



**AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO**

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE
ATOMIZAÇÃO NA INDÚSTRIA DE REVESTIMENTO
CERÂMICO**

RENATA CRISTINA FAVALLI

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Doutor em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Materiais.**

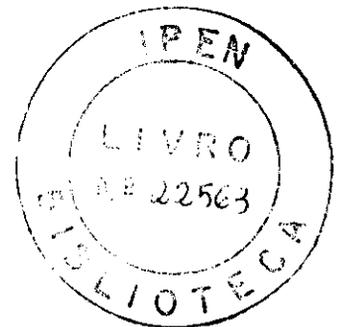
**Orientador:
Dr. José Octavio Armani Paschoal
Co-Orientador:
Marcos de Mattos Pimenta.**

**São Paulo
2002**

IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

Modelagem e simulação do processo
de atomização na indústria de revestimento cerâmico

Renata Cristina Favalli



Tese apresentada ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Doutor em Ciências, na área de Tecnologia Nuclear - Materiais.

Banca examinadora:

José Octavio Armani Paschoal (orientador), IPEN
Marcos de Mattos Pimenta (co-orientador), EPUSP-PME
Álvaro Vannucci, IFUSP
Cláudio Roberto de Freitas Pacheco, EPUSP-PQI
José Maurício Pinto, EPUSP-PQI

São Paulo
Junho de 2002

Aos meus pais, Rubens e Marina, e
meus irmãos, Marco e Alexandre, por
estarmos sempre juntos.

Ao Paulo, pelos incontáveis momentos
de felicidade...

Para ser grande, sê inteiro: nada
Teu exagera ou exclui.
Sê todo em cada coisa. Põe quanto és
No mínimo que fazes.
Assim em cada lago a lua toda
Brilha, porque alta vive.

Fernando Pessoa
(Ricardo Reis)

Agradecimentos

As primeiras pessoas a quem quero agradecer são meus pais e meus irmãos; sem a presença forte e alegre de vocês teria sido muito mais difícil chegar aqui. Mas, mãe, se prepara que, agora que vou ter meus finais de semana livres, vou pedir todos os meus pratos favoritos! E nessa lista da família, entram também meus tios, primos e meu vôzinho.

Bom, se não fosse por eles, esse trabalho não se completaria: Paschoal e Pimenta, mais que orientadores, vocês são pessoas maravilhosas que me mostraram o caráter e a sinceridade que quero ter e levar comigo para onde eu for. Foi um ensinamento pra vida inteira.

Outra pessoa que vou levar como exemplo de boa vontade e de dedicação é o Professor Pacheco. Suas sugestões enriqueceram o trabalho de forma ímpar. Obrigada pela aula sobre umidade do ar e pela inestimável ajuda no laboratório.

Apesar do Paulo estar bem longe, lá do outro lado do Atlântico, esteve sempre bem pertinho, sempre presente em tudo o que eu fazia por aqui. Claro que a conta do telefone quando chega quase me mata de susto... mas, olha, valeu cada centavinho!

Quero agradecer a Cristiane, Dolores, Fredner, Walter Ussui, Walter Kenji, Joana e Chieco, do Laboratório de Insumos, pela disposição que sempre tiveram em me ajudar em tudo que precisei por lá, de avental a preparação das suspensões. Muito obrigada! Ana Paula e Maria Teresa, obrigada pelas horas de descontração, pela ajuda com burocracias e com as análises, pelos papos e tudo mais. Te, acho que devemos patentear nosso método originalíssimo de correspondência!

Agradeço ao Eng. Machado, que gentilmente cedeu amostras da massa cerâmica industrial para realização de análises e nos recebeu nas visitas à indústria.

Em todas as análises que precisei fazer para o trabalho, contei com a ajuda de excelentes profissionais: Renê, do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura, Douglas, do Laboratório de Processos Cerâmicos da Escola Politécnica, Luci, do Laboratório de Análises Térmicas do CTR, Ricardo Gomide, Adriana e Tomas, do Laboratório de Materiais Nucleares do CTMSP e Ivana, do Centro de Processamento de Pós.

Mesmo sem estar mais por lá, pude contar com total apoio de professores e funcionários do Instituto de Física. Obrigada Galvão, Iberê, Wanderley, Eleonora, Lia e todos do Departamento de Física Aplicada.

Aqui no IPEN, devo muito a Mariliana, Luis Massi, Fernando, Joca, Cida, Zé Leite, Sueli, Dayse, Eng. Odair e a todos que tornaram minha vida muito mais fácil. Obrigada! Ao Fernando, Ana, Verinha, Bete e Ilze: obrigada por terem sido sempre solícitos ao esclarecerem minhas muitas dúvidas sobre documentos, relatórios, prazos, etc.

A Carla, por todos esses divertidos anos que moramos juntas, saímos juntas, aprontamos juntas, sempre juntas, e que nos tornaram assim, quase irmãs! A Flavia, que foi especial e indispensável: além da leitura da tese, ela me levou a vários forrós e sambas, todos de graça! A Bete, pela companhia, pelos ensinamentos de *shiatsu* e moxibustão, e também por sua torcida e interesse nesse trabalho. Valeu! A Laura e a Conceição, por todo carinho que sempre tiveram por mim. Ao Roberto, a quem carinhosamente chamo por Beto, pelo programa e pelas incansáveis horas de discussão na frente do computador. E ainda conseguíamos arrumar tempo pra dançar! Ao Eduardo, Roberto Baginski, Suelene, Ana e Ivan, pelo apoio e carinho. Têm três menininhas a quem quero agradecer por me deixarem de muito bom humor quando as encontro (e também muita cansada de tanto brincar!): Catarina, Julia e Luisa, minhas sobrinhas queridas! Pela carinhosa acolhida, gostaria de agradecer à minha mais recente família: D. Lourdes e S. Edson, Cristina (agora sou sua cunhada mesmo!) e Lopez, Zé e Helena, Regina e Marcelo. Aos meus *senseis* de *Aikido* Reishin Kawai, Sandra, Tsuneo, Nagao e Yuri, que sempre estiveram dispostos a me explicar mais um detalhezinho técnico, além, claro, do grande carinho que sempre demonstraram por mim! Aos amigos de treino e de exames de faixa (e de festas também!) Igor, Olga, Fábio Kimura e Flávia Carvalhaes.

A todos que participaram, de forma direta ou indireta, desse trabalho, e que por falta de memória disponível (não a RAM, mas a minha mesmo!) eu deixei de citar seus nomes aqui, quero dizer que meu sorriso a você sempre será uma forma muito especial de agradecimento.

Agradeço ao CNPq e à FAPESP pelo suporte financeiro que possibilitou a realização deste trabalho.

Conteúdo

Agradecimentos	i
Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	xv
Nomenclatura	xvii
Resumo	xxi
Abstract	xxiii
1 Introdução	1
1.1 Indústria de revestimento cerâmico no Brasil	1
1.2 Processos de fabricação do revestimento cerâmico	2
1.3 Motivação para o desenvolvimento do trabalho	3
1.4 Objetivos do trabalho e contribuições à ciência e à tecnologia	4
2 Secagem	5
2.1 Métodos de secagem	5
2.2 Secagem por atomização	6
2.2.1 Atomização da suspensão	8
2.2.2 Evaporação da água	10
2.2.3 Separação dos grânulos do gás de exaustão	11
2.3 Cinética de secagem	11
3 Modelagem matemática	17
3.1 Modelos para o sistema de secagem	17
3.2 Equações governantes	18
3.2.1 Fase gasosa	18
3.2.2 Fase dispersa no primeiro período de secagem	20
3.2.3 Fase dispersa no segundo período de secagem	21
3.2.4 Acoplamento entre as fases	21
3.3 Domínio computacional	23

3.4	Condições iniciais e de contorno	23
4	Experimentos e análises	25
4.1	Materiais e métodos	28
4.1.1	Medidas de vazão com um tubo de Pitot	29
4.1.2	Suspensão de Al_2O_3	30
4.1.3	Medidas da temperatura de bulbo úmido e seco	31
4.1.4	Ensaaios	32
4.2	Análises	34
4.2.1	Microscopia eletrônica de varredura	34
4.2.2	Porosimetria de mercúrio	39
4.2.3	Análise termogravimétrica	41
4.2.4	Determinação do tamanho de grânulos e de partículas	43
5	Água e suspensão de alumina	47
5.1	Evaporação de gotas de água	47
5.1.1	Perfis do gás de secagem	48
5.1.2	Variação da trajetória com a posição e o ângulo de injeção	50
5.2	Secagem da suspensão de alumina	54
5.2.1	Perfis do gás de secagem	56
5.2.2	Variação da trajetória com a posição e o ângulo de injeção	57
6	Secador Büchi	61
6.1	Domínio computacional, condições iniciais e de contorno	62
6.2	Consistência dos resultados numéricos	64
6.2.1	Gás de secagem antes da injeção	68
6.2.2	Gotas de suspensão e grânulos de alumina	71
6.2.3	Gás de secagem depois da injeção	72
6.3	Estudo paramétrico	80
6.3.1	Vazão do gás de secagem	80
6.3.2	Temperatura na entrada da câmara	90
6.3.3	Taxa de alimentação da suspensão de alumina	96
6.4	Outros resultados	104
6.4.1	Diâmetro inicial das gotas	104
6.4.2	Velocidade de injeção das gotas	119
7	Conclusões	125
A	Método numérico	129
A.1	Metodologia matemática	129
A.2	Procedimento numérico	130
B	Dados técnicos do Büchi	137

C	Medidas de vazão	139
D	Medidas de temperatura de bulbo úmido e seco	141
E	Ensaio experimentais	143
E.1	Grupo I - Alumina A16	143
E.2	Grupo II - Alumina tabular	145

•

•

•

•

•

•

6.62	Ensaio <i>ED1</i> - cinco classes de diâmetros entre 10 e 70 μm . Linhas de fluxo do gás depois da injeção de (a) 3 e (b) 5 classes de diâmetros iniciais de gotas. Linha mais interna (próxima ao eixo de simetria) de 0,5 g/s, aumentando em intervalos de 1 g/s.	109
6.63	Trajетórias das gotas de diâmetros iniciais de 10, 15, 20 e 25 μm	110
6.64	Umidade das gotas de diâmetros iniciais de 10, 15, 20 e 25 μm	110
6.65	Distribuição da umidade do gás depois da injeção para 4 classes de diâmetros pequenos.	111
6.66	Ensaio <i>ED2</i> - quatro classes de diâmetros de 10 a 25 μm . Isotermas do gás depois da injeção de (a) 3 e (b) 4 classes de diâmetros iniciais de gotas. Linha mais interna de 450 K (177 °C), diminuindo em intervalos de 10 K.	112
6.67	Ensaio <i>ED2</i> - quatro classes de diâmetros de 10 a 25 μm . Linhas de velocidade constante depois da injeção de (a) 3 e (b) 4 classes de diâmetros iniciais de gotas. Linha central de 22 m/s, variando em intervalos de 2 m/s.	113
6.68	Ensaio <i>ED2</i> - quatro classes de diâmetros de 10 a 25 μm . Linhas de fluxo do gás depois da injeção de (a) 3 e (b) 4 classes de diâmetros iniciais de gotas. Linha mais interna (próxima ao eixo de simetria) de 0,5 g/s, aumentando em intervalos de 1 g/s.	114
6.69	Trajетórias das gotas de diâmetros iniciais de 50, 70, 90 e 100 μm	115
6.70	Umidade das gotas de diâmetros iniciais de 50, 70, 90 e 100 μm	115
6.71	Distribuição da umidade do gás depois da injeção para 4 classes de diâmetros grandes.	116
6.72	Ensaio <i>ED3</i> - quatro classes de diâmetros de 50 a 100 μm . Isotermas do gás depois da injeção de (a) 3 e (b) 4 classes de diâmetros iniciais de gotas. Linha mais interna de 450 K (177 °C), diminuindo em intervalos de 10 K.	117
6.73	Ensaio <i>ED3</i> - quatro classes de diâmetros de 50 a 100 μm . Linhas de fluxo do gás depois da injeção de (a) 3 e (b) 4 classes de diâmetros iniciais de gotas. Linha mais interna (próxima ao eixo de simetria) de 0,5 g/s, aumentando em intervalos de 1 g/s.	118
6.74	Trajетórias das gotas de diâmetros iniciais de 50 μm injetadas com 52 e 120 m/s.	119
6.75	Umidade das gotas de diâmetros iniciais de 50 μm injetadas com 52 e 120 m/s.	119
6.76	Distribuição da umidade do gás depois da secagem quando a velocidade de injeção das gotas é 120 m/s.	120
6.77	Isotermas do gás para velocidades iniciais das gotas de (a) 52 e (b) 120 m/s. Linha mais interna de 450 K (177 °C), diminuindo em intervalos de 10 K.	121
6.78	Linhas de velocidade constante para velocidades iniciais das gotas de (a) 52 e (b) 120 m/s. Linha central de 22 m/s, variando em intervalos de 2 m/s.	122
6.79	Linhas de fluxo do gás para velocidades iniciais das gotas de (a) 52 e (b) 120 m/s. Linha mais interna (próxima ao eixo de simetria) de 0,5 g/s, aumentando em intervalos de 1 g/s.	123

A.1	Malha e volume de controle para um domínio de cálculo qualquer.	130
A.2	Volume de controle para um problema bidimensional.	131
A.3	Malha computacional deslocada para cálculo do fluxo de fluidos.	133
A.4	Volume de controle para u (esquerda) e v (direita) das equações do momento.	134
C.1	Esquema do aparato experimental utilizado para medições da pressão dinâmica do secador Büchi.	139
D.1	Esquema do aparato experimental utilizado para as medições das temperaturas de bulbo úmido e seco.	141

