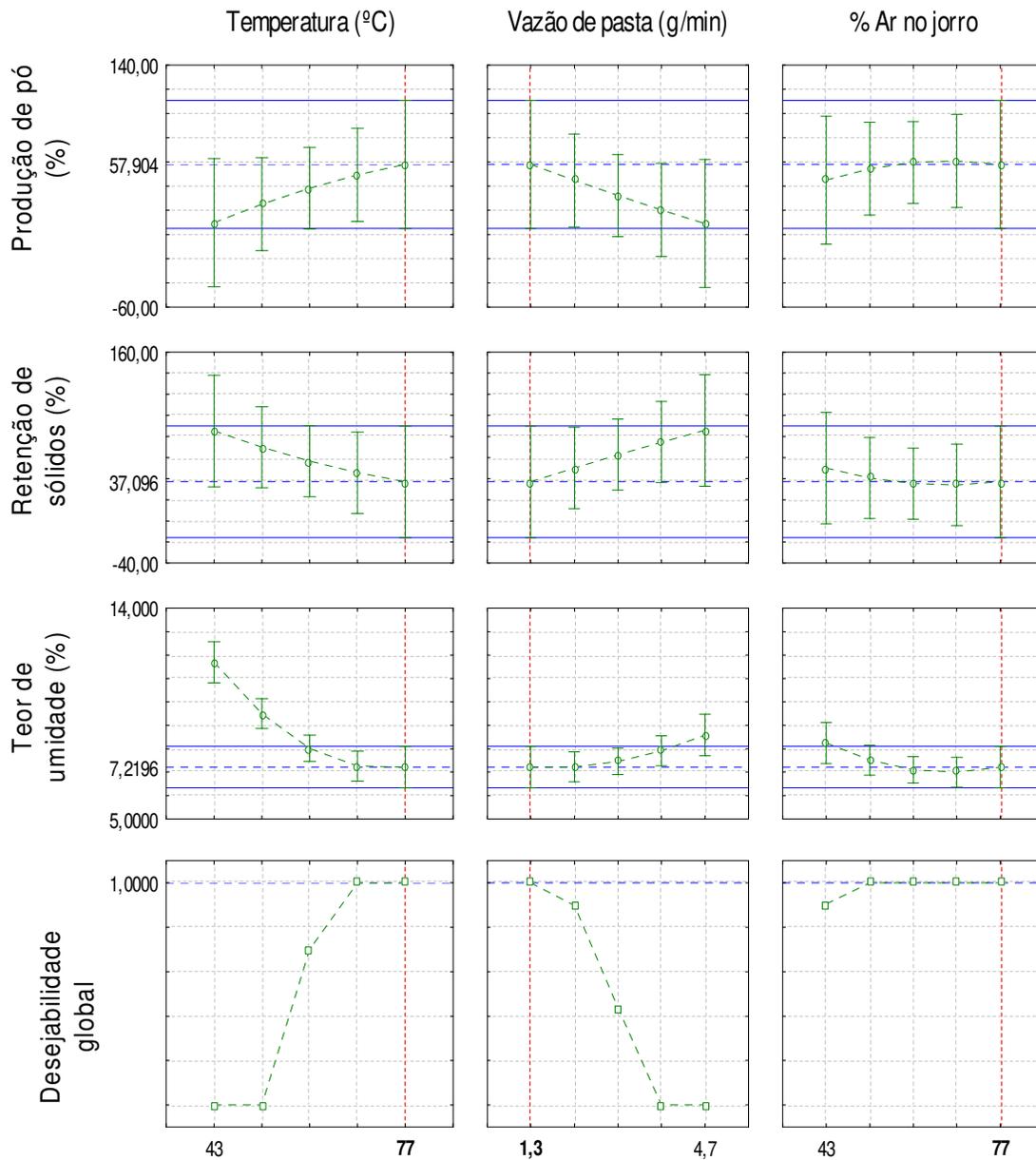
**Figura 51** Teor final de umidade de  $\lambda$ -carragena seca usando partículas inertes de ABS em função da temperatura de secagem e vazão de suspensão para diferentes porcentagens de ar no jorro: A (43%), B (60%), C (77 %).

## **4.6 Otimização do sistema de secagem para suspensões de $\lambda$ -carragena usando ABS e efeitos na qualidade do produto**

A escolha das melhores condições de operação na secagem de suspensões poliméricas envolve a comparação entre os parâmetros do processo e as respostas obtidas. Assim, as condições de operação de secagem como temperatura de ar, vazão de alimentação e porcentagem de vazão de ar que passa pelo jorro foram otimizadas usando a técnica de desejabilidade anteriormente descrita, considerando a produção do material, retenção de sólidos e teor de umidade.

### **4.6.1 Efeito no desempenho de secador**

Os resultados do processo de otimização são mostrados na Figura 52 para o leito operado com partículas de ABS. Observa-se da Figura 52 que a condição ótima do secador é alcançada operando o secador com uma temperatura de secagem de 77 °C, vazão de pasta 1,3 g/min e porcentagem de vazão de ar no jorro de 77% ( $77\text{m}^3\text{h}^{-1}/8,5\text{ms}^{-1}$ ), obtendo-se uma produção de pó de 58%, uma retenção de sólidos no leito de sólidos 37% e um teor final de umidade de 7,1%. Assim, o modelo prediz que aproximadamente um 5% do produto não é recuperado pelo ciclone representado a quantidade do material que fica colado nas paredes do acrílico junto com o produto arrastado pelo gás efluente.



**Figura 52** Análise de desejabilidade para otimizar as variáveis de secagem de  $\lambda$ -carragena em um leito de partículas inertes de ABS.

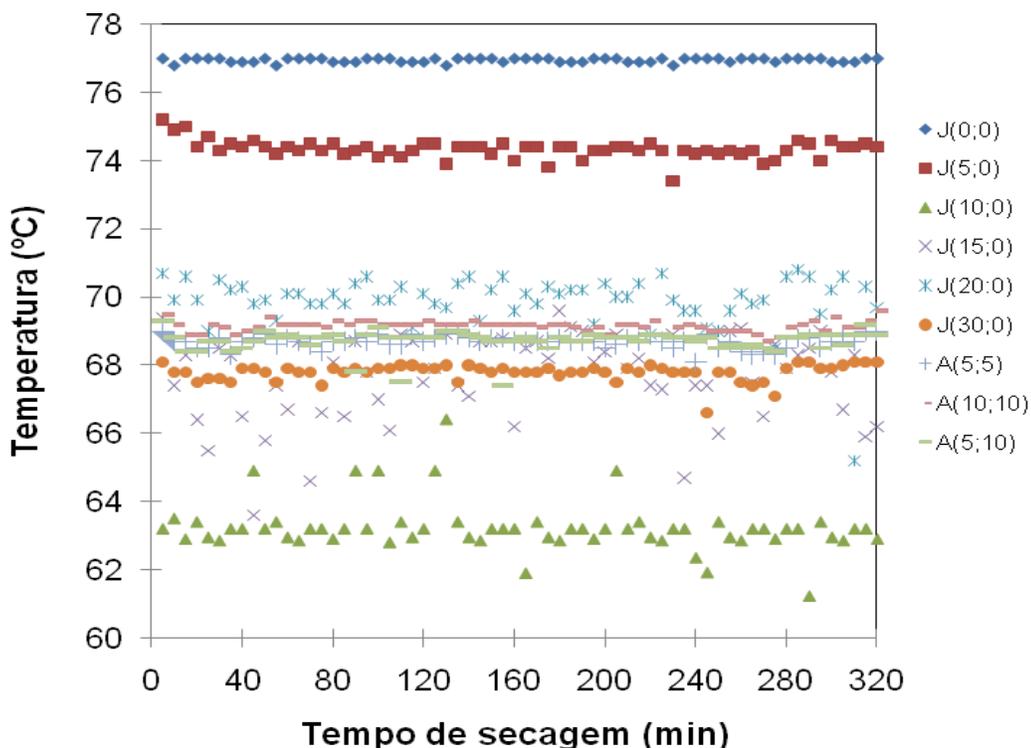
Na Tabela 32, encontram-se os valores experimentais médios para as variáveis resposta produção de pó, retenção de sólidos no leito e teor de umidade e as diferenças com relação aos valores preditos pelo processo de otimização mostrado na Figura 52. Os resultados mostraram que o modelo prediz

maiores valores para a produção de pó e menores para a retenção de sólidos dentro do leito e para o teor de umidade.