Lista de Tabelas

1.1	Classificação mundial dos produtores de cerâmica para revestimento. . . .	2
4.1	Valores de umidade residual determinados por análises termogravimétricas da massa cerâmica industrial, da alumina do grupo I de ensaios e do porcelanato.	43
4.2	Distribuição granulométrica das partículas e dos grânulos do material produzido no IPEN e na indústria.	46
6.1	Parâmetros ensaiados e comparação entre a taxa de água evaporada calculada e medida. Parte I: ensaios de 1 a 3.	64
6.2	Parâmetros ensaiados e comparação entre a taxa de água evaporada calculada e medida. Parte II: ensaios de 4 a 6.	65
6.3	Dados da fase dispersa na mudança do primeiro para o segundo período de secagem.	72
6.4	Dados da fase dispersa ao final do processo de secagem.	72
6.5	Parâmetros de operação do Ensaio de Referência <i>ER</i>	80
6.6	Valores da vazão e da velocidade inicial do ar.	81
6.7	Dados da fase dispersa na troca do primeiro para o segundo período de secagem nos ensaios <i>ER</i> , <i>EV1</i> e <i>EV2</i>	82
6.8	Dados da fase dispersa ao final do processo de secagem para os ensaios <i>ER</i> , <i>EV1</i> e <i>EV2</i>	83
6.9	Valores da temperatura do ar na entrada da câmara.	90
6.10	Dados da fase dispersa na troca do primeiro para o segundo período de secagem nos ensaios <i>ER</i> , <i>ET1</i> e <i>ET2</i>	91
6.11	Dados da fase dispersa ao final do processo de secagem para os ensaios <i>ER</i> , <i>ET1</i> e <i>ET2</i>	92
6.12	Valores da taxa de alimentação.	96
6.13	Dados da fase dispersa na troca do primeiro para o segundo período de secagem nos ensaios <i>ER</i> , <i>EA1</i> e <i>EA2</i>	97
6.14	Dados da fase dispersa ao final do processo de secagem para os ensaios <i>ER</i> , <i>EA1</i> e <i>EA2</i>	98
6.15	Distribuição de diâmetros iniciais e da porcentagem do total de massa injetada no sistema para cada classe de gotas.	104

6.16	Dados da fase dispersa na troca do primeiro para o segundo período de secagem no ensaio <i>ED1</i>	105
6.17	Dados da fase dispersa ao final do processo de secagem para o ensaio <i>ED1</i>	106
6.18	Dados da fase dispersa na troca do primeiro para o segundo período de secagem no ensaio <i>ED2</i>	110
6.19	Dados da fase dispersa ao final do processo de secagem para o ensaio <i>ED2</i>	111
6.20	Dados da fase dispersa na troca do primeiro para o segundo período de secagem no ensaio <i>ED3</i>	115
6.21	Dados da fase dispersa ao final do processo de secagem para o ensaio <i>ED3</i>	116
B.1	Dados técnicos do mini-secador Büchi.	137
C.1	Valores da pressão, velocidade e vazão do secador Büchi determinados através das medições de pressão dinâmica.	140
D.1	Valores das temperaturas de bulbo úmido e seco medidas, da umidade absoluta e da taxa de água evaporada calculadas para os ensaios <i>E1</i> a <i>E13</i> do grupo II.	142
E.1	Parâmetros de operação dos ensaios do grupo I: <i>E1</i> a <i>E5</i>	143
E.2	Parâmetros de operação dos ensaios do grupo I: <i>E6</i> a <i>E10</i>	144
E.3	Parâmetros de operação dos ensaios do grupo I: <i>E11</i> a <i>E15</i>	144
E.4	Parâmetros de operação dos ensaios do grupo I: <i>E16</i> a <i>E20</i>	144
E.5	Parâmetros de operação dos ensaios do grupo II: <i>E1</i> a <i>E5</i>	145
E.6	Parâmetros de operação dos ensaios do grupo II: <i>E6</i> a <i>E10</i>	145
E.7	Parâmetros de operação dos ensaios do grupo II: <i>E11</i> a <i>E15</i>	145

Nomenclatura

a	raio do tubo [m]
A_p	área da seção transversal da gota [m ²]
C_D	coeficiente de arraste viscoso
c_d	fração-peso de sólidos na partícula
c_g	fração-peso de sólidos no grânulo
C_p	calor específico do gás à pressão constante [J/KgK]
c_{pp}	calor específico da partícula à pressão constante [J/kgK]
d	diâmetro do tubo [m]
D	coeficiente de difusão do vapor no gás [m ² /s]
d_{cm}	diâmetro da entrada do ar de secagem na câmara [m]
d_{final}	diâmetro final do grânulo [m]
d_n	fração de partículas que entram com diâmetro d_p [m]
d_p	diâmetro da gota [m]
d_{p0}	diâmetro inicial da gota [m]
\vec{F}_v	força total aplicada nas gotas [N]
\vec{g}	força gravitacional [N]
h	entalpia do gás [J/kg]
h_p	entalpia da gota [J/kg]
k	condutividade térmica do gás [W/mK]
L	calor latente de vaporização [J/kg]
m_{H_2O}	massa de água na gota [kg]
m_{in}	massa de água quando a gota entra no volume de controle [kg]
m_{out}	massa de água quando a gota sai do volume de controle [kg]
m_{sol}	massa de sólido seco na gota [kg]
\dot{m}	quantidade de suspensão injetada por unidade de tempo [kg/s]
Nu	número de Nusselt
p	pressão do gás [Pa]
Pr	número de Prandtl
P_d	pressão dinâmica do gás de secagem [Pa]

P_v	pressão parcial do vapor [Pa]
Q	vazão turbulenta do gás de secagem [m ³ /s]
r	coordenada radial [m]
Re	número de Reynolds
S^h	termo de acoplamento entre as fases para a equação da energia [J/m ³ s]
S^m	termo de acoplamento entre as fases para a equação da continuidade e da conservação de vapor [kg/m ³ s]
S_r^{mom}	termo de acoplamento entre as fases para a equação do movimento radial [kg/m ² s ²]
S_z^{mom}	termo de acoplamento entre as fases para a equação do movimento axial [kg/m ² s ²]
Sc	número de Schmidt
Sh	número de Sherwood
t	tempo [s]
T	temperatura do gás [K]
T_p	temperatura da gota [K]
u	componente axial da velocidade do gás [m/s]
\bar{u}	velocidade do gás [m/s]
\bar{u}	velocidade axial média no tempo [m/s]
\bar{u}_{atz}	velocidade do gás de atomização [m/s]
u_{av}	velocidade média do gás [m/s]
u_p	componente axial da velocidade da gota [m/s]
\bar{u}_{p0}	velocidade inicial da gota [m/s]
u_r	velocidade de referência
U_R	velocidade relativa entre o gás e a gota [m/s]
ϑ	fração-massa de vapor no gás
ϑ_s	fração-massa de vapor na superfície da partícula
v	componente radial da velocidade do gás [m/s]
v_p	componente radial da velocidade da gota [m/s]
VOL	dimensão do volume de controle [m ³]
W_p	quantidade de água na partícula [kg água/kg sólido seco]
X_l	distribuição dos locais de injeção
y	distância da parede do tubo [m]
Y_n	distribuição de diâmetros das gotas
z	coordenada axial [m]

Símbolos gregos

α	coeficiente de transferência de calor [J/m ² K s]
β	coeficiente de transferência de massa de vapor [kg/m ² s]
$\eta_{i,n}$	freqüência com que as partículas de fração X_l e Y_n passam por um volume de controle [1/s]

μ	viscosidade do gás [kg/m s]
ρ	densidade do gás [kg/m ³]
ρ_g	densidade do grânulo [kg/m ³]
ρ_p	densidade da gota [kg/m ³]
ρ_s	densidade da alumina [kg/m ³]
ρ_w	densidade da água [kg/m ³]
ν	viscosidade cinemática do gás de secagem [m ² /s]
τ_w	tensão de cisalhamento na parede do tubo [kg/ms ²]
Υ	taxa de secagem no segundo período [kg/m ² s]



Resumo

Modelagem e simulação do processo de atomização na indústria de revestimento cerâmico

Renata Cristina Favalli

O processo de secagem de soluções ou suspensões por atomização é, atualmente, empregado por diversos segmentos industriais, dentre os quais destacam-se os da indústria química, farmacêutica, alimentícia e cerâmica. Na indústria de revestimento cerâmico, a secagem por atomização atua na remoção da água adicionada no processo de moagem das argilas, elevando acentuadamente os custos energéticos. No entanto, esse processo de produção, conhecido como via úmida, é preferido ao via seca pela maioria das empresas pois a qualidade do produto final é melhor.

As simulações de secadores eram feitas de forma integral, de modo que a influência de vários parâmetros era difícil de ser avaliada. Atualmente, devido ao rápido e incessante aumento da capacidade de processamento dos computadores, tornou-se possível a utilização de modelos matemáticos refinados para a simulação de secadores desse tipo. Isto possibilita a previsão dos perfis de temperatura e velocidade do ar de secagem e do histórico de temperatura e massa do material processado, além da análise da influência de cada parâmetro na qualidade do produto seco. A simulação deste processo pode ser, então, uma poderosa ferramenta na otimização do sistema de secagem, sendo tempo computacional seu único custo.

O objetivo principal deste trabalho é auxiliar a otimização do processo de secagem na indústria de revestimento cerâmico, utilizando-se, para tanto, de ferramentas matemáticas. Entretanto, os modelos matemáticos envolvidos podem ser facilmente adaptados a vários outros processos de escoamento bifásico, como por exemplo, ao de deposição de materiais sobre superfícies por jateamento ou à introdução de combustíveis dos sistemas de injeção eletrônica dos automóveis atuais. Para simular a secagem de suspensões cerâmicas, foram estabelecidos, portanto, modelos físicos e matemáticos para se estudar a interação entre as fases gasosa e dispersa numa câmara de secagem. Resolvendo-se numericamente as equações constitutivas do problema, torna-se possível estudar a influência que o ar tem nos perfis da suspensão de alumina atomizada, e vice-versa; ar e suspensão de alumina são materiais representativos, pois qualquer material, em ambas as fases, pode ser simulado desde que suas propriedades térmicas e de transporte sejam conhecidas.

Ensaio experimentais num mini secador existente no laboratório de Insumos do IPEN-Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, foram realizados, nos quais se variou a temperatura inicial e a vazão do gás de secagem, taxa de alimentação do material a ser atomizado e a configuração do atomizador, entre outros parâmetros. Numa parte desses ensaios, foram feitas medições da temperatura de bulbo úmido e seco pois, através dessas temperaturas e de cartas psicrométricas, pode-se determinar a umidade do ar de secagem. A pressão dinâmica do escoamento do ar de secagem foi também inferida para que se pudesse determinar a vazão de gás. Amostras do material utilizado para fabricação do suporte cerâmico na indústria de revestimento e dos materiais produzidos no IPEN foram submetidas às análises de: *i*) microscopia eletrônica de varredura, para determinar a morfologia do material atomizado e estimar a faixa de tamanho dos grânulos; *ii*) porosimetria de mercúrio, na qual a porosidade e a densidade volumétrica dos grânulos é obtida; *iii*) termogravimetria, para determinação da umidade residual dos materiais estudados e *iv*) granulometria, a fim de se estabelecer a distribuição de tamanho dos grânulos e das partículas que os constituem. Com os experimentos e as análises, obtêm-se informações sobre o processo e sobre o material que possibilitam a verificação da consistência dos modelos e do programa.

Os primeiros resultados obtidos com as simulações foram para a evaporação de gotículas de água dentro de uma câmara com fluxo de ar quente. Em seguida, a água é substituída pela suspensão de alumina e os perfis de velocidade, temperatura e umidade do ar de secagem e o histórico de temperatura e de massa das gotas de suspensão são determinados. Nessas condições, simularam-se diversas situações para a posição e ângulo de injeção das gotas no secador, demonstrando-se, desse modo, a versatilidade do código computacional. Por fim, o equipamento utilizado nos ensaios experimentais foi simulado para verificar a consistência do modelo empregado para o sistema de secagem de suspensões cerâmicas por atomização. Depois dos ajustes necessários, simularam-se alguns experimentos realizados no Büchi. A diferença entre os valores da taxa de água evaporada calculada no programa e da taxa de água evaporada obtida com as medidas de temperatura de bulbo úmido e seco é de 10%, aproximadamente. Esse resultado confirma a consistência do código computacional e do modelo matemático. Um estudo da influência dos parâmetros de operação nos perfis de temperatura, velocidade e umidade do gás de secagem e no histórico de temperatura e de massa do material atomizado foi conduzido. Os parâmetros simulados foram: *i*) vazão do ar de secagem; *ii*) temperatura inicial do ar de secagem; *iii*) taxa de alimentação da suspensão; *iv*) número e tamanho inicial diferentes para as gotas e *v*) velocidade de injeção das gotas. Comparações entre os resultados do estudo paramétrico e os experimentos também confirmam a consistência do modelo.

Abstract

Modeling and simulation of the atomization process in the ceramic tile industry

Renata Cristina Favalli

The spray drying technique is largely employed in industries of chemical, food, pharmaceutical and ceramic stuffs. Specifically in the tile industry, this process is used to evaporate the water added to aid the grinding of the raw material and to homogenise the additives. The main advantage of adopting such a process is the powder flowability, since the obtained granules keep the spherical shape of atomized droplets; the quality of final product is directly affected by the sphericity of the granules as long as transportation and compactation are improved. However, the optimization of the system is generally empirical and experimental tests demand a certain amount of money. The simulation of the system through mathematical and physical modeling can be used as a powerful tool to improve the process as long as the influence of many parameters on both continuous and disperse phases are studied.

The earlier simulations were made in an integral form and the influence of different parameters on gas flow and atomized droplets history were difficult to be studied. Nowadays, refined mathematical models can be employed in the simulation of such systems due to the fast development of computer processing and storing capacities; it allows not only the prediction of gas velocity, temperature profiles and droplets behaviour but also the influence of several parameters on the properties of dried material. So, a computer modeling and simulation can be a tool to improve and optimize the drying process of any kind of slurry, with computer time being its sole cost.

In spite of it, the aim of the present work is to numerically simulate the behaviour of the drying system for several sets of operating conditions in order to improve and optimize this process. However, the mathematical modeling adopted here can be employed to simulate other systems such as the processes that occur in liquid-fueled engines with direct spray injection and ceramic spraying for hard surfacing. Then, mathematical and physical models were established to simulate the interaction of continuous and disperse phases in drying processes of ceramic slurries. Solving the set of governing coupled partial differential equations, it is possible to study the influence of drying air on the atomized droplets of alumina slurry, and vice-versa. The materials used as continuous and disperse

phase, air and alumina slurry respectively, are representative since any kind of gas and slurry can be used if its thermodynamic and transport properties are known.

Several experimental tests were carried out in a spray dryer in the "Laboratório de Insumos", at "IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares" for different sets of operating conditions: initial temperature of the drying air, the gas flow rate, the slurry feed rate and atomiser configuration among others. Measurements of the wet and the dry bulb temperatures were made in some experimental tests to allow the calculations of the air humidity. The dynamic pressure were also measured in order to determine the gas flow rate. Some samples of the material used in the tile industry and of the one produced at IPEN were analysed to determine: *i*) the morphology of the atomized material and the range of granules diameter through scanning electron microscopy; *ii*) the amount of pores and the bulk density through porosimetry; *iii*) the residual moisture of the material through thermogravimetry and *iv*) the granulometric distribution of granules and particles through laser diffraction. Important information about the process and the final material are given by the experimental test and analyses allowing the consistency of computer code and models to be verified.

The first numerical tests were carried out for the evaporation of water droplets in a flow of hot air. After that, the water is changed to alumina slurry and the air velocity, temperature and humidity, as well as the droplets mass and temperature history, are obtained. For such condition, several sets of injection angle and type of flow of the droplets were simulated; it shows the versatility of the programme. At last, some experimental tests carried in the laboratory dryer were simulated to verify the model and computer code consistency; the difference between the rate of water vapor calculated by the programme and the one obtained through the measurements of wet and dry bulb temperatures is 10%, approximately, confirming the consistency of both the computer code and mathematical model. The influence of many operating parameters on continuous and disperse phases were studied. The parameters varied were: *i*) gas flow rate; *ii*) initial temperature of the drying media; *iii*) slurry feed rate; *iv*) different amount and sizes for the droplets and *v*) initial velocity of droplets. The results of the parametric study were compared to the experimental ones and also confirm the model consistency.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Indústria de revestimento cerâmico no Brasil

A indústria cerâmica de revestimento no Brasil tem sua origem nas antigas fábricas de tijolos, telhas e lajotas de cerâmica vermelha, as quais no início do século passado começaram a produzir ladrilhos hidráulicos, azulejos, pastilhas cerâmicas e de vidros. Por volta de 1965, os métodos de produção eram empíricos e a administração, familiar. A partir dessa data, a indústria de revestimento cresce em função do aumento na demanda desses produtos devido à criação do SFH e do BNH (respectivamente, Sistema Financeiro da Habitação e Banco Nacional da Habitação) [1, 2], ampliando-se e estabilizando-se nas duas décadas posteriores, com um aumento significativo no número de novas empresas.

Inserida no complexo industrial de materiais para construção, que representa 2% do PIB brasileiro, a indústria de revestimento cresceu à taxa média de 8,7% ao ano entre 1988 e 1998, produzindo, nesse último ano, 400 milhões de metros quadrados de pisos e azulejos, e gerando vinte mil empregos diretos e cento e quarenta mil indiretos [1].

Atualmente, há no país cento e vinte empresas instaladas, sendo que mais de 90% localizam-se nas regiões sul e sudeste; o maior consumo do produto no mercado nacional é também nessas regiões, com 75% do total produzido, seguidas pela região nordeste, com consumo de 12% do total.

O Brasil é o quarto maior produtor mundial de revestimentos cerâmicos, atrás somente da China, da Itália e da Espanha, como mostra a tabela 1.1 [2]. Do total da produção brasileira, mais de 90% é consumido no mercado interno, fato que caracteriza o Brasil como um dos maiores consumidores de revestimento cerâmico, enquanto que a Itália e a Espanha possuem um mercado interno relativo de 29 e 43%, respectivamente. A exportação do produto brasileiro cresceu 27% em maio de 1999 em relação ao mesmo período do ano anterior; há, também, aumento da participação de empresas nacionais no mercado externo. Porém, a quantidade exportada, 9%, é pequena se comparada ao total exportado pela Itália, 71% e Espanha, 57%, líderes no mercado internacional. Os principais consumidores da cerâmica de revestimento brasileira são o Mercosul, a América do Norte e a América Latina.

Tabela 1.1: Classificação mundial dos produtores de cerâmica para revestimento.

<i>País</i>	<i>Produção de 1997</i> (milhões de m ²)
China	900
Itália	572
Espanha	485
Brasil	383
Turquia	148
Indonésia	135

1.2 Processos de fabricação do revestimento cerâmico

Há, nesse segmento industrial, dois métodos de produção estabelecidos, ilustrados na figura 1.1, que diferem no processamento e na qualidade do produto final: via úmida e via seca.

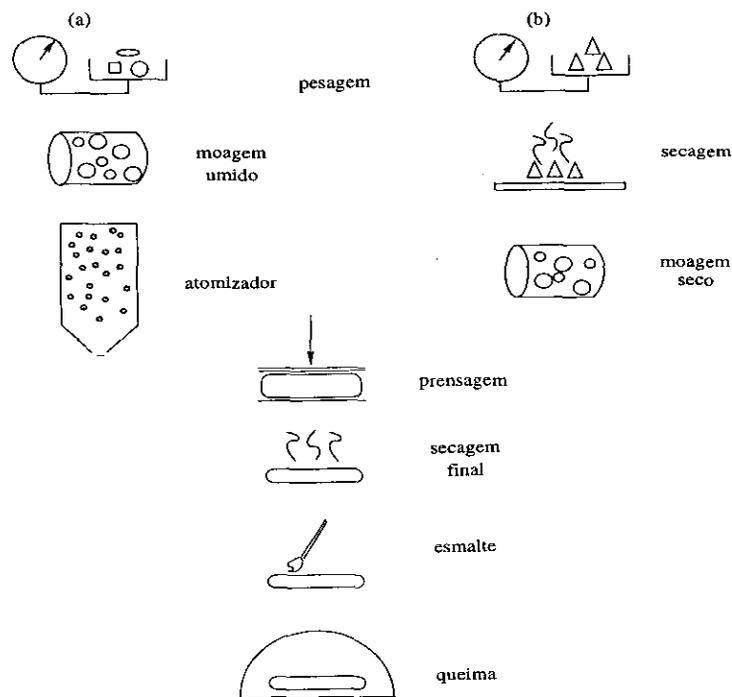


Figura 1.1: Métodos de preparação do revestimento cerâmico: (a) via úmida e (b) via seca.

No processamento de via úmida, as matérias-primas (argilas, minerais fundentes, talcos e carbonatos), após a pesagem, são misturadas, moídas e homogêneas em moinhos de

bolas em meio aquoso. A suspensão produzida é submetida à secagem por atomização; os secadores utilizados no processo de secagem são, em geral, de fluxo misto. Por fim, o material é conformado, seco, esmaltado, decorado e submetido à queima em fornos a uma temperatura de aproximadamente 1160 °C.

Na via seca, as matérias-primas são, normalmente, argilas vermelhas que, após terem sido pesadas e secas, são moídas sem adição de água. O restante das etapas do processo são idênticas às de via úmida.

Ambos os processos visam produtos ótimos com relação à resistência mecânica, ataques químicos, manchas, absorção à umidade, abrasão superficial, beleza estética, choque térmico, tonalidade e dimensões.

Grande parte das empresas (50%) preferem a via úmida à seca em suas linhas de produção, pois as características da massa cerâmica, como por exemplo homogeneidade e fluidez, são beneficiadas. Porém, a principal desvantagem da via úmida são os elevados custos energéticos que, por sua vez, são devidos ao processo de atomização para a retirada da água acrescida na moagem. A via seca oferece um processamento com menores custos energéticos, de manutenção e menor impacto ambiental, entretanto, não permite que matérias-primas diferentes sejam processadas simultaneamente, não forma uma mistura homogênea e apresenta menor fluidez e problemas na prensagem.

1.3 Motivação para o desenvolvimento do trabalho

Apesar da indústria de revestimento cerâmico ocupar privilegiada posição no mercado nacional e internacional, ela ainda enfrenta vários problemas de origem estrutural que comprometem sua competitividade. Devido ao aumento na demanda de produtos para revestimento a partir de 1960, como descrito na seção 1.1, houve um considerável aumento nos investimentos do setor, pois este procurava tecnologias que correspondessem às necessidades da produção em maior escala. Nesse período, sem encontrar no mercado interno caminhos que permitissem o desenvolvimento de uma tecnologia nacional, as empresas de revestimento cerâmico buscaram soluções nos centros mais desenvolvidos do setor, ou seja, na Itália e na Espanha, adquirindo tanto tecnologias como equipamentos, processos e produtos [1, 2]. Logo, a interação desse setor com a comunidade científica foi nula, inibindo a capacitação e inovação tecnológica nacional para que se aumentasse a competitividade do produto brasileiro no mercado mundial.

Através do Projeto Plataforma para a Indústria de Revestimento Cerâmico [1], que reuniu conhecimentos de indústrias, universidades e centros de pesquisa a fim de encontrar soluções para os problemas enfrentados por esse setor industrial, iniciou-se um processo de reavaliação e reestruturação de toda a cadeia de produção do material, desde a lavra até o assentamento. O presente trabalho veio somar-se aos esforços do Projeto Plataforma com o estudo do sistema de atomização via modelagem física e matemática, auxiliando na otimização do processo de produção via úmida dos revestimentos cerâmicos e, em consequência, no aprimoramento da qualidade do produto final.

1.4 Objetivos do trabalho e contribuições à ciência e à tecnologia

O objetivo deste trabalho é o de simular numericamente, através de modelos físicos e matemáticos, o processo de secagem por atomização utilizado nas indústrias de revestimento cerâmico cuja produção é por via úmida. Os perfis de temperatura, velocidade e umidade do gás de secagem dentro do secador, que afetam diretamente o processo, são calculados primeiro. A seguir, a suspensão é injetada na câmara e a influência que o gás exerce sobre as gotas atomizadas pode ser analisada através de suas trajetórias, perfis de temperatura e tempo de residência, entre outras variáveis. Após a injeção, os perfis do gás são recalculados a fim de se determinar as alterações causadas pelas trocas de calor e de massa entre as fases.

Através de ensaios experimentais e de análises dos materiais produzidos, pode-se ajustar, alimentar e verificar a consistência do modelo empregado nas simulações; variando-se as condições de operação do secador, tais como temperatura do gás de secagem na entrada da câmara e taxa de alimentação da suspensão, de forma experimental e numérica, é possível avaliar de forma qualitativa as respostas do programa a essas variações. As medidas de temperatura e de umidade do ar na saída do sistema podem ser comparadas às quantidades calculadas.

Como contribuição deste trabalho à ciência e à tecnologia tem-se o estabelecimento de modelos físicos e matemáticos para simulação da secagem de suspensões de matérias-primas cerâmicas quaisquer. Entretanto, os modelos matemáticos envolvidos não se limitam a essa aplicação e podem ser facilmente adaptados a vários outros processos de escoamento bifásico, como, por exemplo, ao de deposição de materiais sobre superfícies por jateamento ou à introdução de combustíveis em sistemas de injeção eletrônica dos automóveis atuais. Importante ressaltar, também como contribuição, que esses modelos auxiliam, qualitativamente, no processo de otimização do processo de secagem por atomização utilizado nas indústrias de revestimento cerâmico, diminuindo o custo energético desse sistema e melhorando a qualidade do produto final.

Capítulo 2

Secagem

O homem, desde os tempos mais remotos, se utiliza do vento e do sol para secar materiais de uso próprio. Ao longo do tempo, métodos de secagem forçada surgiram, sendo o vento canalizado através do empilhamento dos bens e o calor do sol, substituído pelo do fogo [3]. Porém, até o início do século XIX, a secagem era feita de modo não industrial, em empresas familiares nas quais as crianças e os idosos eram os responsáveis por seu bom andamento. Ao longo do século XX, com o aumento na escala de produção, a tecnologia de secagem se desenvolveu.

Os primeiros princípios sobre a teoria de secagem surgiram por volta de 1898 e tinham como base os trabalhos de Péclet sobre transferência de calor. Tais trabalhos foram aprimorados por Hausbrand em 1901, que estabeleceu regras para o projeto de secadores a partir de cálculos da temperatura e da umidade do ar na saída da câmara de secagem. Em 1908, Grasvenor estuda a reciclagem do ar de exaustão e elabora métodos gráficos para cálculo da umidade do ar em função da temperatura. Mueller elabora diagramas, e posteriormente Mollier os aprimora, da umidade e da temperatura do ar de secagem [4].

Entretanto, até o início da década de 80, as teorias de secagens existentes pouco auxiliavam na otimização do processo; a experiência do engenheiro e testes em plantas pilotos definiam o projeto do sistema, embora as preocupações com a poluição do meio ambiente e a melhora na eficiência térmica para a redução dos custos energéticos, entre outros fatores, começavam a fazer parte das exigências das indústrias de secagem.

Somente em meados da década de 90 é que teorias de secagem mais sofisticadas começaram a ser empregadas no desenvolvimento de secadores; isso se deve, principalmente, à rápida e incessante evolução da capacidade computacional de processamento e de armazenamento, uma vez que tais modelos não possuem solução analítica [5, 6, 7, 8].

2.1 Métodos de secagem

Secagem pode ser definida como o processo de retirada de substâncias voláteis por troca de calor de uma mistura que deixe um produto sólido. Os métodos de secagem podem ser subdivididos em [3]:

- ◇ modos de operação: contínuo, para taxas de produção maiores que 50000 kg/dia, ou em lotes, para taxas menores que 5000 kg/dia;
- ◇ métodos de aquecimento: convectivo, condutivo, por irradiação e dielétrico.