**Tabela 32** Desempenho do secador com leito de partículas de ABS na secagem de  $\lambda$ -carragena no ponto de otimização

Partícula	Variáveis de resposta	Valor experimental (%)	Diferença (%)
	Produção de pó	47,23	-22,6
ABS	Retenção de sólidos	46,25	19,80
	Teor de umidade	5,9	-22,22

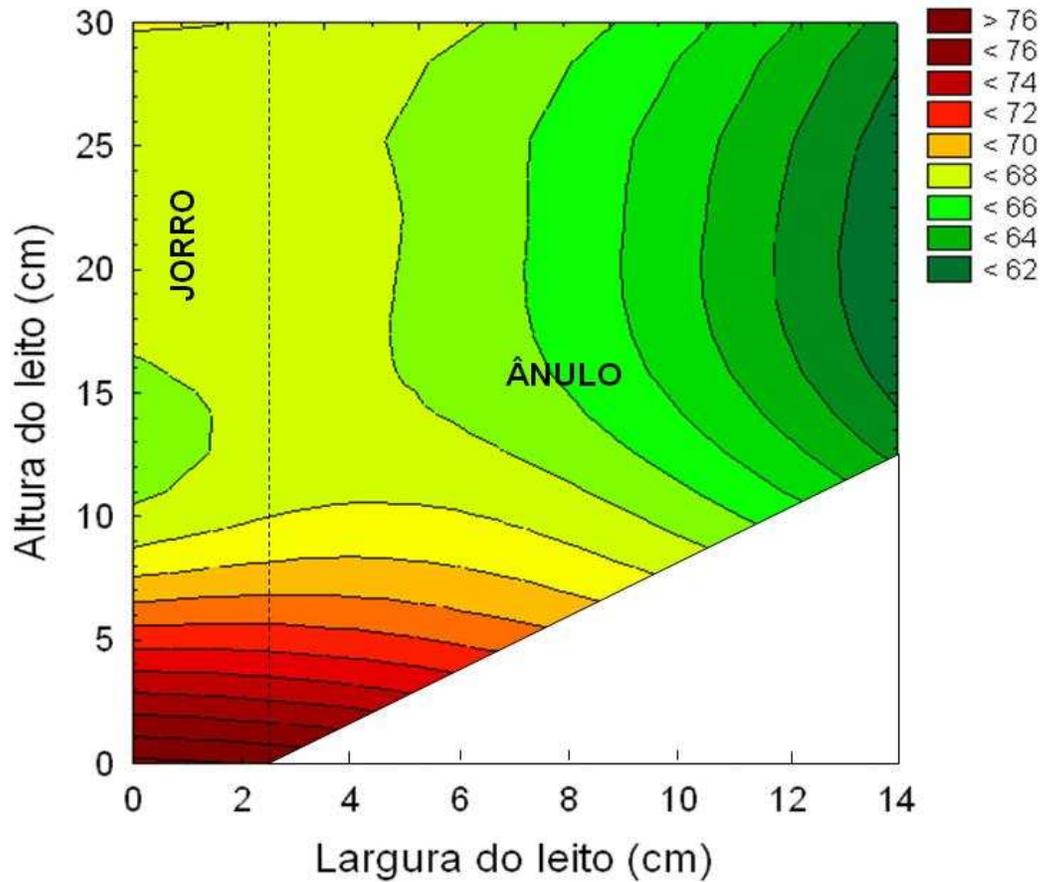
A variação da temperatura dentro do leito nas condições ótimas de secagem para diferentes posições no jorro J (x;y) e ânulo A (x;y) é mostrada na Figura 53. As posições x e y estão em cm e foram referenciadas com relação ao eixo central do jorro.



**Figura 53** Distribuição da temperatura do ar de secagem no leito de partículas inertes de ABS na secagem de  $\lambda$ -carragena.

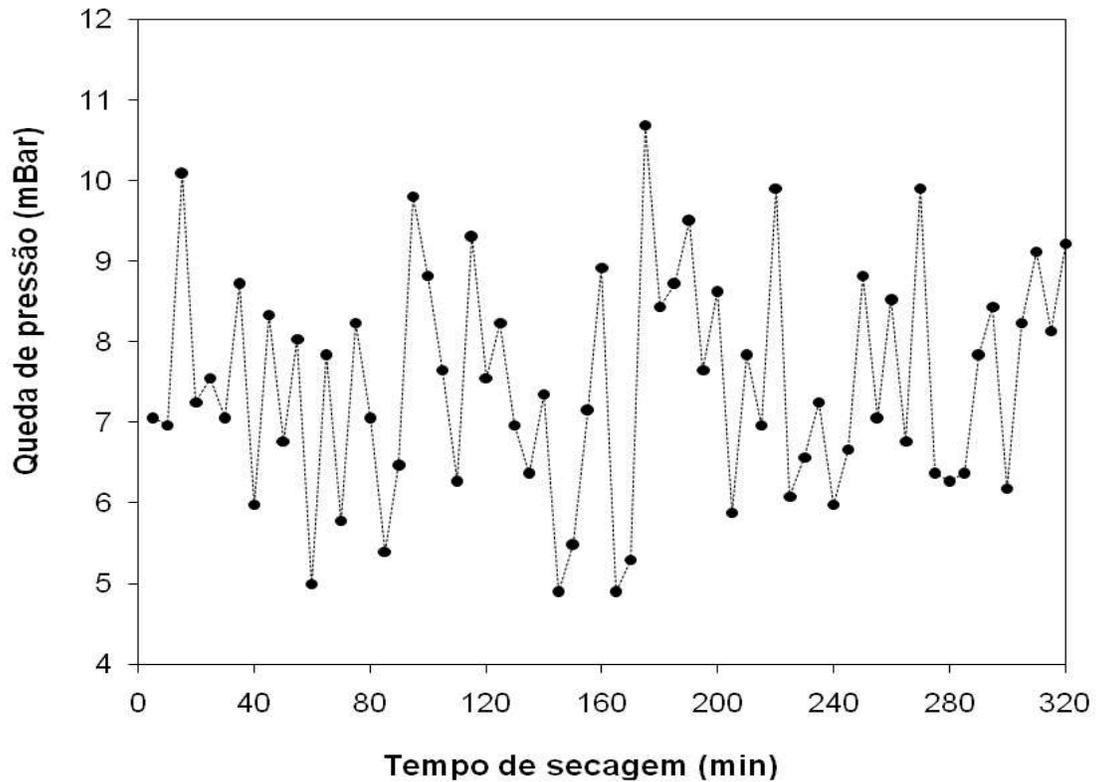
Os resultados indicaram que não existe variação de temperatura com o tempo de processamento para uma condição fixa de secagem, ou seja, o secador trabalhou em regime estável. De acordo com Swasdisevi et al. (2005) esta condição isotérmica no leito é originada pela rápida e elevada mistura de partículas. Nota-se, que a menor temperatura dentro do leito é estabelecida na posição J(10;0) a qual esta logo acima da posição J(5;0) que correspondeu ao ponto de alimentação e que a temperatura dentro do jorro tende a decrescer com a altura. O maior diferencial de temperatura ocorreu no jorro (14°C), o que é um indicativo de que a zona predominante no processo evaporativo da suspensão está na região de jorro.

O mapa de distribuição de temperaturas para o leito com partículas inertes de ABS na secagem de  $\lambda$ -carragena é dado na Figura 54. Observa-se que uma zona fria foi criada no jorro pelo ponto de alimentação da pasta, o que ocorre na altura de 10-16 cm a partir da base do leito. Por outro lado, a existência de uma zona quente na base do ânulo foi criada possivelmente pela passagem de ar quente desde a base do jorro. Assim, os processos evaporativos tomaram lugar no jorro e ânulo, sendo que a contribuição evaporativa no jorro foi predominante devido à existência de um diferencial de temperatura maior. Para as posições na largura acima de 10 cm, as predições não puderam ser fisicamente razoáveis devido à falta de dados experimentais nessas posições dentro do leito.



**Figura 54** Mapa de distribuição de temperaturas para o ponto ótimo na secagem de suspensões de  $\lambda$ -carragena seca usando partículas inertes de ABS.

A queda de pressão no leito de partículas termoplásticas de ABS quando o secador foi alimentado com suspensões de  $\lambda$ -carragena nas condições ótimas de operação é mostrada na Figura 55.



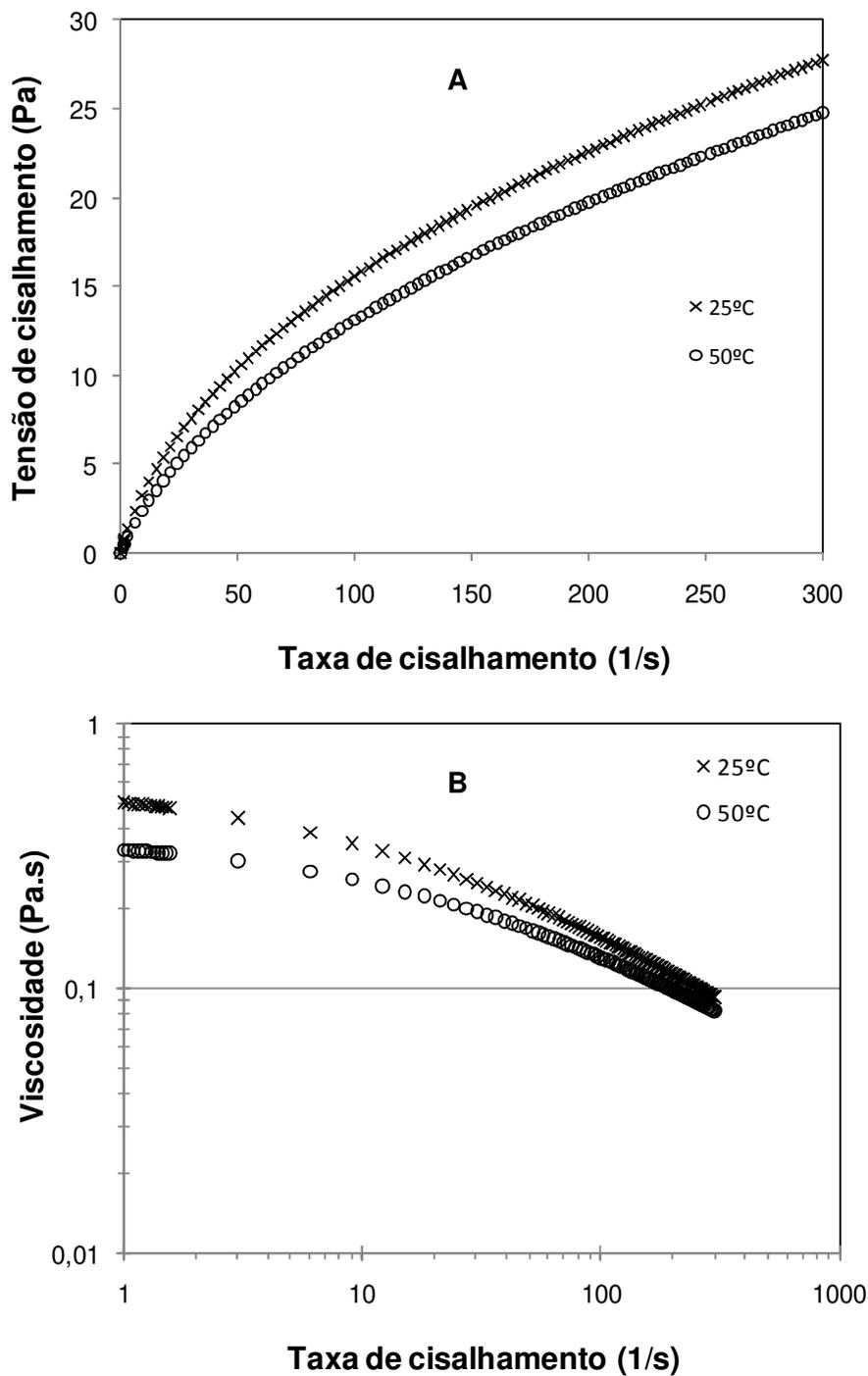
**Figura 55** Queda de pressão no leito de partículas inertes de ABS para secagem de suspensões de  $\lambda$ -carragena nas condições de otimização.