No método convectivo, o calor é transferido de um gás para o material por convecção; este gás aquecido flui pelo corpo, ou através deste, evaporando a água contida no sólido e transportando-a para fora da câmara de secagem. O gás mais comumente utilizado é o ar, porém outros meios, tais como gases inertes e vapor super aquecido, podem ser utilizados quando conveniente ou necessário. Na secagem por condução, a transferência de calor se dá pelo contato do material úmido com uma superfície aquecida (esteiras, pratos, cilindros ou as paredes do secador). A quantidade de calor transferida depende não somente da condutividade térmica da superfície aquecida mas também do coeficiente de transferência de calor para essa superfície que, em geral, é aquecida por vapor, líquidos orgânicos ou outros meios que permitam altos coeficientes de transferência de calor. Como todo o calor utilizado para a evaporação passa através do material, a secagem por contato tem maior eficiência que a convectiva [9]. O método por irradiação utiliza energia térmica proveniente da radiação eletromagnética na faixa infra-vermelha. Esse tipo de secagem é geralmente aplicada a superfícies finas (filmes finos, tais como folhas de papel) uma vez que a penetração da radiação infra-vermelha é pequena; lâmpadas de quartzo de alta temperatura podem ser utilizadas como fontes de infra-vermelho. Nota-se que, na secagem por radiação, o transporte de água dentro do material e a difusão do vapor para fora do sólido são regidas pelas mesmas leis da secagem convectiva e por contato. No método dielétrico, a energia térmica é dissipada dentro de um material úmido (condutores ou isolantes pobres) que são colocados num campo eletromagnético de alta frequência, na região de radiofrequência ou de microondas. Devido a variações do campo, líquidos dielétricos ou polares mudam sua orientação, causando aquecimento das moléculas por atrito. Como a constante dielétrica da água é, em geral, maior que a do material que deve ser seco, o aquecimento é produzido nas partes úmidas. Na secagem dielétrica, além do transporte convencional, a água também é transportada por um gradiente de pressão resultante da evaporação dentro do corpo.

2.2 Secagem por atomização

Um dos métodos modernos de secagem convectiva de líquidos é a atomização, sendo adotada por vários segmentos industriais, dentre os quais destacam-se os da indústria química, alimentícia, farmacêutica e cerâmica [4, 9, 10, 11, 12]. A água, ou qualquer outro líquido, presente no material é evaporada e as gotas atomizadas são transformadas em grânulos ou aglomerados secos, que são coletados parte dentro da própria câmara de secagem, no caso dos grânulos maiores e mais pesados, e parte em ciclones ou em equipamentos de limpeza de gases, no caso de grânulos mais leves. Na figura 2.1 tem-se um esquema dos equipamentos que constituem o sistema de secagem por atomização. A

evaporação acontece num tempo bastante curto devido à grande área superficial das gotas formadas no processo de atomização [5, 13].

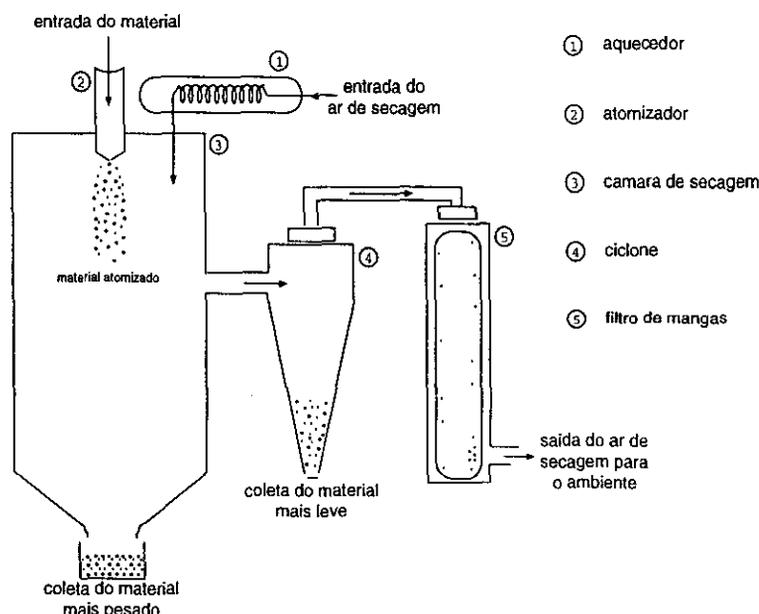


Figura 2.1: Esquema dos equipamentos que constituem o sistema de secagem por atomização.

Algumas vantagens da secagem por atomização são: *i*) a qualidade do produto seco é garantida, pois a temperatura do material durante parte do processo não excede a de bulbo úmido, mesmo com a temperatura do gás de secagem a algumas centenas de graus Celsius a mais. Os parâmetros do produto, tais como tamanho do grânulo, densidade volumétrica, umidade final e temperatura, podem ser controlados; *ii*) os grânulos formados não necessitam de moagem e desfazem-se com facilidade, facilitando o processo de prensagem*; *iii*) a quantidade inicial de água pode ser elevada e a final, suficientemente baixa; *iv*) materiais agulhados e amorfos podem ser processados; *v*) a vida útil da câmara de secagem é longa pois não há contato entre o material úmido e suas paredes; *vi*) baixo custo de manutenção; *vii*) alta taxa de secagem e *viii*) possibilidade de automação. Porém, os custos energéticos e do sistema de atomização são extremamente altos, além das grandes dimensões de instalação exigidas.

A qualidade do produto final e os custos do processo sofrem influências de alguns parâmetros como: variações no sistema de atomização, propriedades da suspensão, velocidade e temperatura do gás. O aumento da energia utilizada na atomização, isto é, da rotação do disco, ou da pressão nos bocais, ou da razão entre a quantidade de ar para a de material, causa a diminuição do tamanho das gotas, em condições constantes de alimentação. Com a potência de atomização constante, o diâmetro da gota depende da

*Nas indústrias de revestimento cerâmico, os grânulos são prensados para formar a base do piso ou azulejo. No entanto, esse processo de prensagem não existe em linhas de produção de indústrias como, por exemplo, a alimentícia ou a química.

quantidade de material injetado no atomizador. Um aumento na taxa de alimentação implica num aumento do diâmetro das gotas e, conseqüentemente, do produto final.

O processo de secagem por atomização é dividido em três estágios: o da atomização propriamente dita, o da evaporação da água contida no material pelo contato com o ar quente e o da separação dos grânulos secos do ar de secagem. Esses estágios são descritos nas seções que seguem.

2.2.1 Atomização da suspensão

O atomizador é o equipamento responsável pela quebra da suspensão injetada em uma nuvem de gotículas, e o aumento na área superficial resultante desse processo é inversamente proporcional ao diâmetro das gotas geradas. Existem quatro projetos básicos diferentes [5, 13, 14, 15, 16]:

1. Rotativo

O líquido é injetado num disco aletado que gira à alta velocidade e devido a forças centrífugas é ejetado do atomizador, formando uma fina camada que rapidamente se quebra em gotas de diversos tamanhos. Nesse caso, a câmara de secagem é radialmente mais larga para evitar que as gotas se acumulem nas paredes, com o atomizador posicionado no centro, como mostra a figura 2.2.

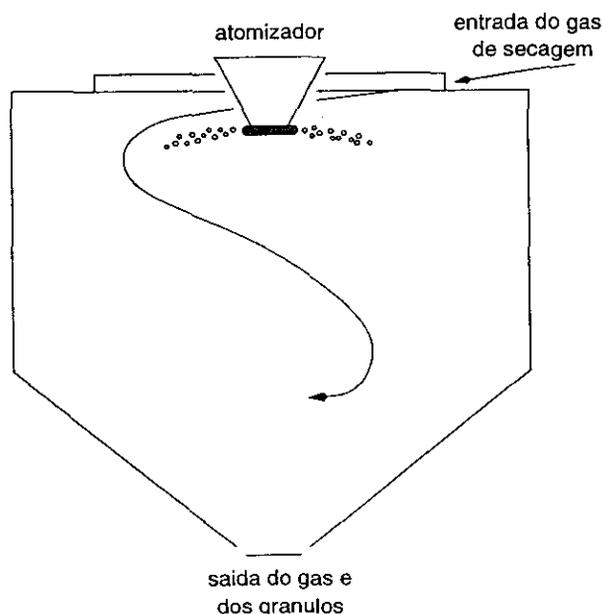


Figura 2.2: Esquema de um secador com atomização por disco rotativo.

O tamanho das gotas diminui com a velocidade de rotação, mas aumenta com a viscosidade do fluido. A velocidade de rotação do disco é o parâmetro que mais influencia o tamanho dos grânulos do produto final. O projeto mais comum desse

tipo de atomizador é o de aletas radiais, pois evita bloqueios causados por materiais mais viscosos. O tamanho das gotículas é controlado de maneira precisa pela velocidade do disco, com a distribuição do tamanho de gotas em torno da média sendo praticamente constante e o tamanho médio variando de 15 a 250 μm , conforme a quantidade de energia que é transferida para o líquido. Em geral, esses secadores operam em uma faixa de 5000 a 25000 rpm, com diâmetros de disco entre 5 e 50 cm [5, 15]. Uma vantagem desse tipo de atomizador é que pode ser encontrado em vários tamanhos, desde unidades para laboratórios (10 kg/h) até unidades industriais (200.000 kg/h).

2. Bocais de pressão

A suspensão é forçada por uma bomba a passar por um orifício; a pressão é convertida em energia cinética e o material sai em forma de filme fino a uma alta velocidade que, posteriormente, se desintegra em gotas. O tamanho das gotas produzidas varia inversamente com a pressão e diretamente com a taxa de alimentação e a viscosidade do material. Para reduzir o tamanho das gotas para uma certa taxa de alimentação, é necessária a substituição do bocal por um de menor orifício. Porém, isso requer que uma pressão maior seja aplicada. Esse tipo de atomizador é usado quando se necessita de partículas grandes. Apesar de serem menos complicados que os atomizadores rotativos, uma bomba de alta pressão é requerida; materiais abrasivos podem causar problemas nos bocais e, devido ao tamanho dos orifícios, pode haver problemas de entupimento [5, 15]. Uma alta capacidade de processamento não é possível de ser atingida se somente um bocal for utilizado, mas essa limitação pode ser superada com uso simultâneo de vários bocais. O tamanho dos orifícios está na faixa de 0,5 a 3 mm . Um único bocal de pressão é limitado à atomização de, aproximadamente, 750 kg/h de material, dependendo da pressão, viscosidade, quantidade de sólidos e tamanho do orifício. O formato da câmara de secagem, opostamente à do atomizador centrífugo, é maior na direção axial e mais estreita na radial, como pode-se notar na figura 2.3 em comparação com a figura 2.2. Tipicamente, os diâmetros das gotas produzidas com bocais de pressão são de 180 a 250 μm .

3. Dois-fluidos

A atomização acontece pela interação do líquido com um segundo fluido, em geral, ar comprimido. Nem o líquido e nem o ar requerem pressões muito elevadas: 200 a 350 kPa são valores típicos. Esse tipo de atomizador é utilizado em pequenos sistemas de secagem. O tamanho das gotas é controlado pela razão entre os fluxos de ar e de líquido. A principal vantagem desse sistema de atomização é que o líquido sai à baixa velocidade e, portanto, o caminho percorrido para secagem dentro da câmara é pequeno, o que é ideal para escalas laboratorial ou piloto [5, 14, 17].

4. Sônica

É um desenvolvimento recente e ainda necessita de aprimoramentos no que se refere à capacidade de processamento e à diversidade de materiais atomizados. A atomização

se dá pela passagem do líquido sobre uma superfície que vibra a frequências ultrasônicas, produzindo gotículas bastante pequenas a baixas taxas de fluxo [5].

2.2.2 Evaporação da água

O contato do ar quente com as gotas atomizadas, e em suspensão, dentro da câmara permite que a água seja evaporada rapidamente, deixando grânulos sólidos com essencialmente o mesmo tamanho e forma das gotas iniciais.

Há três maneiras, ilustradas pelas figuras 2.3, 2.4 e 2.5, de se fazer contato entre os fluxos de gás de secagem e da suspensão atomizada.

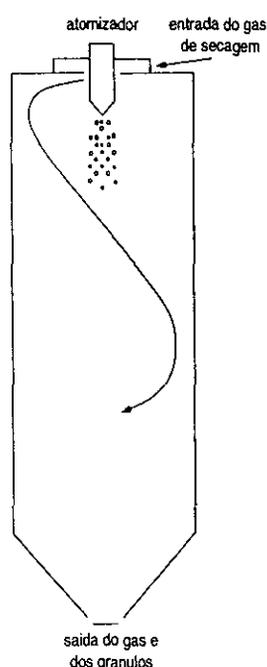


Figura 2.3: Fluxo concorrente.

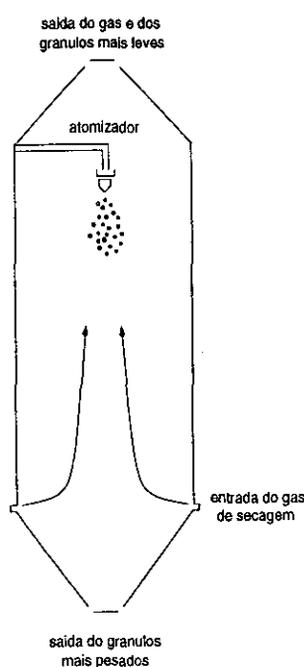


Figura 2.4: Fluxo contracorrente.

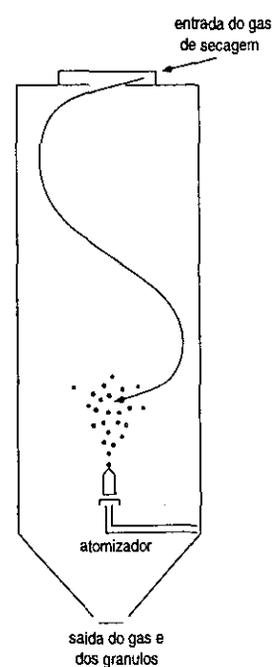


Figura 2.5: Fluxo misto.