Os resultados da Figura 55 mostraram uma variação de queda de pressão na faixa de 5-10 mBar ao longo do tempo de secagem concordando com a faixa de queda de pressão experimentada com a secagem de suspensões de goma xantana. De acordo com os reogramas para suspensões de xantana e  $\lambda$ -carragena para a mesma concentração (1% p/p) e temperatura, a viscosidade foi maior para a xantana. No entanto, não foi possível visualizar a variação de queda de pressão em função da viscosidade da suspensão devido à elevada instabilidade fluidodinâmica apresentada no leito com partículas de ABS ou vidro.

## **4.6.2 Efeito nas propriedades reológicas**

### **4.6.2.1 Curvas de escoamento para $\lambda$ -carragena comercial**

Na Figura 56 (A,B) são apresentados os reogramas para as suspensões de carragena comercial (1% p/p) para as temperaturas de 25°C e 50°C. De acordo com os resultados, as suspensões mostraram uma característica pseudoplástica, em que a viscosidade decresceu com o aumento da taxa de cisalhamento e com a temperatura. Este comportamento reológico é típico dos hidrocolóides em suspensão aquosa (YASEEN et al., 2005). Segundo Lizarraga et al. (2006), o comportamento pseudoplástico de suspensões aquosas de carragena pode ser explicado em termos da estrutura da rede molecular da suspensão, pois com o cisalhamento a taxa de destruição da rede excede à taxa de formação de novas redes, levando à redução na densidade “cross-link” e portanto da viscosidade da suspensão. De acordo com Bubnis (2000), a redução da viscosidade com aumento da temperatura é devido à maior facilidade de deslizamento entre as moléculas ocasionado pelo decréscimo do grau de hidratação molecular da carragena.



**Figura 56** Curvas de escoamento para suspensões de  $\lambda$ -carragena comercial (1% p/p) em função da taxa de cisalhamento: Tensão (A) e Viscosidade (B).

Na Tabela 33 são mostrados os parâmetros de ajuste do modelo de Cross para suspensões de  $\lambda$ -carragena comercial para diferentes temperaturas e concentração de 1 % (p/p) e o teste de Tukey para um nível de significância de

5%. Os valores confirmaram a característica pseudoplástica ( $m < 1$ ), atributo representativo desta classe de suspensões em meio aquoso (VARDHANABHUTI e FOEGEDING, 1999). Por outro lado, o menor efeito estabilizante ocorreu para uma temperatura de 50°C, situação originada pela elevada e drástica diminuição da viscosidade com a temperatura apresentada pela xantana em soluções aquosas (BUBNIS, 2000). A constante de tempo ( $\lambda$ ) mostrou tendência a diminuir com a temperatura da suspensão, devido ao acréscimo da movimentação molecular originado pelo aumento do movimento Browniano com a temperatura, fazendo com que o tempo de agregação e sobreposição das moléculas fosse menor (LAPASIN e PRICL, 1999).

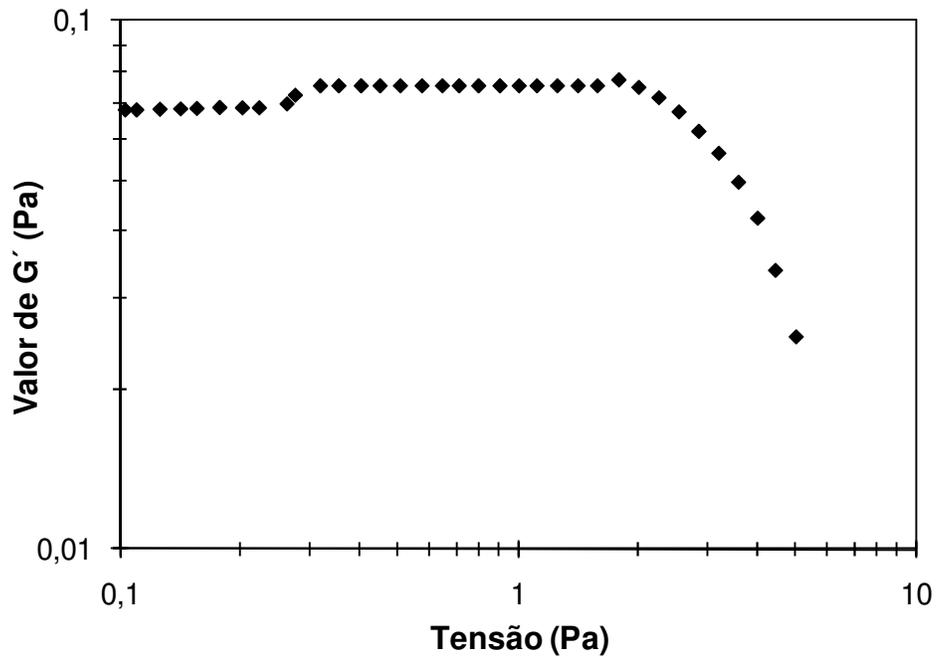
**Tabela 33** Coeficientes do modelo de Cross para as suspensões de  $\lambda$ - carragena comercial

Temperatura (°C)	Parâmetros do modelo de Cross				R <sup>2</sup>
	$\eta_0$ (Pa.s)	$\eta_\infty$ (Pa.s)	$\lambda$ (s)	m	
25	0,595 <sup>A</sup>	0,00033 <sup>A</sup>	0,0567 <sup>A</sup>	0,6 <sup>A</sup>	0,99
50	0,374 <sup>B</sup>	0,000347 <sup>A</sup>	0,0293 <sup>B</sup>	0,6 <sup>A</sup>	0,99

\*Medias com letras diferente são estatisticamente significativas para uma significância de 5%.

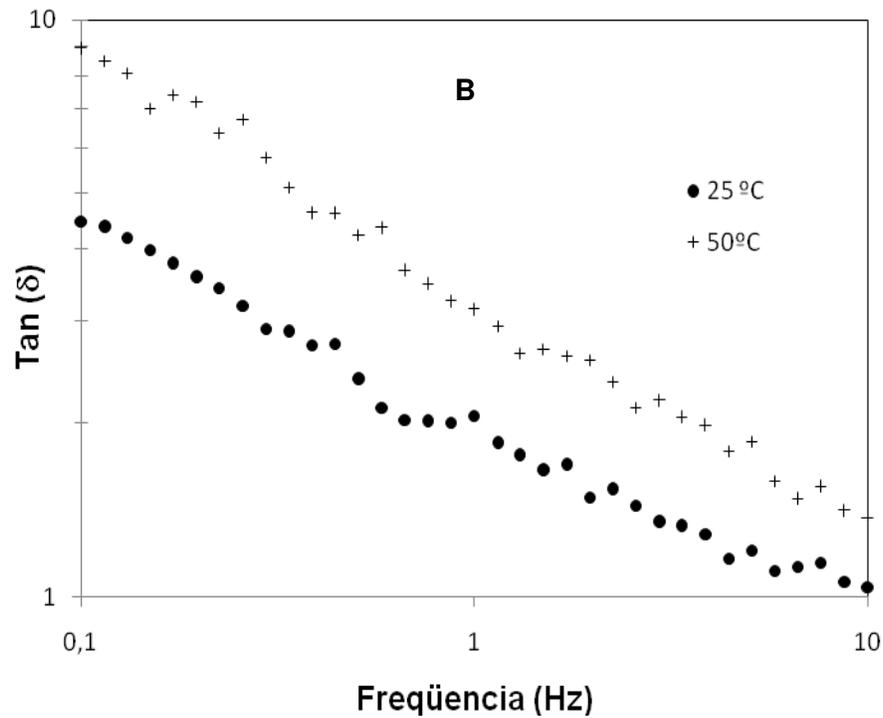
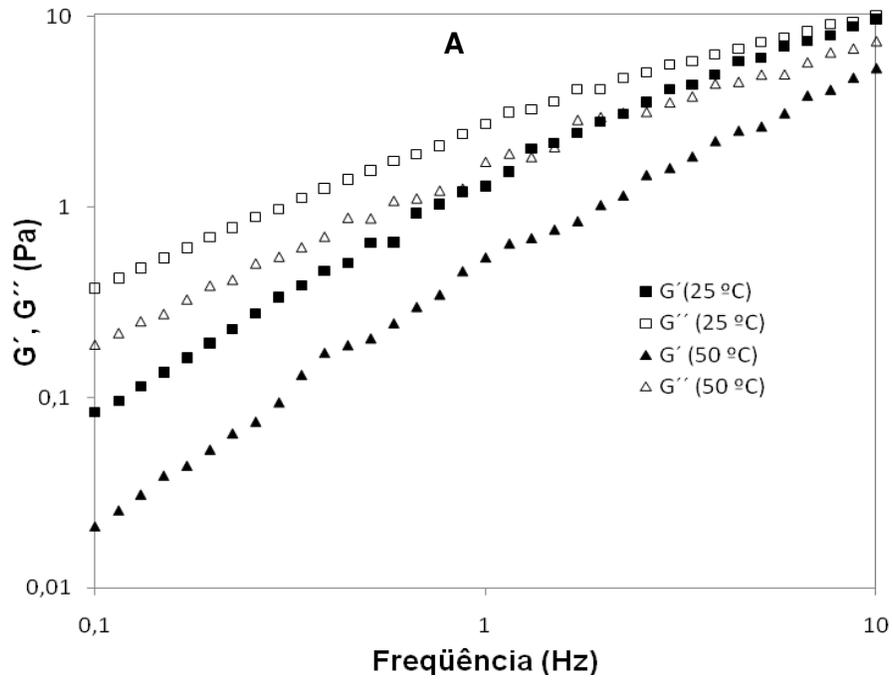
#### 4.6.2.2 Ensaio reológico dinâmico de $\lambda$ -carragena comercial