A primeira é a injeção em fluxo concorrente, na qual ambos gás e material são introduzidos com a mesma direção e mesmo sentido. Esse modo de injeção é utilizado na secagem de produtos termolábeis, como é o caso de alimentos. A segunda forma é a injeção em fluxo contracorrente, na qual os sentidos de injeção das fases são opostos. Essa forma é utilizada na secagem de materiais não termolábeis ou que necessitem de um certo grau de tratamento térmico para atingir as propriedades exigidas. Finalmente, a terceira maneira é a do fluxo misto, que é uma mistura das duas formas anteriores, pois o gás é injetado no topo da câmara e o material na base, de baixo para cima, retornando após um certo período pela ação da gravidade. É utilizado quando aglomerados de maior granulometria são o objetivo, numa câmara de tamanho e volume limitados, e para materiais que conseguem suportar a exposição a temperaturas mais elevadas por alguns instantes sem que sua qualidade seja afetada.

2.2.3 Separação dos grânulos do gás de exaustão

Após a secagem, os grânulos maiores, e por conseqüência mais pesados, são recolhidos na base do secador pois caem diretamente pela ação da gravidade, enquanto que os menores, e mais leves, são arrastados pelo gás de secagem e coletados em ciclones e/ou filtros. O gás é tratado na saída para que partículas muito finas não sejam lançadas ao ambiente, para então, ser liberado à atmosfera ou recirculado no sistema.

Existem três tipos de sistemas que podem ser adaptados às disposições descritas acima: ciclo aberto, ciclo semi-fechado e ciclo fechado [15]. No ciclo aberto, o mais usado na secagem por atomização nas indústrias, o ar da atmosfera é aquecido e injetado no sistema, sendo devolvido, após o processamento, para o ambiente. O sistema de aquecimento em ciclos abertos pode ser complementado por fontes de calor recicladas para que o consumo de combustível por unidade de água evaporada seja reduzido. A coleta do material seco que é arrastado pelo ar de exaustão é feita em ciclones, filtros e precipitadores eletrostáticos. O meio de secagem é, geralmente, ar e o líquido evaporado, água. O ciclo fechado é usado quando há necessidade de se secar materiais que contêm solventes orgânicos inflamáveis, permitindo completa recuperação do solvente e prevenindo explosões e riscos de fogo, emissão de pó e oxidação do produto seco. Os gases de secagem usados em ciclos fechados são inertes e, em geral, emprega-se nitrogênio. Essas plantas operam à pressões levemente maiores para prevenir a entrada de ar no sistema. No ciclo semi-fechado há reciclagem parcial do gás de exaustão, porém mantém-se sempre a quantidade reciclada vinculada ao vapor d'água permitido no ar de entrada e ao efeito deste conteúdo na temperatura do gás exigida na saída do sistema, para que se atinja a umidade estabelecida para o produto.

2.3 Cinética de secagem

Em geral, os materiais submetidos à secagem são compostos por uma parte sólida e uma certa quantidade de água (ou qualquer outro líquido) [9].

A quantidade de água num material pode ser definida na base seca (kg de água/kg sólido seco) ou na base úmida (kg água/kg sólido úmido). Existem valores característicos da quantidade de água num sólido que podem ser identificados para cada material, como segue:

- ◇ umidade de equilíbrio: é a quantidade mínima de água da qual o material pode ser teoricamente seco, dadas as condições do processo. A água nele contida está em equilíbrio com o vapor presente no gás de secagem;
- ◇ umidade crítica: é a quantidade de água que caracteriza a mudança do período de taxa de secagem constante para o de taxa de secagem decrescente;
- ◇ umidade máxima: é a quantidade de água no sólido quando todos os espaços vazios estão totalmente preenchidos;

- ◇ umidade inicial: é a quantidade presente no início do período de secagem;
- ◇ umidade higroscópica máxima: é a quantidade de água no sólido em equilíbrio com uma atmosfera saturada.

Num sólido, a água pode estar: *i*) na superfície, como um filme externo, *ii*) não ligada, ou capilar, que é toda aquela dentro de um material não higroscópico e *iii*) ligada ou diluída, exercendo uma pressão de vapor menor que a do líquido puro, a dada temperatura.

A cinética de secagem está relacionada com a mudança média da quantidade de água no material e com a temperatura média no tempo; a dinâmica de secagem descreve as mudanças nos perfis de temperatura e umidade através do material [9].

A taxa de secagem[†] em secadores por atomização é fortemente influenciada pelos parâmetros do processo como, por exemplo, temperatura, umidade, velocidade do gás de secagem e, principalmente, pelo diâmetro da gota. Além desses fatores, impurezas presentes no líquido também afetam a taxa de secagem, pois as propriedades físicas e químicas do material são alteradas e a pressão de vapor saturado sobre a superfície líquida diminui, causando um decréscimo na transferência de massa de vapor da superfície do material para o ar.

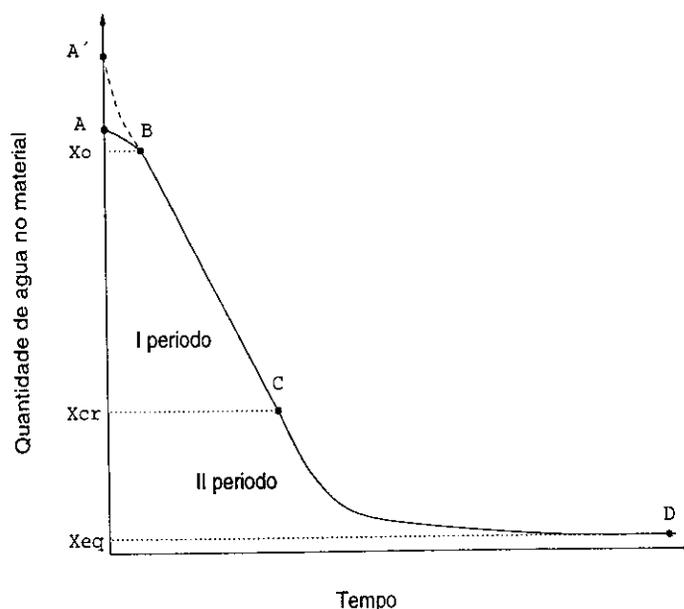


Figura 2.6: Esquema de uma curva típica de secagem.

Em condições externas constantes, ou seja, velocidade, temperatura e umidade do gás constantes, pode-se caracterizar o processo de secagem de um material. Alguns experimentos realizados em tais condições revelaram que a secagem pode ser basicamente dividida em dois períodos [3]:

[†]A taxa de secagem é definida como a mudança da quantidade de água com o tempo.

- ◇ período inicial de secagem, no qual a taxa de evaporação é aproximadamente igual à da superfície livre do líquido;
- ◇ período terminal, no qual a taxa de evaporação diminui no decorrer do processo pois a umidade no sólido encontra-se abaixo da crítica.

Esses conceitos de período de taxa de secagem constante seguido por um ou mais períodos de taxa de secagem decrescente podem ser considerados como parte da teoria clássica da secagem. Um processo de secagem de materiais umedecidos com água em condições externas constantes é bem ilustrado por diagramas qualitativos de três tipos: *i*) curva de secagem, na qual a quantidade de água no material é função do tempo de secagem; *ii*) curva da taxa de secagem, na qual a taxa de secagem é apresentada em função da umidade do material e *iii*) curva de temperatura, com a temperatura do material como função da quantidade de água. Na figura 2.6 é esquematizada uma curva típica de secagem convectiva. X é a quantidade de água no material e os subscritos 0 , cr e eq indicam, respectivamente, a umidade inicial, crítica e de equilíbrio, como descrito no início desta seção. O segmento AB (ou A'B) representa o período inicial de secagem; BC, que ocorre após a relaxação, é linear. C é o ponto crítico e, após esse ponto, a curva se aproxima assintoticamente da umidade de equilíbrio do material, indicado pela letra D na figura. Em geral, necessita-se de mais tempo para secar os últimos 10% que os primeiros 50% do material [9], pois ao atingir o ponto crítico, a taxa de secagem cai rapidamente, como mostra o diagrama da figura 2.7.

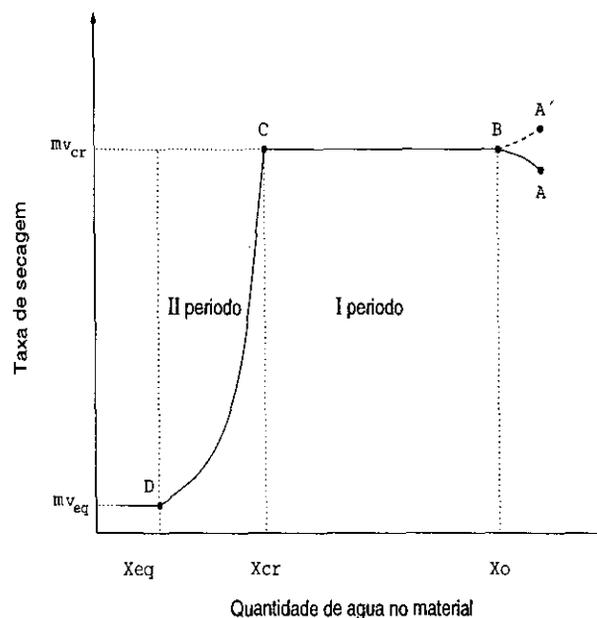


Figura 2.7: Esquema de uma curva típica da taxa de secagem.

No período inicial de secagem, o corpo e a superfície do material estão cobertos com uma fina camada de água não ligada e possuem uma temperatura de bulbo úmido nas

condições anteriores à injeção menor que a de equilíbrio e, portanto, a taxa de secagem no segmento AB irá aumentar até que a temperatura da superfície alcance o valor correspondente ao da linha BC. Quando a temperatura do material úmido é maior que a de equilíbrio, o período inicial é representado por A'B. Em geral, esse período inicial é bastante curto e pode ser desprezado.

Como a evaporação da água exige calor igual ao calor latente de evaporação, a superfície líquida, depois de algum tempo, atinge uma temperatura de equilíbrio. Em secadores por atomização, tal quantidade de calor fornecida pelo ar de secagem para a superfície da gota é o calor necessário para a mudança de fase. Portanto, enquanto a camada de água existir, a umidade do gás na superfície permanece constante e, por conseqüência, a taxa de evaporação na linha BC também se mantém constante, caracterizando o primeiro período de secagem. O valor da taxa de secagem crítica, $m_{v,cr}$, depende do tipo de material.

Para sólidos porosos, a quantidade de água que chega à superfície do material começa a diminuir gradualmente quando $X < X_{cr}$. Em conseqüência, a pressão de vapor e a taxa de secagem diminuem. Em termos gerais, a taxa de secagem no segundo período é controlada pelo transporte de água dentro do material. A forma da curva no período de taxa de secagem decrescente depende, entre outros, do tipo do material (se esse é capilar, poroso ou coloidal). As formas das curvas de secagem no primeiro e no segundo períodos, bem como a relação entre eles, depende das condições de transferência de massa (condições interna, externa e interna-externa). Para materiais higroscópicos, dependendo da umidade inicial, não se observa período constante de secagem, pois não há água não ligada. Esse fato também é verdadeiro para sólidos cuja secagem é internamente controlada.

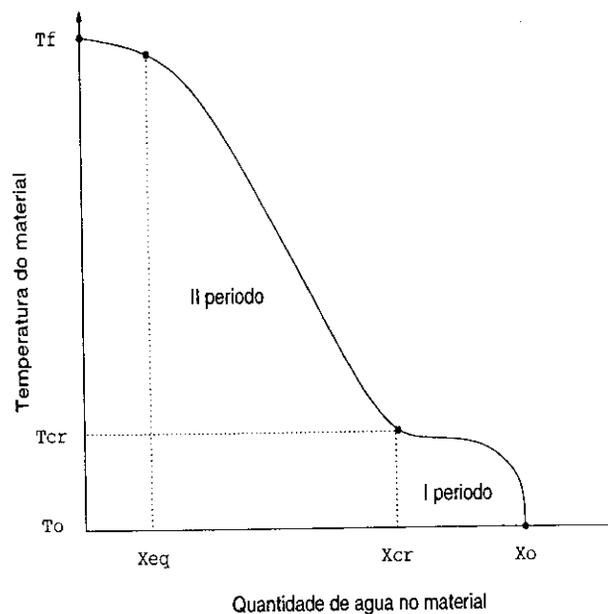


Figura 2.8: Esquema de uma curva típica de temperatura do material ao longo da secagem.

Na figura 2.8 é apresentado um esquema de uma curva típica da temperatura do

material ao longo da secagem, com X_0 representando a quantidade inicial de água no sólido e T_0 sua temperatura nesse instante; T_f é a temperatura do sólido após atingir a umidade de equilíbrio.

No período de taxa de secagem constante, a temperatura do material é, em geral, igual à de bulbo úmido. As curvas de temperatura permitem que se determine os parâmetros de secagem ótimos em relação à qualidade do produto.

Capítulo 3

Modelagem matemática

Modelagem é a formalização de observações, expressa numa linguagem qualquer, de aspectos quantitativos sobre fenômenos naturais. É comum que aproximações sejam feitas e, portanto, que os modelos sejam incompletos na descrição do fenômeno, porém, não deixam de reproduzir aspectos importantes do sistema estudado [18]. Decerto, modelos do mundo físico são imprecisos; no entanto, modelos e teorias são por hora as melhores maneiras de se formalizar o conhecimento sobre os fenômenos da natureza.

Através de simulações numéricas, podem-se obter soluções para modelos matemáticos que não possuem solução analítica, definindo-se um experimento computacional realizado a partir das condições geométricas e físicas para um certo problema. Dessa forma, podem-se esclarecer aspectos do sistema que por ventura sejam difíceis de se inferir diretamente. O uso de modelos físicos que se utilizam da linguagem matemática para simulação de sistemas e de processos nas diversas áreas do conhecimento humano são, hoje em dia, bastante comuns devido à rápida evolução da capacidade computacional de processamento e de armazenamento, as quais viabilizam o emprego de modelos cada vez mais sofisticados e, portanto, melhores.