A varredura de tensão a 25°C para uma frequência de 0,1 Hz é mostrada na Figura 57. De acordo com os resultados o máximo valor de tensão oscilatória é de  $\tau^0 = 2$  Pa. No entanto, a caracterização viscoelástica foi estabelecida para um valor de tensão máxima de 0,4 Pa, de forma a garantir que todos os resultados obtidos nas varreduras de frequências estivessem dentro do intervalo linear.



**Figura 57** Varredura de tensão para determinar a faixa linear para as suspensões de  $\lambda$ -carragena comercial (1 % p/p).

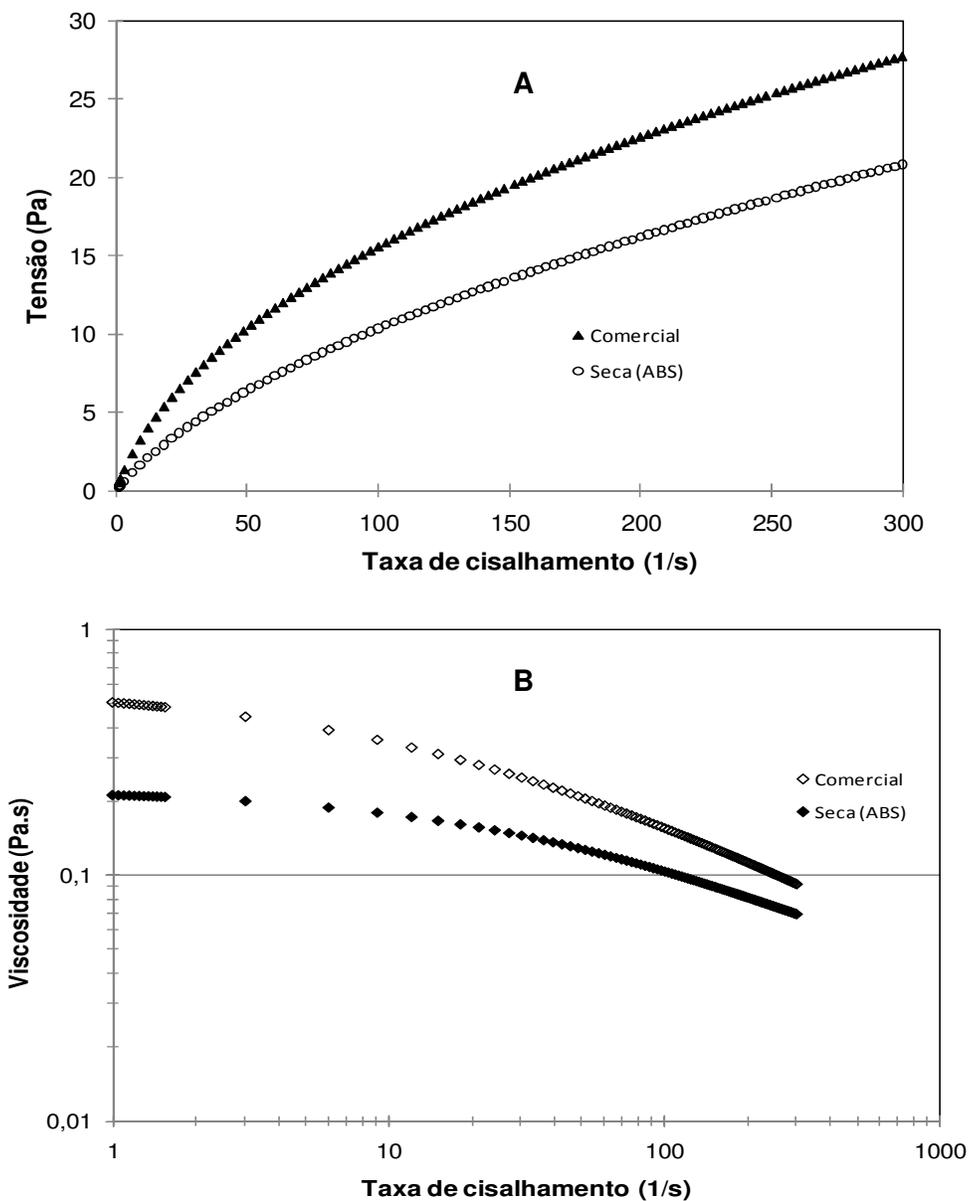
Na Figura 58 (A e B), pode-se observar o comportamento viscoelástico da goma comercial de  $\lambda$ -carragena na solução aquosa 1% (p/p) a 25 e 50°C. Os resultados mostraram que o módulo de perda ( $G''$ ) foi maior que o módulo de armazenamento  $G'$  em todo o intervalo de freqüência estudado, o que concorda com Rodd et al. (2000). Os valores de  $G'$  e  $G''$  convergem para altas freqüências o que é uma característica das suspensões diluídas (STEFFE, 1996) e não gelificantes mostrando uma alta dependência com a freqüência tendendo a diminuir com aumento da temperatura (LANGENDORFF et al., 2000).



**Figura 58** Características viscoelásticas de  $\lambda$ -carragena comercial: A: Módulos de armazenamento ( $G'$ ) e perda ( $G''$ ); B: Tangente de perda.

#### 4.6.2.3 Reologia das suspensões de $\lambda$ -carragena seca com partículas de ABS

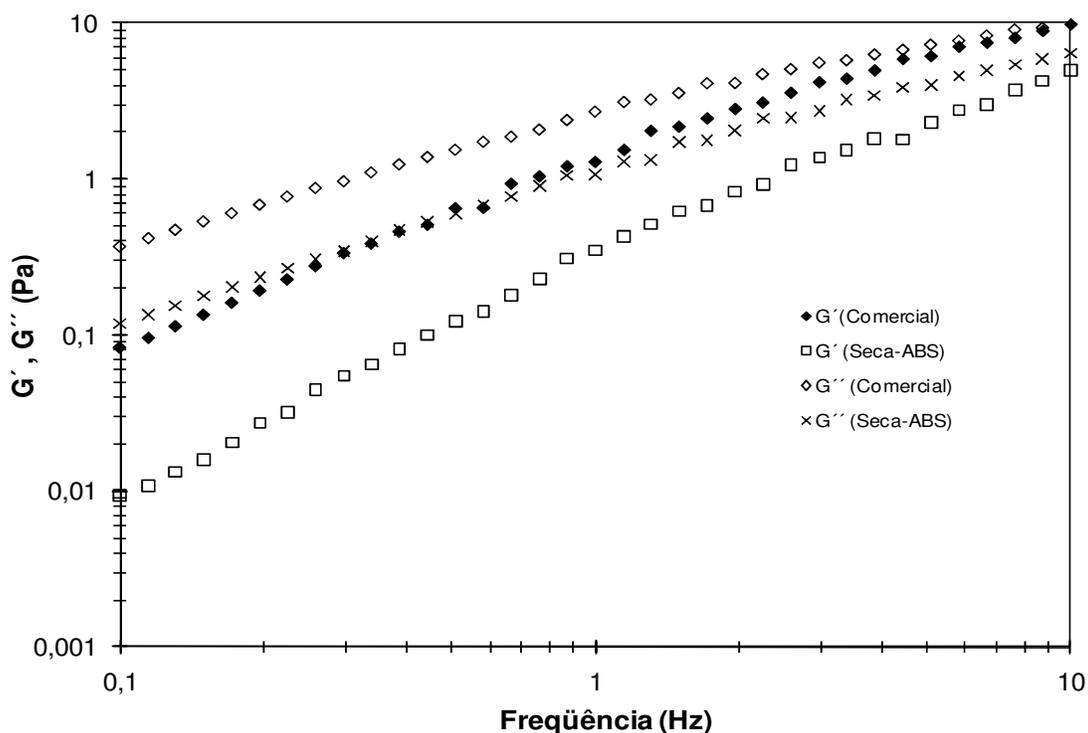
Na Figura 59 são apresentados os reogramas a 25°C para a  $\lambda$ -carragena reconstituída em condição de secagem otimizada e comercial para uma concentração de 1% (p/p).



**Figura 59** Curvas de escoamento para suspensões de  $\lambda$ -carragena comercial e reconstituída em condições otimizadas com partículas inertes de ABS: Tensão (A) e Viscosidade (B).