Neste capítulo, os modelos utilizados para simulação do sistema de secagem por atomização são descritos; o domínio computacional, as condições iniciais e de contorno são também apresentadas.

3.1 Modelos para o sistema de secagem

Há várias abordagens para a simulação da secagem de líquidos atomizados que se baseiam em modelos de escoamento bifásico. Dukowicz [19] simula a injeção de combustível a alta pressão num motor de combustão interna, resolvendo numericamente as equações da continuidade e do movimento do gás e das gotas atomizadas. Outros trabalhos, tais como os de Mostafa *et al* [20], Abramzon *et al* [21], Fashola *et al* [22], Berlemont *et al* [23], Chiang *et al* [24] e Chen *et al* [25], adotam modelos semelhantes.

Parti *et al* [26] desenvolveram um modelo matemático, para dimensionamento de secadores por atomização, que considera a evaporação da água em dois momentos: antes e depois da gota atingir sua umidade crítica; ou seja, separa na modelagem o primeiro e

o segundo períodos de secagem. O modelo é unidimensional e não considera a influência que as gotas injetadas exercem no fluxo de gás; Teves [27] e Negiz *et al* [28] utilizam e aprimoram esse modelo.

O trabalho de Crowe *et al* [29], que deu origem ao modelo de escoamento bifásico conhecido como *Particle Source-in-Cell Model* (PSI-CELL), considera a influência da fase contínua (gás) na fase dispersa (gotas) e vice-versa. O modelo é bidimensional e simula somente gotas que ao evaporarem não deixam resíduos sólidos. Diversos autores, tais como Boysan *et al* [30], Lee [31], Proulx *et al* [32], Papadakis *et al* [33] e Oakley *et al* [34], utilizam o modelo de Crowe em aplicações variadas.

No presente trabalho, foram desenvolvidos modelos físicos e matemáticos para simulação da secagem de suspensões atomizadas de matérias-primas cerâmicas quaisquer. Entretanto, os modelos matemáticos envolvidos não se limitam a essa aplicação e podem ser facilmente adaptados a vários outros processos de escoamento bifásico. Ao longo do trajeto das gotas dentro da câmara de secagem, a troca de calor e de massa entre o ar aquecido e as gotas de suspensão no primeiro período de secagem é calculada através do modelo proposto por Crowe *et al* [29, 35]. Para caracterizar o fim desse primeiro período, adotou-se o critério do diâmetro final do grânulo proposto por Lukasiwicz [17]. A partir desse ponto, o modelo utilizado para a troca de calor e massa entre as fases passa a basear-se no de Parti *et al* [26]. Este último modelo, o de Parti *et al*, foi modificado para simular problemas bidimensionais.

Assumem-se nos modelos apresentados aqui que: *i*) as gotas injetadas no sistema de secagem são esféricas e não se quebram nem coalescem; *ii*) as propriedades termodinâmicas e de transporte são calculadas utilizando-se a temperatura local do gás de secagem e sem considerar a umidade devida à evaporação das gotas; *iii*) o escoamento do gás e o fluxo das gotas são laminares; *iv*) o escoamento do gás acontece em regime permanente; *v*) o modelo é bidimensional e *vi*) coordenadas Eulerianas são utilizadas para o gás, enquanto que as equações para as gotas empregam uma abordagem Lagrangeana.

3.2 Equações governantes

A fim de simular o processo de secagem de suspensões por atomização, os perfis de temperatura e velocidade do gás de secagem devem ser calculados para que se possa, posteriormente, obter o histórico das gotas injetadas. As equações constitutivas para a fase gasosa e para a fase dispersa no primeiro e no segundo períodos de secagem são apresentadas nos itens 3.2.1, 3.2.2 e 3.2.3, respectivamente.

3.2.1 Fase gasosa

As equações resolvidas para o gás de secagem são as de conservação de massa, de quantidade de movimento, de energia e de fração-massa de vapor, que fornecem os perfis de velocidades, temperatura e umidade do gás. Todas as variáveis utilizadas neste capítulo são definidas na nomenclatura.

‡ Equação da continuidade

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u) = S^m \quad (3.1)$$

‡ Conservação da quantidade de movimento radial (r)

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho v^2) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho uv) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(2r\mu \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] \\ - 2\mu \frac{v}{r^2} - \frac{\partial p}{\partial r} + S_r^{mom} \end{aligned} \quad (3.2)$$

‡ Conservação da quantidade de movimento axial (z)

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho uv) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u^2) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r\mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(2\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ - \frac{\partial p}{\partial z} + S_z^{mom} \end{aligned} \quad (3.3)$$

‡ Conservação da energia

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho v h) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u h) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{k}{C_p} \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{C_p} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + S^h \quad (3.4)$$

‡ Conservação da fração-massa de vapor

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho v \vartheta) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u \vartheta) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\rho D \frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho D \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right) - S^m \quad (3.5)$$

O último termo do lado direito das equações acima representa o termo fonte referente às gotas atomizadas e é definido mais adiante, no item 3.2.4; v é a velocidade do gás na direção radial r e u é a velocidade do gás na direção axial z .

O método numérico adotado para a resolução dessas equações é o método dos volumes de controle, que é uma versão do método dos resíduos formulado em conjunto com o método de diferenças finitas. Esse método possibilita que decisões que antes eram governadas essencialmente por considerações matemáticas possam ser agora por razões físicas [36]. A idéia consiste em dividir o domínio de cálculo em um número de volumes finitos não sobrepostos de tal forma que cada volume contenha um nó, e integrar a equação diferencial sobre cada volume de controle, usando perfis segmentados para exprimir a variação da variável dependente entre os nós da malha. A equação discreta obtida com esse método expressa o princípio de conservação dessa variável da mesma maneira que a equação diferencial expressa este princípio para um volume de controle infinitesimal. Uma descrição detalhada do método numérico é feita no apêndice A.

3.2.2 Fase dispersa no primeiro período de secagem

As gotas injetadas na câmara são arrastadas e aquecidas pelo gás de secagem. As equações que descrevem a trajetória, o decréscimo de massa e de diâmetro, e o aumento da temperatura dessas gotas no primeiro período de secagem, caracterizado por uma taxa de secagem constante, são apresentadas a seguir. Como no caso das equações para a fase gasosa, as variáveis deste item são também definidas na nomenclatura.

‡ Forças de arraste viscoso e de gravidade

$$\vec{F}_v = C_D \rho (\vec{u} - \vec{u}_p) U_R \frac{A_p}{2} + \vec{g}; \quad (3.6)$$

$C_D = \frac{24}{Re}(1 + 0,15Re^{0,687})$ é o coeficiente de arraste viscoso e $U_R = [(u - u_p)^2 + (v - v_p)^2]^{\frac{1}{2}}$ é a velocidade relativa entre as fases.

‡ Taxa de decréscimo de massa de água

$$\frac{dm_{H_2O}}{dt} = -Sh \cdot \pi \rho D d_p (\vartheta_s - \vartheta); \quad (3.7)$$

$Sh = 2 + 0,6Re^{1/2}Sc^{1/3}$ é o número de Sherwood, $Re = \rho d_p U_R / \mu$, o número de Reynolds, $Sc = \mu / \rho D$, o número de Schmidt e $\vartheta_s = 18P_v / (29p - 11P_v)$, a fração-massa de vapor na superfície da gota.

‡ Taxa de decréscimo do diâmetro

$$\frac{dd_p}{dt} = -2Sh \frac{\rho D}{\rho_p d_p} (\vartheta_s - \vartheta). \quad (3.8)$$

‡ Temperatura

$$\frac{dT_p}{dt} = Nu \frac{6k}{\rho_p d_p^2 c_{p_p}} (T - T_p) - Sh \frac{6L\rho D}{\rho_p d_p^2 c_{p_p}} (\vartheta_s - \vartheta) \quad (3.9)$$

com $Nu = 2 + 0,6Re^{1/2}Pr^{1/3}$ sendo o número de Nusselt e $Pr = C_p \mu / k$ o número de Prandtl.

Os números de Sherwood e de Nusselt empregados nas equações de decréscimo de massa e de temperatura das gotas injetadas são assumidos aqui como funções dos números de Reynolds, Schmidt e Prandtl; essa hipótese é válida para cálculos da evaporação de gotas esféricas em regime laminar, pois a transferência de calor e de massa em casos assim é lenta [37]. De qualquer maneira, quando a taxa de transferência de calor ou de massa é corrigida a fim de incorporar o efeito que uma taxa maior tem na transferência de calor ou de massa, o valor da transferência pouco se altera.

3.2.3 Fase dispersa no segundo período de secagem

A mudança do primeiro para o segundo período de secagem, e por conseqüência a mudança dos modelos de troca de calor e de massa entre as fases, é determinada através do cálculo do diâmetro final do grânulo com relação ao diâmetro inicial da gota injetada:

$$\frac{d_{final}}{d_{p0}} = \left(\frac{\rho_p c_d}{\rho_g c_g} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (3.10)$$

Na expressão para o diâmetro final do grânulo, c_d é fração-massa de sólidos na gota e c_g é fração-massa de sólidos no grânulo. A densidade da gota, ρ_p , é definida por:

$$\rho_p = \rho_s \frac{1 + W_p}{1 + \frac{\rho_s}{\rho_w} W_p}. \quad (3.11)$$

Como o diâmetro da gota não mais varia, a taxa de decréscimo de massa de água (que continua a ser evaporada da partícula) é, agora, calculada através da seguinte equação:

$$m_{sol} \frac{dW_p}{dt} = -\pi d_p^2 \Upsilon. \quad (3.12)$$

$\Upsilon = \beta(\vartheta_s - \vartheta)$ é a taxa de secagem, $\beta = \alpha \rho D/k$, o coeficiente de transferência de massa de vapor, $\alpha = kNu/d_p$, o coeficiente de transferência de calor e $\vartheta_s = 18P_v/29p$.

A água evaporada nesse período deixa poros no grânulo, diminuindo sua densidade aparente, ρ_g , então:

$$\frac{d\rho_g}{dt} = -\frac{6\Upsilon}{d_p}. \quad (3.13)$$

Para cálculo da temperatura e da velocidade do grânulo permanecem as equações utilizadas no primeiro período de secagem. O método numérico utilizado para resolução das equações da fase dispersa em ambos os períodos é o das diferenças finitas.

3.2.4 Acoplamento entre as fases

Após a obtenção dos perfis do gás de secagem, sob certas condições de operação, o material a ser seco é injetado no sistema e a influência que cada fase exerce sobre a outra é computada, com os cálculos sempre efetuados de forma iterativa. A influência que o gás exerce nas gotículas e/ou grânulos é expressa por suas trajetórias e seus históricos de temperatura e de massa ao longo do domínio de cálculo, enquanto que as alterações causadas pelas gotas/grânulos no escoamento do gás são efetuadas através de termos fontes adicionados às equações da fase gasosa, ou seja, dos termos S^m , S_r^{mom} , S_z^{mom} e S^h . O

modelo adotado para se calcular esses termos provenientes da fase dispersa é o *Particle Source in Cell*, PSI-CELL [29]. Nesse modelo, as partículas (gotas ou grânulos) são tratadas como fontes, ou sorvedouros, de massa, de quantidade de movimento e de energia. Armazenando-se as condições de uma partícula ao entrar e sair de um certo volume de controle, obtém-se o termo fonte que corresponde àquele volume, devido àquela partícula; somando-se as contribuições de cada partícula que passa por esse mesmo volume, e repetindo esse procedimento para todos os volumes de controle, o efeito total que o material exerce no escoamento do gás é calculado.

A injeção das partículas é efetuada considerando-se um número finito de entradas e uma distribuição discreta de diâmetros. Considerando \dot{m} a quantidade de material injetada por unidade de tempo, X_l a fração das partículas que entra por l e Y_n a fração das partículas que entram com diâmetro d_n , a frequência de partículas admitidas pela entrada l é:

$$\dot{m}_{l,n} = \frac{6\dot{m}X_lY_n}{\pi\rho_p d_n^3}. \quad (3.14)$$

Essa quantidade dá origem a uma trajetória bidimensional l,n , do total de $l \times n$ trajetórias descritas. O número de partículas em uma dada trajetória é constante, uma vez que se supõe que não há quebra ou coalescência de partículas.

Para um volume de controle i,j , os termos fontes são:

Continuidade e fração-massa de vapor

$$S_{i,j}^m = \dot{\eta} \frac{m_{out} - m_{in}}{VOL}; \quad (3.15)$$

Movimento

$$\vec{S}_{i,j}^{mom} = \dot{\eta} \frac{(\vec{u}_p m)_{out} - (\vec{u}_p m)_{in}}{VOL}; \quad (3.16)$$

Energia

$$S_{i,j}^h = \dot{\eta} \frac{(h_p m)_{out} - (h_p m)_{in}}{VOL}; \quad (3.17)$$

VOL é o volume do volume de controle.

As equações acima apresentam-se ligeiramente modificadas em relação ao trabalho inicial [29], que utiliza o diâmetro das partículas ao invés da massa, de modo a possibilitar a inclusão da influência no fluxo do gás referente à troca de calor e de massa no segundo período de secagem.

3.3 Domínio computacional

O domínio de cálculo, ou domínio computacional, esquematizado na figura 3.1, representa a metade de uma câmara de secagem simples, mostrada na figura 3.2. Com base na figura 3.1, são definidos os fluxos de gás e das gotas: a entrada do ar de secagem é efetuada por AF; o gás flui através da câmara, arrastando as gotas de suspensão, injetadas em I. O contato entre o ar quente e as gotas faz com que estas se evaporem ao longo de seu trajeto. A saída do gás, e de material, é efetuada através BC, na base da câmara. A linha AB representa o eixo de simetria.