Os resultados mostraram que as condições de secagem alteraram severamente a qualidade reológica da goma  $\lambda$ -carragena. A característica pseudoplástica foi conservada enquanto que a queda do valor da viscosidade foi significativa. A viscosidade do produto seco obtido em condições de secagem otimizadas atingiu a metade do valor da goma comercial para taxas de cisalhamento entre  $1-10 \text{ s}^{-1}$ , enquanto que acima de  $10 \text{ s}^{-1}$  a queda de viscosidade foi entre 35-70%. Assim, altas temperaturas de secagem ( $77^\circ\text{C}$ ) juntamente com baixas vazões de suspensão (maiores tempos de processamento) ocasionaram uma deterioração na qualidade do produto. Resultados similares foram apresentados por Lai et al. (2000) e Lii et al. (1999), em que a queda de viscosidade foi associada com a alteração ou modificação da cadeia molecular do polissacarídeo.

É mostrada na Figura 60 a caracterização viscoelástica a  $25^\circ\text{C}$  da suspensão comercial e do produto obtido pela secagem em condições otimizadas.



**Figura 60** Módulos de armazenamento ( $G'$ ) e de perda ( $G''$ ) para suspensão de  $\lambda$ -carragena obtida pelo processo de secagem otimizado com partículas inertes de ABS.

Observa-se, que a  $\lambda$ -carragena mantém sua característica de suspensão diluída após a secagem ( $G'' > G'$ ) dentro do intervalo de frequência estudado. No entanto, os valores de  $G'$  e  $G''$  decresceram significativamente com relação ao produto comercial, sendo a diferença entre  $G''$  e  $G'$  maior para o produto seco indicando um comportamento de suspensão mais diluída. Assim as condições de secagem otimizadas devem ter levado a uma despolimerização do produto acarretando possivelmente em uma mudança estrutural da goma, o que concorda com os resultados obtidos com as curvas de escoamento (Figura 59).

Avaliando as condições de secagem no ponto otimizado do desempenho do secador para a secagem de suspensões de xantana e carragena com partículas de ABS e vidro, observou-se que para taxas de alimentação acima de 1 g/min as características da goma xantana não foram modificadas com a secagem enquanto que para a  $\lambda$ -carragena existe um dano ou modificação estrutural da cadeia molecular do polissacarídeo. A massa molecular da goma xantana é aproximadamente 2000 kDa (CPKELKO, 2007), a qual é significativamente maior que da  $\lambda$ -carragena 400-800 kDa (LIZARRAGA et al., 2006; VELDE e RUITER, 2003). Assim, a goma xantana, devido a sua elevada massa molecular seria mais resistente à degradação por despolimerização térmica, tempos de processamento a elevadas temperaturas e cisalhamento induzido por processo mecânicos (SOLDI, 2005)



## 5 CONCLUSÕES

1. A secagem de suspensões de  $\lambda$ -carragena usando vidro como partícula inerte não foi viável, pois não houve produção de pó. Este fato foi atribuído a uma alta afinidade entre este polissacarídeo e as características do vidro, levando a uma forte aderência superficial devida ao baixo ângulo de contato. No entanto, o uso de esferóides de ABS no leito permitiu secar  $\lambda$ -carragena com uma produção média de pó de 24% e uma retenção média de sólidos maior que 65 %.
2. O uso de um secador de leito de jorro fluidizado bidimensional com partículas inertes de vidro e esferóides de ABS permitiu obter pó reconstituído a partir de suspensões de xantana. O desempenho do secador foi melhor usando ABS como partícula inerte apresentando uma produção média de 45% e de retenção de sólidos de 49%, enquanto que para xantana seca em leito de partículas de vidro a produção média foi de 28% e a retenção de sólidos de 65%.
3. Na secagem contínua de suspensões de xantana com vidro como partícula inerte, a diminuição da vazão de alimentação juntamente com o aumento da aeração no ânulo foram as variáveis do processo que mais contribuíram no desempenho do secador. Para a secagem de xantana e  $\lambda$ -carragena usando ABS como material inerte, a vazão de suspensão e temperatura de secagem foram as condições operacionais mais relevantes.
4. As características fluidodinâmicas do leito como velocidade da partícula inerte no ânulo e jorro e altura de jorro foram fortemente influenciadas pela vazão de suspensão e quantidade de ar que passa no jorro e ânulo.
5. A distribuição de temperaturas dentro do leito operado com partículas de ABS e vidro apresentou-se em regime estável sem variações significativas da temperatura em função do tempo de secagem, operando o leito quase

isotermicamente. Além disso, a evaporação foi localizada predominantemente na parte central do jorro e na base do ânulo.

6. As quedas de pressão dentro do leito tanto para as partículas de ABS e vidro indicaram a existência de uma alta instabilidade fluidodinâmica, originada pela variação periódica desta variável em função do tempo de processo. As análises de processamento de imagens mostraram estrangulamento do jorro e mudanças em sua geometria.
7. As suspensões de xantana obtidas pela secagem em jorro fluidizado formaram suspensões de natureza altamente pseudoplástica e com propriedades viscoelásticas de gel fraco. A vazão de alimentação da suspensão foi um fator importante para preservar sua qualidade reológica. Uma baixa vazão de alimentação diminuiu a viscosidade e o caráter elástico da xantana, o que pode estar associado a uma despolimerização causada pelo excessivo cisalhamento no leito e prolongado tempo de processamento a altas temperaturas.
8. No ponto de melhor desempenho do secador, a xantana pode ser obtida por secagem usando leito de jorro fluidizado com partículas de ABS e de vidro sem um apreciável dano em seu comportamento reológico e perda de qualidade. Características reológicas de pó reconstituído similares ao produto comercial puderam ser obtidas na maior parte das condições estudadas.
9. Nas condições de melhor desempenho do secador, os resultados indicaram que a secagem de suspensões de  $\lambda$ -carragena foram mais susceptíveis a sofrer mudanças em sua estrutura molecular que a goma xantana mostrando uma queda de viscosidade significativa e apreciáveis variações nas características viscoelásticas. Os valores de  $G'$  e  $G''$  foram menores para a goma carragena reconstituída apontando uma perda de qualidade do produto. As suspensões de  $\lambda$ -carragena obtida pela secagem em jorro

fluidizado no ponto ótimo formaram suspensões de natureza altamente pseudoplástica e com propriedades viscoelásticas de suspensões altamente diluídas.

Portanto, o uso da tecnologia de leito de jorro fluidizado pode ser viável na secagem contínua de sistemas biopoliméricos utilizando materiais inertes com baixa tensão superficial. No entanto, sua aplicação e uso em escala industrial são complexas, devido fundamentalmente à baixa vazão de suspensão e alto tempo de processamento que são necessários para obter uma alta eficiência de produção de pó e uma mínima retenção do material.



## 6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

1. Os resultados desta pesquisa mostraram que as características físicas na interface suspensão/partícula inerte são fundamentais na secagem e remoção do material polimérico. Portanto, seria recomendável testar e avaliar outros materiais inertes como Teflon e polipropileno usando o leito de jorro fluidizado bidimensional.
2. O material reconstituído de goma xantana e  $\lambda$ -carragena apresentou resíduos do material inerte (vidro ou ABS) limitando sua aplicação na indústria de alimentos. Assim, deve-se procurar o material inerte que além de oferecer boas características na remoção da suspensão apresente uma alta resistência ao desgaste originado pelo atrito no leito.
3. Fazer uma caracterização molecular do produto original e do produto obtido pela secagem para avaliar os efeitos da secagem na estrutura e massa molecular do produto.
4. Realizar testes em processos de alimentação intermitentes para obter informação de seus efeitos no desempenho do secador e qualidade do produto final.
5. Para completar o estudo fluidodinâmico do secador seria imprescindível fazer estudos de circulação de sólidos no leito, utilizando-se técnicas de processamento de imagens a alta taxa de amostragem, particularmente preferencialmente acima de 1000 quadros por segundo. Esta velocidade permitiria um estudo mais preciso das taxas de cisalhamento e sua variação dentro do leito.
6. Fazer comparações com outros sistemas de secagem tais como “spray drying” e secadores de superfície de contato aquecida (secador rotativo), quanto ao desempenho e propriedade de qualidade do produto final.



## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHANTA, S.; OKOS, M. R. Quality changes during drying of food polymers. In: ***Drying technology in agriculture and food sciences***. Editor: ArunS. Mujumdar. USA: Science Publishers, 2000. p.133-147.

ANABTAWI, M.Z. Minimum spouting velocity for binary mixture of particles in rectangular spouted beds. ***Canada Journal of Chemical Engineering***, v.76, p.132-136, 1998.

ANABTAWI, M.Z.; UYSAL, B.Z.; JUMAH, R.Y. Flow characteristics in a rectangular spouted-fluid bed. ***Powder Technology***, v.69, p. 205-211, 1992.

ANDREWS, N. C.; MCHUGH, A.; SCHIEBER, J. D. Conformational and rheological dynamics of semi-flexible macromolecules undergoing shear flow: A non-equilibrium brownian dynamics study. ***Journal of Rheology***, v.42, n.2, p.281–305,1998.

ANTUNES, A.E.C.; MOREIRA, A.S.; VENDRUSCOLO, J.L.S.; VENDRUSCOLO, C. T. Síntese de biopolímero xantana em meios convencionais e alternativos: viscosidade x composição. ***Revista Brasileira de Agrociência***, v.6, n.2, p.83-87, 2000.

AOAC. ***Association of Official Analytical Chemists***, 1995.

AQUINO FILHO, R. C. ***Transferência de calor gás partícula em leito de jorro bidimensional***. Campinas, 1995. Tese (Mestrado em Engenharia Química). Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas.

ARSENIJEVIC, Z.L.; GRBAVCIC, Z.B.; GARIC-GRULOVIC, R.V. Drying of solutions and suspensions in the modified spouted bed with draft tube. ***Thermal Science***, v.6, n.2, p. 47-70, 2002.

AVERSA, M.; CURSIO, E.; CALABRO, V.; IORIO, G. An analysis of the transport phenomena occurring during food drying process. ***Journal of Food Engineering***, v.78, p. 922–932, 2007.

AYUB, G. S. E. ***Desenvolvimento de processo de recobrimento de uréia com enxofre utilizando leito de jorro bidimensional***. Campinas, 1997. Tese (Mestrado em Engenharia Química). Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas.

BACELOS, M.S.; SPITZNER NETO, P.I.; SILVEIRA, A.M.; FREIRE, J.T. Analysis of fluid dynamics behavior of conical spouted bed in presence of pastes. ***Drying Technology***, v.23, 427–453, 2005.

BAKER, C. **Industrial drying of foods**. London: Chapman & Hall (first edition), 1997. 309p.

BARBOSA-CÂNOVAS, G.; VEGA-MERCADO, H. **Dehydration of foods**. New York: Springer-Verlag, 1996. 330 p.

BARRET, N.; FANE, A. Drying liquid materials in a spouted bed. In: **Drying '89**. Editor: Arun S. Mujumdar and Michel Roques. New York: Hemisphere, 1990. p. 415-420.

BENALI, M.; AMAZOUZ, M. Drying of vegetable starch solutions on inert particles: Quality and energy aspects. **Journal of Food Engineering**, v.74, p.484–489, 2006

BUBNIS, William A. **Carrageenan**. FMC Biopolymer, 2000. 34p.

CASAS, J.A.; SANTOS, V.E.; GARCÍA-OCHOA, F. Xanthan gum production under several operational conditions: molecular structure and rheological properties. **Enzyme and Microbial Technology**, v.26, p.282–291, 2000.

CHALLEN, I. A. Xanthan gum: a multifunctional stabilizer for food products. In: NISHINARI, K.; DOI, E. **Food hydrocolloids: structures, properties, and functions**. New York: Plenum Press, 1993. p.135-140.

CHRIST, D. **Secagem de clara de ovo em leito de jorro fluidizado bidimensional**. Campinas, 2006. Tese (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.

CONCEIÇÃO, J. J.; MOREIRA, A. S.; VENDRUSCOLO, C. T.; VENDRUSCOLO, J. L. S. Influencia Del tiempo de fermentación em la producción, viscosidad aparente y composición química del polímero sintetizado por *Xanthomonas campestris* pv *pruni* cepa 06. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS, 17, 2000, Fortaleza. Livro de Resumos. Fortaleza, 2000. p.9-56.

CORDEIRO, D. S.; OLIVEIRA, W. P. Technical aspects of the production of dried extract of *Maytenus ilicifolia* leaves by jet spouted bed drying. **International Journal of Pharmaceutics**, v.299, p.115–126, 2005.

COSTA, E.F.; CARDOSO, M.; PASSOS, M.L. Simulation of drying suspensions in spouted-fluid beds of inert particles. **Drying Technology**, v.19, n.8, p.1975-2001, 2001.

COSTA, M.; TARANTO, O. P. Scale-up and spouting of two dimensional beds. **Canada Journal of Chemical Engineering**, v. 81, p.264-267, 2003.

COSTA, M. A. **Fluidodinâmica e ampliação de escala de leitos de jorro bidimensionais**. Campinas, 1998. Tese (Mestrado em Engenharia Química). Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas.

CPKELCO. **KELTROL®/KELZAN® xanthan gum Book (8th edition)**; CPkelco; United States, 2007.

CRAPISTE, G. H.; ROTSTEIN, E. Design and performance operation dryers. In: **Handbook of Engineering Practice**. Editors: Keneth Valentas; Enrique Rotstein and R. Paul Sigh, New York: CRS PRESS, 1997. p.125-165.

CUNHA, R. L.; MAIALLE, K. G.; MENEGALLI, F. C. Evaluation of the drying process in spouted bed and spout fluidized bed of xanthan gum: focus on product quality. **Powder Technology**, v.107, p.234–242, 2000.

CUNHA, R.; GARCÍA DE LA CRUZ, A.; MENEGALLI, F. C. Effects of operating conditions on the quality of mango pulp dried in a spout fluidized bed. **Drying Technology**, v. 24, p.423-432, 2006.

DE RUITER, G. A.; RUDOLPH, B. Carrageenan biotechnology. **Trends in Food Science & Technology**, v. 8, p.389-395, 1997.

DEVAHASTIN, S.; MUJUMDAR, A.S. Applications for fluidized bed drying. In: **Handbook of fluidization and fluid-particle systems**. Editor: Wen Ching Yang. New York: Marcel Dekker Inc., 2003. p.469-570.

DONIDA, M. W.; ROCHA, S. C. S. Coating of urea with an aqueous polymeric solution in a two-dimensional spouted bed. **Drying Technology**, v.20, n.3, p. 685-704, 2002.

DONIDA, M. W. **Recobrimento polimérico de uréia em leito de jorro bidimensional**. Campinas, 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas.

EPSTEIN, N; GRACE, J.R. Spouting of particles systems. In: **Handbook of power science and technology**. Editor: M.E. Fayed and L. Otten. New York: Springer-Verlag (second edition), 1997. p. 532-567.

FERREIRA, J.A.; ANDRADE, T. C.; MANCINI, M.C.; SCHEID, C. M. Obtenção de concentrado de feijão em pó em leito de jorro bidimensional. **Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra**, v.22, n.1, p.105-112, 2002.

FUNAHASHI, H.; YOSHIDA, T.; TAGUCHI, H. Effect of glucose concentration on xanthan gum production by *Xanthomonas campestris*. **Journal Fermentation Technology**, v.65, p.603-606, 1987.

GARCIA-OCHOA, F.; SANTOS, V.E.; CASA, A.; GÓMEZ, E. Xanthan gum: production, recovery and properties. *Biotechnology Advances*, v.18, p.549-579, 2000.

GRBAVCIC, Z. B.; ARSENIJEVIC, Z. L.J.; GARIC-GRULOVIC, R. V. Drying of suspension and pastes in fluidized bed of inert particles. *Journal of the Serbian Chemical Society*, v.65, n.12, p.963-974, 2000.

GUISELEY, K.B.; STANLEY, N.F.; WHITEHOUSE, P.A. Carrageenan. In: *Handbook of water-soluble gums*, R.L. Davidson (Ed.). New York, McGraw-Hill Book Co., 1980. p.5-30.

GUPTA, C.K.; SATHIYAMOORTHY, D. *Fluid bed technology in materials processing*. New York: CRS Press, 1999. 498 p.

HILL, T; LEWICKI, P. *Statistics: methods and applications*. New York: StatSoft, 2005. 800p.

IMESON, A. Carrageenan. In: *Handbook of Hydrocolloids*. Editor: G. O. Phillips and P. A. Williams. New York: CRC Press, 2000. p.87-102.

KALWAR, M.I.; RAGHAVAN, G.S.V.; MUJUMDAR, A.S. Spouting of two dimensional beds with draft plates. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, v.70, p.887–894,1992.

KALWAR, M.I.; RAGHAVAN, G.S.V.; MUJUMDAR,A.S.; FANOUS, M.A. Aerodynamics of grains in a large scale two dimensional spouted bed draft plates. In: *Drying'89*. Editor: Arun S. Mujumdar and Michel Roques. New York: Hemisphere. 1990. p.433-439.

KALWAR, M.I.; RAGHAVAN, G.S.V. Batch drying of shelled corn in two-dimensional spouted beds with draft plates. *Drying Technology*, v.11, n.2, p.339-354, 1993.

KANG, K.S.; PETTIT, D.J. Xanthan, Gellan, Welan and Rhamsan. In: *Industrial gums: Polysaccharides and their derivatives*. Editor: Roy L. Whistler and James N. BeMiller. New York: Elsevier Science & Technology Books (Third Edition), 1993. p.341-397.

KATZBAWER, B. Properties and applications of xanthan gum. *Polymer Degradation and Stability*, v.59, p.81-84,1998.

KEEY, R.B. *Drying of loose and particulate materials*. New York: Hemisphere publishing corporation, 1992. 504p.

KHOURYIEH, H.A.; HERALD, T.J.; ARAMOUNI, F.; BEAN, S.; ALAVI, S. Influence of deacetylation on the rheological properties of xanthan-guar interactions in dilute aqueous solutions. **Food Chemistry and Toxicology**, p.173-181, 2007.

KUDRA, T.; MUJUMDAR, A.S.; RAGHAVAN, G.S.V.; KALWAR, M.I. Two-dimensional spouted beds for thermal processing of particulates. **Powder Technology & Processing**, v.2, n.4, p.347-353,1990.

KUDRA, T.; MUJUMDAR, A.S.; RAGHAVAN, G.S.V. Gas-to-particle heat transfer in two dimensional spouted bed. **International Communication in Heat and Mass Transfer**, v.16, p.731-741, 1989.

KUNNI, D.; LEVENSPIEL, Octave. **Fluidization engineering**. London: Butterworth-Heinemann (Second edition), 2003. 491p.

KUTSAKOVA, V.E. Drying of liquid and pasty products in a modified spouted bed of inert particles. **Drying Technology**, v. 22, n.10, p.2343-2350, 2004.

LAI, V.M.F.; LII, C.Y.; HUNG, W.L.; LU, T.J. Kinetic compensation in depolymerisation of food polysaccharides. **Food Chemistry**, v.68, n.3, p.319-325, 2000.