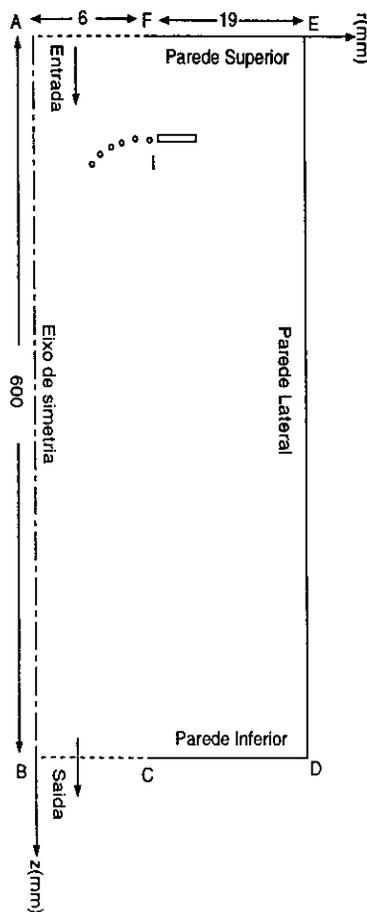


Figura 3.1: Domínio computacional do sistema de secagem por atomização.

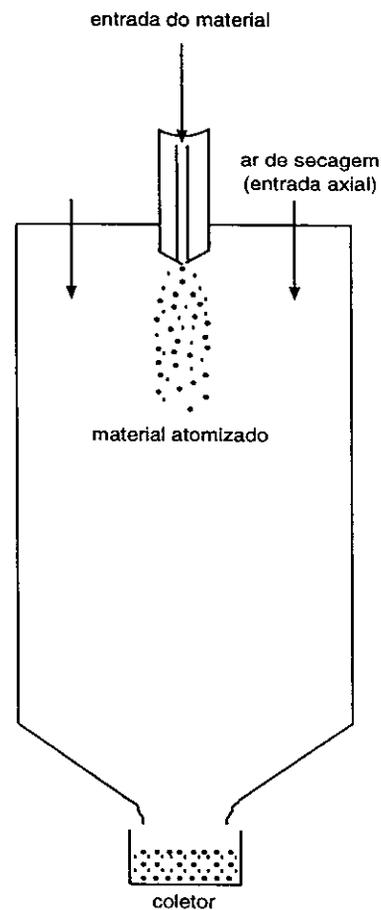


Figura 3.2: Esquema de um secador de fluxo concorrente.

3.4 Condições iniciais e de contorno

Com base no domínio computacional descrito na seção anterior, são estabelecidas as condições iniciais e de contorno.

Na entrada da câmara, AF, a temperatura do gás é tomada constante e igual a 310 °C, e sua velocidade axial é de 2 m/s; a componente radial da velocidade é, assumidamente, nula. Para esses valores de velocidade e de diâmetro de entrada do gás, a vazão do ar de secagem é de 13,5 l/min. A umidade inicial do ar é zero, porém pode ser alterada de acordo com dados ambientais.

Condições de simetria devem ser mantidas em AB; portanto, para a temperatura temos $\partial h/\partial r = 0$, para a componente axial da velocidade, $\partial u/\partial r = 0$ e para a componente radial, $v = 0$. A umidade do gás no eixo de simetria é calculada por $\partial \vartheta/\partial r = 0$.

Em BC, local da saída do gás de secagem e dos grânulos, assumem-se: $\partial h/\partial z = 0$, $\partial u/\partial z = 0$, $\partial v/\partial z = 0$ e $\partial \vartheta/\partial z = 0$.

Nas paredes superior, lateral e inferior, ambas as componentes da velocidade e a umidade do ar são nulas. A temperatura é assumida constante pois em alguns experimentos pode-se constatar que sua variação nas paredes é pequena.

O ponto de injeção, indicado pela letra I na figura 3.1, é posicionado, em princípio, perpendicularmente ao eixo de simetria, ou seja, possui ângulo de injeção de 0°. A velocidade inicial das gotas é de 2,5 m/s, injetada à uma taxa equivalente a 1,5% da taxa de fluxo do gás de secagem (0,2 l/min); a temperatura inicial das gotículas é a ambiente (≈ 25 °C). Os ensaios numéricos foram efetuados para dois tipos de materiais: água e suspensão de alumina. A distribuição do tamanho inicial de gotas é discreta, com três valores distintos: 30, 40 e 50 μm , cada qual representando respectivos 30, 40 e 30% do total de massa injetado no sistema.

Esses valores iniciais foram determinados a partir do trabalho de Crowe [35] para que se pudesse efetuar os primeiros testes com o programa; entretanto, a alteração destes é efetuada de forma simples e direta. Para simulação do secador utilizado nos ensaios experimentais conduzidos no Laboratório de Insumos do IPEN, o domínio de cálculo, as condições iniciais e de contorno serão alteradas (ver capítulo 6, seção 6.1), porém, o domínio e as condições deste capítulo contêm os conceitos e princípios físicos de sistemas de secagem por atomização.

Capítulo 4

Experimentos e análises

Os ensaios experimentais foram realizados para ajustar, alimentar e verificar a consistência do modelo matemático empregado nas simulações do processo de secagem por atomização. O equipamento utilizado nos experimentos foi um secador Büchi, modelo B190, do tipo dois fluidos, apresentado na figura 4.1, e funciona sob o mesmo princípio de atomizadores de fluxo concorrente. Os dados técnicos do equipamento estão no apêndice B.

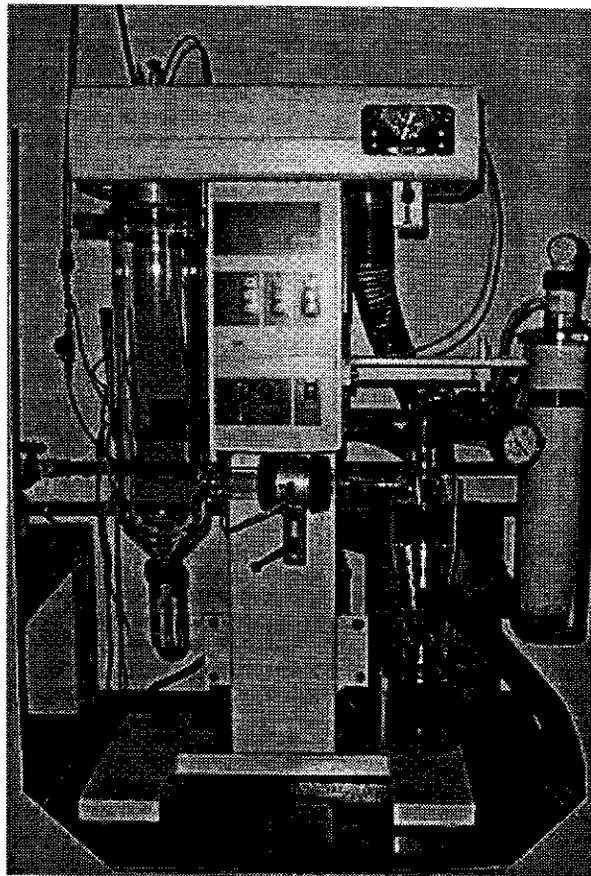


Figura 4.1: Foto do mini-secador Büchi utilizado nos ensaios experimentais.

Um diagrama do fluxo de ar e de material deste equipamento é visto nas figuras 4.2 e 4.3 [38].

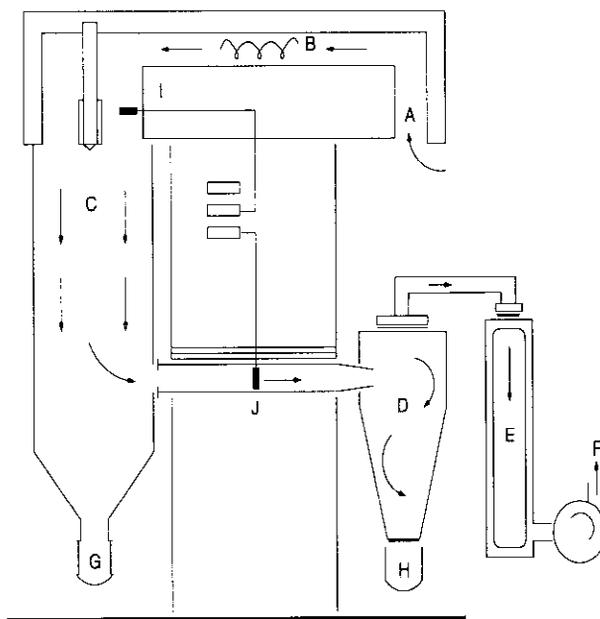


Figura 4.2: Diagrama do fluxo de ar do Büchi.

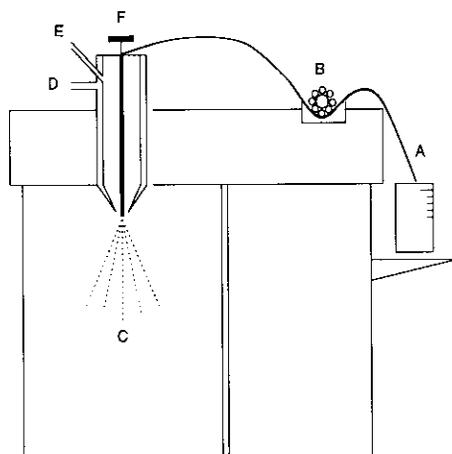


Figura 4.3: Diagrama do fluxo de material do Büchi.

O fluxo de ar, figura 4.2, se inicia em A e passa por um aquecedor elétrico, B, para então ser injetado na câmara de secagem, C. Os grânulos e o ar de secagem são separados no ciclone, D, e no filtro de mangas, E; o ar de exaustão é por fim retirado do sistema por F, através de uma bomba de aspiração. Após o processamento do material, os grânulos são coletados ou na base da câmara, G, ou na base do ciclone, H. I e J são termopares que medem a temperatura do gás na entrada e na saída, respectivamente, da câmara de secagem.

A suspensão a ser atomizada, A, segue o fluxo da figura 4.3; ela é aspirada por uma bomba peristáltica, B, e injetada no atomizador para então entrar em contato com o ambiente da câmara, na forma de uma nuvem de gotículas, C. O ar de atomização, que entra por E, é o responsável pela quebra do jato em gotas. Por D se introduz a água para refrigeração do atomizador. F é uma agulha utilizada quando o bico injetor é bloqueado.



Figura 4.4: Foto do atomizador do equipamento.

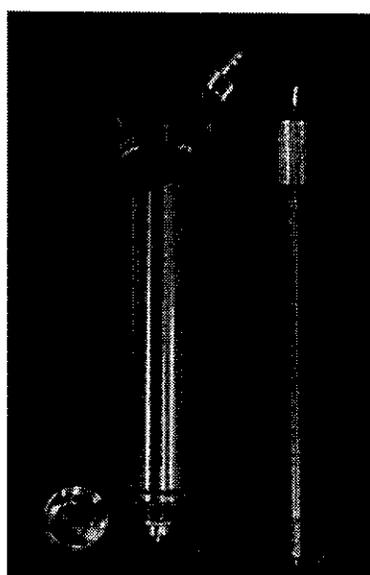


Figura 4.5: Detalhes de alguns componentes do atomizador.

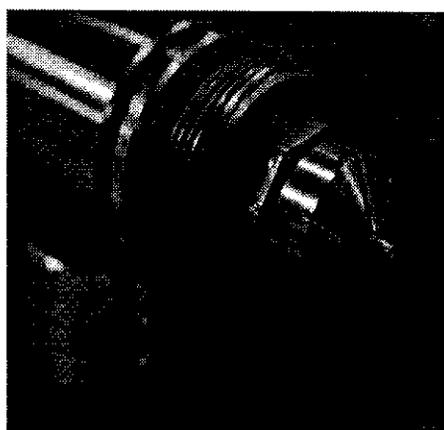


Figura 4.6: Foto do bocal de injeção de suspensão do atomizador.

As figuras 4.4, 4.5 e 4.6 são fotos do atomizador do equipamento. Alguns detalhes de seus componentes podem ser visualizados nessas fotos.

Mais um detalhe do atomizador é mostrado na figura 4.7: em operação dentro da câmara de secagem. Pode-se ver nessa foto os orifícios por onde o ar de secagem é

injetado. Nas fotos 4.8 e 4.9 vê-se, respectivamente, o reservatório para o material seco na base da câmara e a separação do ar de exaustão dos grânulos secos sendo feita no ciclone.

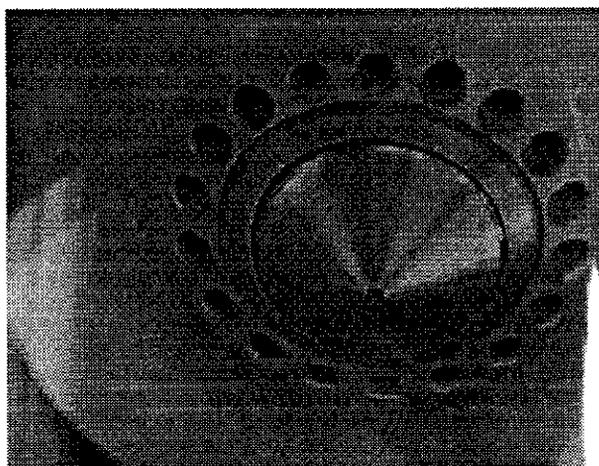


Figura 4.7: Atomizador em operação dentro da câmara e orifícios para a injeção do ar de secagem.

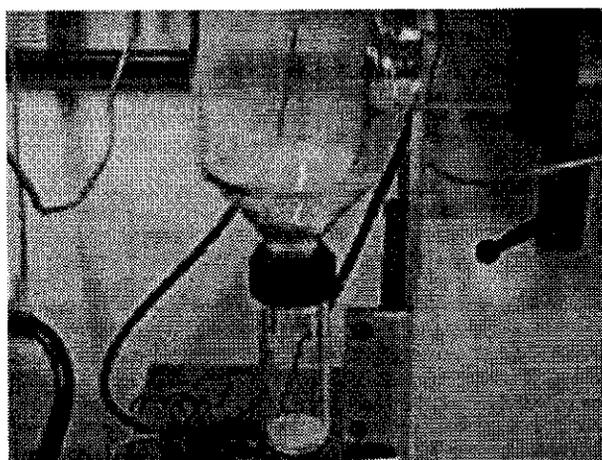


Figura 4.8: Coleta de material na base da câmara.