LANGENDORFF, V.; CUVELIER, G.; MICHON, C.; LAUNAY, B.; PARKER, A.; De KRUIF, C.G. Effects of carrageenan type on the behaviour of carrageenan/milk mixtures. **Food Hydrocolloids**, v.14, p.273–280, 2000

LAPASIN, R.; PRICL, S. **Rheology of industrial polysaccharides: Theory and applications**. Maryland: Aspen publishers, 1999. 620p.

LAW, C. L.; MUJUMDAR, A. S. Fluidized Bed Dryers. In: **Handbook of Industrial drying (Third edition)**. Editor: Arun S. Mujumdar. New York: CRS Press, 2006. 1312p.

LEFEBVRE, J.; DOUBLIER, J.L. Rheological behavior of polysaccharides aqueous systems. In: **Polysaccharides: Structural, diversity and functional versatility (Second edition)**. Editor: Seve Rian Dumitriu, New York: Marcel Dekker, 2005. p. 357-394.

LII, C.Y.; CHEN, C.H.; YEH, A.I.; LAI, V.M.F. Preliminary study on the degradation kinetics of agarose and carrageenans by ultrasound. **Food Hydrocolloids**, v.13, n.6, p.477-481, 1999.

LIU, G.Q.; LI, S.Q.; ZHAO, X. L.; YAO. Q. Experimental studies of particle flow dynamics in a two-dimensional spouted bed. **Chemical Engineering Science**, v. 63, p.1131–1141, 2008.

LIZARRAGA, M.S.; PIANTE VICIN, D.D.; GONZÁLEZ, R.; RUBIOLO, A.; SANTIAGO, L.G. Rheological behaviour of whey protein concentrate and  $\lambda$ -carrageenan aqueous mixtures. *Food Hydrocolloids*, v. 20, n.5, p.740-748, 2006.

MADHIYANON, T.; SOPONRONNARIT, S.; TIA, W. Continuous drying of paddy in two-dimensional spouted bed. *Kasetsart J. (Nat. Sci.)*, v. 34, p.308 – 314, 2000.

MAIALLE, K. G.; CUNHA, R; MENEGALLI, F. C. Drying of suspensions in a spout-fluidized bed: study of critical conditions of operations. In: Drying' 2002 Proceedings of the 13th International Drying Symposium (IDS' 2002) Beijing, China, p. 555-562, 2002.

MAIALLE, K. G. **Construção de um secador de jorro fluidizado bidimensional e análise da sua fluidodinâmica**. Campinas, 1996. Tese (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.

MARCOTTE, M.; TAHERIAN HOSHAHILI, A. R.; RAMASWAMY, H.S. Rheological properties of selected hydrocolloids function of concentration and temperature. *Food Research International*, v. 34, p.695–703, 2001.

MARRETO, R.N.; FREIRE, J.T.; FREITAS, L.A.P. Drying of pharmaceuticals: The applicability of spouted bed. *Drying Technology*, v.24, p.327-338, 2006.

MAZZONE, D.M.; TARDOS,G.I.; PFEFFER, R. The behavior of liquid bridges between two relatively moving particles. *Powder Technology*, v.51,p.71-83,1987.

MEDEIROS, M.F.D.; ROCHA, S.C.S.; ALSINA, O.L.S.; JERONIMO, C.E.M; MEDEIROS, U.K.L.; da MATA, A.L.M.L. Drying of pulps in spouted bed: Effect of composition on dryer performance. *Drying Technology*, v.20, p.855-88, 2002.

MEDEIROS, M. F. D. **Influencia da composição química dos materiais no desempenho do processo de secagem de polpas de frutas em leito de jorro**. Campinas, 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas.

MISAKI, A. Structural aspects of some functional polysaccharides. In: NISHINARI, K.; DOI, E. **Food hydrocolloids: structures, properties, and functions**. New York: Plenum Press, 1993. p.1-19.

MOHSENIN, N.N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Routledge, 1987. 891p.

MOREIRA, A. S.; VENDRUSCOLO, C. T.; BADIALI, E. F.; PADILHA, F. F. Açúcares componentes de biopolímeros sintetizados por *Xanthomonas campestris* pv *pruni* e *Beijerinckia* sp. In: CONGRESSO DE PÓSGRADUAÇÃO EM

CIÊNCIAS AGRÁRIAS DA UFPEL, 1., 1997, Pelotas. Anais. Pelotas: UFPEL, 1997.

MORRIS, E. R. Rheology of hydrocolloids. In: PHILLIPS, G.O.; WEDLOCK, D.J.; WILLIAMS, P.A. **Gums and stabilizers for the food industry**. Oxford: Pergamon Press, 1984. p.57-78.

MORRIS, V.J. Bacterial polysaccharides. In: **Food polysaccharides and their applications**. Editor: Alistair M. Stephen; Glyn O. Phillips and Peter A. Williams. New York: CRC Press (Second edition), 2006. p.413-454.

MORSE, D.C. Viscoelasticity of concentrated isotropic solutions of semiflexible polymers. 2. Linear response. **Macromolecules**, v.31, p.7044–7067,1998.

MUJUMDAR, A.S. Principles, classification and selection of dryers. In: **Handbook of Industrial drying (Third edition)**. Editor: Arun S. Mujumdar. New York: CRS Press, 2006. 1312p.

NISHINARI, K. Polysaccharide rheology and in-mouth perception. In: **Food polysaccharides and their applications**. Editor: Alistair M. Stephen; Glyn O. Phillips and Peter A. Williams. New York: CRC Press (Second edition), 2006. p.541-588.

NUSSINOVITCH, A. **Hydrocolloid applications**. New York: Chapman & Hall, 1997. 380p.

OCHOA MARTINEZ, L.A.; BRENNAN, J.G.; KIRANJAN, K. Drying of liquids in a spouted bed of inert particles: Heat transfer studies. **Journal of Food Engineering**, v. 20, p.135-148, 1993.

OLIVEIRA, W.P.; FREIRE, J.T.; COURRY, J.R. Analysis of particle coating by spouted bed process. **International Journal of Pharmaceutics**, v.158, p.1-9, 1997.

OLIVEIRA, I.M.; PASSOS, M.L. Simulation of drying suspensions in a conical spouted bed. **Drying technology**, v.15, n.2, p.593-604,1997.

PAGLIARUSSI, R, S.; BASTOS, J. K.; FREITAS, L.A.P. Fluid Bed drying of guarana (*Paullinia cupana* HBK) extract: Effect of process factors on caffeine content. **AAPS PharmSciTech.**, v.7, n.2, 2006.

PALLAI, E.; SZENTMARJAY, T.; MUJUMDAR A. S. Spouted bed drying. In: **Handbook of Industrial drying (Third edition)**. Editor: Arun S. Mujumdar. New York: CRS Press, 2006. 1312p.

PARADOSSI, G.; CHIESSI, E.; BARBIROLI, A.; FESSAS, D. Xanthan and glucomannan mixtures: synergistic interactions and gelation. *Biomacromolecules*, v.3, p.498-504, 2002.

PASSOS, M.L. *Flow characteristics of two-dimensional spouted bed and spout fluidized beds particles*. Montreal, Canada. Ph.D Thesis. Mc Gill University. 1991.

PASSOS, M.L.; MASSARANI, G.; FREIRE, J.T.; MUJUMDAR, A.S. Drying of pastes in spouted bed of inert particles: Design criteria and modeling. *Drying Technology*, v.15, n.2, p.605-624, 1997.

PASSOS, M.L.; MUJUMDAR, A.S.; RAGHAVAN, G.S.V. Prediction of maximum spoutable bed height in two-dimensional spouted beds. *Powder Technology*, v. 74, n. 2, p.97-105, 1993.

PASSOS, M.L.; MUJUMDAR, A.S. Effect of cohesive forces on fluidized and spouted beds of wet particles. *Powder Technology*, v.110, p.222-238, 2000.

PAULO FILHO, M.; ROCHA, S.C.S.; LISBOA, A.C.L. Modeling and experimental analysis of polydispersed particles coating in spouted bed. *Chemical Engineering and Processing*, v.45, p.965–972, 2006.

PELLETIER, E.; VIEBKE, C.; MEADOWS, J.; WILLIAMS, P. A. A rheological study of the order-disorder conformational transition of xanthan gum. *Biopolymers*, v.59, p.339-346, 2001.

PICULELL, L. Gelling carrageenan. In: *Food polysaccharides and their applications*. Editor: Alistair M. Stephen; Glyn O. Phillips and Peter A. Williams. New York: CRC Press (Second edition), 2006. p.239-287.

PRACHAYAWARAKORN, S.; RUENGNARONG, S.; SOPONRONNARIT, S. Characteristics of heat transfer in two-dimensional spouted bed. *Journal of Food Engineering*, v. 76, p. 327–333, 2006.

QUEIROZ FILHO, A.V. *Análise do recobrimento de comprimidos em leito de jorro bidimensional para três posições atomização de suspensão*. Campinas, 1997. Tese (Mestrado em Engenharia Química). Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas.

RAGHAVAN, G.S.V.; KALWAR, M.I.; MUJUMDAR, A.S. Static vertical pressure of grains on air inlet of two dimensional non-aerated spouted beds. *Powder Handling Processing*, v.10, n.1, p.21-25, 1998.

RAMSDEN, L. Plant and Algal gums and mucilages. In: *Chemical and functional properties of food saccharides*. Editor: Piotr Tomasik. New York: CRC Press, 2004. p.231-254.

RAMASWAMY, H.; MARCOTTE, M. **Food processing: Principles and applications**. New York: CRC Press, 2006. 405p.

RÉ, M. I.; FREIRE, J. T. Drying of pastelike materials in spouted beds. In: **Drying '89**. Editor: Arun S. Mujumdar and Michel Roques. New York: Hemisphere, 1990. p.426-432.

ROCHA, S.C.S.; TARANTO, O.P.; AYUB, G.E. Aerodynamics and heat transfer during coating of tablets in two-dimensional spouted bed. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v.73, n.3, p.308-312, 1995.

ROCHFERT, W. E.; MIDDLEMAN, S. Rheology of xanthan gum: salt, temperature, and strain effects in oscillatory and steady shear experiments. **Journal of Rheology**, v.31, n.4, p.337-369, 1987.

RODD, A.B.; DAVIS, C.R.; DUNSTAN, D.E.; FORREST, B.A.; BOGER, D.V.. Rheological characterisation of 'weak gel' carrageenan stabilised milks. **Food Hydrocolloids**, v.14, p.445-454, 2000.

RUSS, J. C. **Image analysis of food microstructure**. New York: CRC Press, 2004, 384p.

SEVILLE, J.P.K.; WILLETT, C.D.; KMIGHT, P.C. Interparticle forces in fluidization: a review. **Powder Technology**, v. 113, p.261-268, 2000.

SCHNEIDER, T.; BRIDGWATER, J. Drying of solutions and suspensions in spouted beds. In: **Drying '89**. Editor: Arun S. Mujumdar and Michel Roques. New York: Hemisphere, 1990. p.421-425.

SCHNEIDER, T.; BRIDGWATER, J. The stability of wet spouted beds. **Drying Technology**, v.11, n.2, p.277-301,1993.

SHIRVANIAN, P.A.; CALO, J.M. Hydrodynamic scaling of a rectangular spouted vessel with a draft duct. **Chemical Engineering Journal**, v.103, p.29-34, 2004.

SHUHAMA, I.K.; AGUIAR, M.L.; OLIVEIRA, W.P.; FREITAS, L.A.P. Experimental production of annatto powders in spouted bed dryer. **Journal of Food Engineering**, v.59, p.93-97, 2003.

SOLDI, V. Stability and degradation of polysaccharides. In: **polysaccharides: structural diversity and functional versatility**. Editor: Severian Dumitriu, New York: Marcel Dekker, 2005. p.395-409.

SONG, K.W.; KIM, Y.S.; CHANG, G.S. Rheology of concentrated xanthan gum solutions: Steady shear flow behavior. **Fibers and Polymers**, v.7, n.2, p.129-138, 2006.

SOUZA, A. S. **Produção e Caracterização dos Biopolímeros Sintetizados por Xanthomonas campestris pv pruni cepas 24 e 58**. 1999. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial), Departamento de Ciência e Tecnologia Agroindustrial, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 1999.

SPAGNUOLO, P.A.; DALGLEISH, D.G.; GOFF, H.D.; MORRIS, E.R. Kappa-carrageenan interactions in systems containing casein micelles and polysaccharide stabilizers. **Food Hydrocolloids**, v. 19, n. 3, p.371-377, 2005.

SPEERS, R.A.; TUNG, M.A. Concentration and temperature dependence of flow behavior of xanthan gum dispersions. **Journal of Food Science**, v.51, n.1, p.96-98, 1986.

STEFFE. J. F. **Rheological methods in food process engineering (Second edition)**. East Lansing: Freeman Press, 1996. 418p.

STEPHEN, A. M.; CHURMS, S. C. Introduction to polysaccharides. In: **Food polysaccharides and their applications**. Editor: Alistair M. Stephen; Glyn O. Phillips and Peter A. Williams. New York: CRC Press (Second edition), 2006. p.1-24.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: Principles, applications and design**. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986. 448p.

SWASDISEVI, T.; TANTHAPANICHAKOON, W.; CHARINPANITKUL, T.; KAWAGUCHI, T.; TANAKA, T.; TSUJI, Y. Prediction of gas-particle dynamics and heat transfer in a two-dimensional spouted bed. **Advanced Powder Technology**, v.16, n.3, p.275-293, 2005.

SWORN, G. Xanthan gum. **Handbook of hydrocolloids**. Editor: G. O. Phillips and P. A. Williams. New York: CRC Press, 2000. p.103-115.

SZENTMARJAY, T., Drying on inert particles in mechanically spouted bed. **Drying Technology**, v.13, n.4, p.1023-1026, 1995.

TAKO, M.; NAKAMURA, S. Rheological properties of deacetylated xanthan in aqueous media. **Agricultural Biological Chemical**, v.48, p.2987-93, 1984.

TARANTO, O.P.; OCHA, S.C.S.; RAGHAVAN, G.S.V. Convective heat transfer during coating of particles in two dimensional spouted bed. **Drying Technology**, v. 15, p.1909-1918, 1997.

TARANTO, O. P. **Estudo experimental da dinâmica em um leito de jorro bi-dimensional aplicação em recobrimento de comprimidos**. Campinas, 1992. Tese (Mestrado em Engenharia Química). Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas.

TIA, S.; TANGSATITKULCHAI, C.; DUMRONGLAOHAPUN, P. Continuous drying of slurry in a jet spouted bed. *Drying Technology*, v.13, p.1825-1840, 1995.

TORRES, L. G.; BRITO, E.; GALINDO, E.; CHOPIN, L. Viscous behaviour of xanthan aqueous solutions from a variant of *Xanthomonas campestris*. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, v.75, p.58- 64, 1993.

TRINDADE, A.L.G.; PASSOS, M.L.; COSTA JR, E.F.; BISCAIA JR,E.C. The effect of interparticle cohesive forces on the simulation of fluid flow in spout-fluid beds. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v.21, n.1, p.113-125, 2004.

TULASIDAS, T.N.; KUDRA, T.; RAGHAVAN, G.S.V. Effects of bed height on simultaneous heat and mass transfer in a two-dimensional spouted bed dryer. *International Communication in Heat and Mass Transfer*, v.20, p.79-88, 1993.

TYE, R.J. Properties and rheology of konjac and carrageenan systems. *Polymeric Materials Science and Engineering, Proceedings of the ACS Division of Polymeric Materials Science and Engineering*, v. 63, p. 229-232, 1990.

URUAKPA, F.O.; ARNTFIELD, S.D. Rheological characteristics of commercial canola protein isolate–k-carrageenan systems. *Food Hydrocolloids*, v.18, p.419–427, 2004.

VAN AKEN, George A. Polysaccharides in food emulsions. In: *Food polysaccharides and their applications*. Editor: Alistair M. Stephen; Glyn O. Phillips and Peter A. Williams. New York: CRC Press (Second edition), 2006. p.521-539.

VARDHANABHUTI, B.; FOEGEDING, E. Allen. Rheological properties and characterization of polymerized whey protein isolates. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 47, n.9, p.3649-3655, 1999.

VELDE, I. F.; RUITER, G. A. Carrageenan. In: *Biopolymers: General aspects and special applications (Biopolymers, Vol. 10)*. Editor: Alexander Steinbüchel. New York: Wiley-VCH, 2003. p.245-250.

VERGELATI, C.; PEREZ, S. Molecular modelling of the xanthan chain conformations. *International Journal of Biological Macromolecules*, v.9, p.211-218, 1987.

VIEIRA, M.G.A.; DONIDA, M.W.; ROCHA, S.C.S. Adhesion of an aqueous polymeric suspension to inert particles in a spouted bed. *Drying Technology*, v.22, n.5, p.1069-1085, 2004.

VUKOVIC, DV.; HADZISMAJLOVIC, DZ.E.; GRBAVIIC,Z.B.; GARIC,R.V.; LITTMAN,H. Flow regimes for spout-fluid beds. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v.62, p.825-829, 1984.

WANG, Q,; CUI, S. W. Understanding the physical properties of food polysaccharides. In: **Food carbohydrates: chemistry, physical properties and applications**. Editor: Steve E. Cui. New York: Taylor&Francis, 2005. p.161-217.

WHISTLER, R. L. Introduction to industrial gums. In: **Industrial gums: Polysaccharides and their derivatives**. Editor: Roy L. Whistler and James N. BeMiller. New York: Elsevier Science & Technology Books, 1993. p.1-20.

WILLIAMS, P.A.; PHILLIPS, G.O. Introduction to food hydrocolloids. In: **Handbook of hydrocolloids**. Editor: G. O. Phillips and P. A. Williams. New York: CRC Press, 2000. p.1-19.

YANG, W. C. Particle characterization and dynamics In: **Handbook of fluidization and fluid-particle systems**. Editor: Wen Ching Yang. New York: Marcel Dekker Inc., 2003. p.469-570.

YASEEN, E.I.; HERALD, T.J.; ARAMOUNI, F.M.; ALAVI, S. Rheological properties of selected gum solutions. **Food Research International**, v. 38, p.111–119, 2005.

ZANOELO, E. F.; ROCHA, S.C.S; REZENDE, D.F. Influence of operating parameters on the average spout width in two dimensional spouted bed. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v.82, p.90-963, 2004.

ZANOELO, E. F. **Modelagem e simulação hidrodinâmica de um leito de jorro bidimensional**. Campinas, 1994. Tese (Mestrado em Engenharia Química). Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas.

ZHONG, W.; ZHANG, M.; JIN, B; CHEN, X. Flow pattern and transition of rectangular spout–fluid bed. **Chemical Engineering and Processing**, v.45, p.734–746, 2006.

ZHONG, W; CHEN, X.; ZHANG, M. Hydrodynamic characteristics of spout-fluid bed: Pressure drop and minimum spouting/spout-fluidizing velocity. **Chemical Engineering Journal**, v.118, p.37–46, 2006.

ZHONG, W.; ZANG, M. Jet penetration depth in a two-dimensional spout–fluid bed. **Chemical Engineering Science**, v. 60, p.315 – 327, 2005

ZHONGHUA, W.; MUJUMDAR, A.S. CFD modeling of the gas–particle flow behavior in spouted beds. **Powder Technology** , v.183, p. 260–272, 2008.