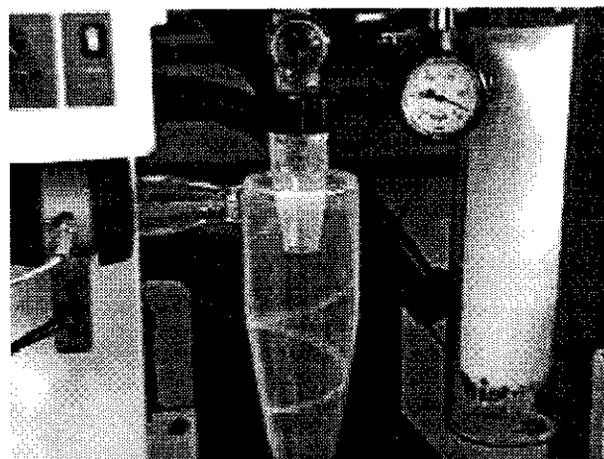


Figura 4.9: Separação dos grânulos do ar de secagem por um ciclone.

4.1 Materiais e métodos

Nem todos os parâmetros operacionais do secador podem ser lidos no painel do equipamento, e nem são informados no manual de operação; a vazão do ar de secagem teve que ser medida para que se determinasse quantitativamente esse parâmetro. A descrição de tal medida é apresentada na seção 4.1.1. A taxa de alimentação de material também teve que

ser inferida: mediu-se a quantidade em litros de suspensão bombeada num determinado intervalo de tempo.

Em todos os ensaios realizados no IPEN que tiveram seus parâmetros variados e estudados se utilizou suspensão de alumina. O método de preparação e os tipos de alumina são descritos na seção 4.1.2. A umidade do ar antes e durante a secagem foi determinada a partir das temperaturas de bulbo úmido e seco, como descrito na seção 4.1.3. A seção 4.1.4 apresenta um resumo dos ensaios experimentais conduzidos, das dificuldades encontradas no processo e das limitações do equipamento.

4.1.1 Medidas de vazão com um tubo de Pitot

Para se determinar a pressão dinâmica do fluxo de ar utilizado para a secagem, e posteriormente sua velocidade e vazão, foi utilizado um tubo de Pitot acoplado a um manômetro inclinado. Um esquema do aparato experimental e uma tabela com os valores de pressão medidos são apresentados no apêndice C. Com essas medidas de pressão dinâmica, pode-se calcular a velocidade do gás, pois $P_d = \rho u^2/2$.

Conhecendo-se a velocidade, a vazão turbulenta total é obtida através da seguinte relação [39]:

$$Q = 2\pi \int_0^a \bar{u}(a-y)dy; \quad (4.1)$$

\bar{u} é a velocidade axial média no tempo num tubo liso de seção circular, a é o raio do tubo e y é a distância da parede. Assume-se um perfil axisimétrico de velocidade.

Para uma representação adimensional da velocidade perto da parede, usa-se uma velocidade de referência $u_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}$ e um comprimento de referência ν/u_τ , onde τ_w é a tensão de cisalhamento na parede e u_τ é denominada velocidade de atrito. Os resultados experimentais são apresentados em termos da relação funcional entre $u^* = \bar{u}/u_\tau$ e $y^* = yu_\tau/\nu$, figura 4.10. O gráfico da figura 4.10 provê uma representação bastante precisa do perfil de velocidade mesmo para valores distantes da parede do tubo, sendo, portanto, considerada uma curva universal.

Essa curva experimental, para valores de $y^* > 30$, pode ser aproximada pela equação 4.2 [40]:

$$u^* = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{yu_\tau}{\nu} \right) + B; \quad (4.2)$$

$\kappa = 0,4$ e $B = 5,5$.

A curva $u^* \times y^*$ pode ser representada por uma relação mais simples quando o número de Reynolds do escoamento for menor que 10^5 :

$$u^* = 8,7 \left(\frac{yu_\tau}{\nu} \right)^{\frac{1}{7}}. \quad (4.3)$$

Calculando-se y^* e u^* para as velocidades obtidas a partir das pressões dinâmicas medidas para as vazões de 50, 75 e 100% da bomba de aspiração do Büchi, encontram-se

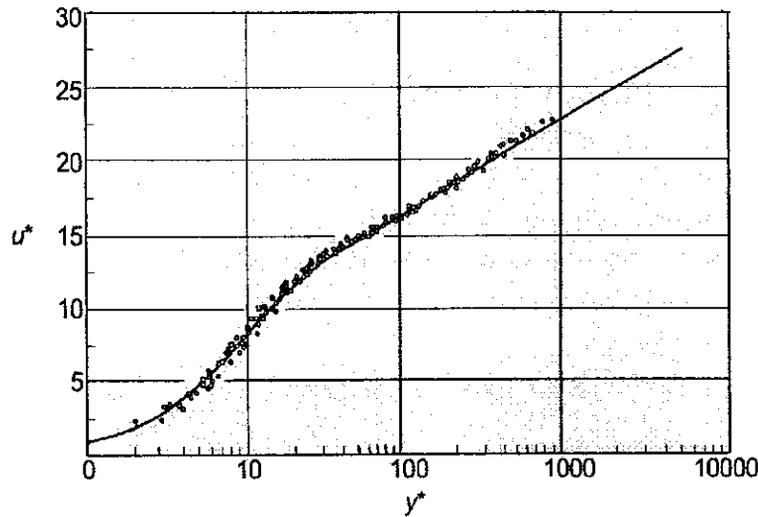


Figura 4.10: Perfil de velocidade adimensional. Figura retirada do livro *Fluid flow, A first course in fluid mechanics*, de Saberski e Acosta.

os pares (262; 19,4), (382; 20,3) e (493; 21), respectivamente; esses pares ordenados de y^* e u^* calculados para o equipamento em questão estão representados na curva da figura 4.10. É possível, então, resolver a integral para Q , equação 4.1, e obter a taxa de fluxo total do Büchi com base nos valores medidos com o tubo de Pitot. Considerando u^* expressa pela relação 4.3, obtém-se, por fim:

$$Q = 2\pi u_\tau \left(3,6 \frac{a^{15/7} u_\tau^{1/7}}{\nu^{1/7}} \right). \quad (4.4)$$

As expressões para τ_w e u_{av} utilizadas são:

$$\tau_w = 0,03325\rho (u_{av})^{7/4} \nu^{1/4} a^{-1/4}; \quad (4.5)$$

$$u_{av} = \frac{\nu a^*}{d\kappa} [2\ln a^* + 2B\kappa - 3]; \quad (4.6)$$

d é o diâmetro do tubo e $a^* = au_\tau/\nu$.

4.1.2 Suspensão de Al_2O_3

Dois tipos de alumina foram utilizados nos ensaios: *i*) alumina A16 da Alcoa, com 0,5 μm de tamanho médio de partículas (ver figura 4.42) e *ii*) alumina tabular, com 2,7 μm de tamanho médio de partículas, conforme análise realizada num sedígrafo, figura 4.11.

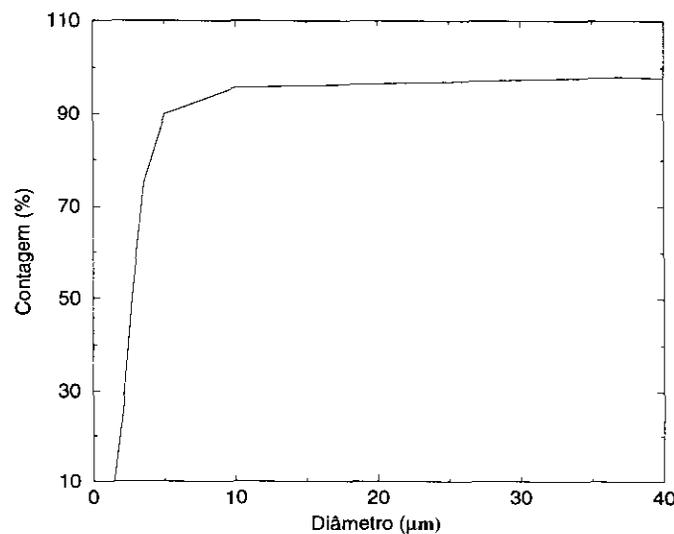


Figura 4.11: Distribuição granulométrica das partículas da alumina tabular.

<i>Componente</i>	<i>% Al₂O₃ (massa)</i>
Água	50%
Óxido de magnésio	0,1%
Defloculante	0,125%
Ácido cítrico	0,05%
Álcool polivinílico (PVA)	0,05%

Os componentes da suspensão de ambos os tipos de alumina são:

A alumina e a água adicionada, mais os aditivos necessários (dispersantes e ligantes), apenas descritos, eram pesados em uma balança digital e a mistura era colocada num moinho de bolas para homogeneização por um período mínimo de quatro horas, originando, então, a suspensão utilizada nos experimentos.

4.1.3 Medidas da temperatura de bulbo úmido e seco

Uma das maneiras de se verificar a consistência dos modelos empregados na simulação do processo de secagem por atomização é a comparação dos valores da taxa de água evaporada obtida nos experimentos com a calculada pelo programa. Para se determinar experimentalmente esse parâmetro, deve-se primeiro determinar a umidade do ar de secagem. Um método simples e muito eficiente de se obter a umidade de um gás é através dos valores das temperaturas de bulbo úmido e seco; medindo-se simultaneamente as duas temperaturas antes e durante o processo, obtém-se, com o auxílio de cartas psicrométricas, a umidade do ar antes da injeção da suspensão na câmara e durante a secagem das gotículas. A

partir desses valores de umidade é possível, então, determinar a taxa de água evaporada em cada ensaio experimental.

Um esquema do aparato experimental utilizado nas medições e uma tabela com os valores das temperaturas de bulbo úmido e seco medidos antes e durante a secagem nos ensaios experimentais do grupo II são apresentados no apêndice D.

4.1.4 Ensaios

Os ensaios experimentais podem ser divididos em dois grupos, denominados aqui grupo I e grupo II, descritos a seguir. No apêndice E, são apresentadas tabelas com os parâmetros de operação dos experimentos desses dois grupos.

Grupo I - Alumina A16

Nessa série de experimentos, a alumina utilizada para o preparo da suspensão foi a A16. A cada ensaio realizado, a câmara era retirada para limpeza e pode-se perceber a formação de depósitos excessivos de material numa determinada região da parede do secador, sem conseguir estabelecer uma relação desses depósitos com o parâmetro operacional variado. Quando o atomizador foi retirado para manutenção e troca de alguns anéis de borracha, pode-se observar, visualmente, uma pequena descentralização do bico injetor, como ilustra a figura 4.12.

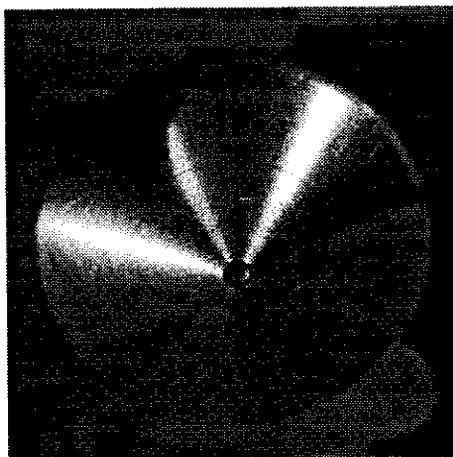


Figura 4.12: Foto do bocal do atomizador: descentralização do bico injetor de suspensão.

A configuração utilizada até aquele momento era a da figura 4.13 (a), com o bico injetor na posição interna. Quando o bico injetor foi colocado na configuração externa, figura 4.13 (b), essa descentralização foi eliminada e o depósito, quando acontecia, era de forma homogênea, sem direção preferencial. Esse desvio na trajetória das gotas devido à mudança no ângulo de injeção é previsto pelo modelo, como descrito no capítulo 5, seção 5.2.2.

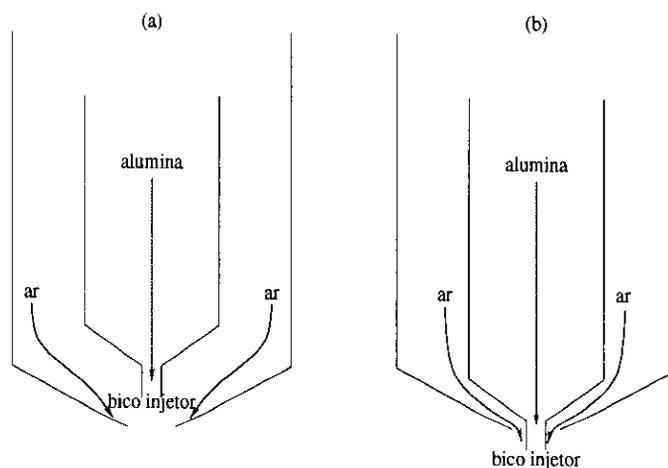


Figura 4.13: Esquema do atomizador. Bico injetor de material posicionado (a) interna e (b) externamente.

As figuras 4.14 e 4.15 são fotos do atomizador com o bico injetor na posição interna e externa, respectivamente.

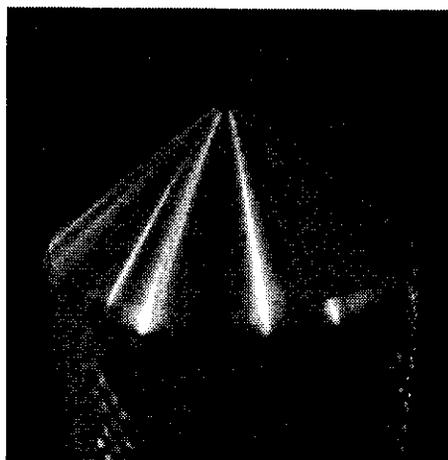


Figura 4.14: Configuração interna do bico injetor.

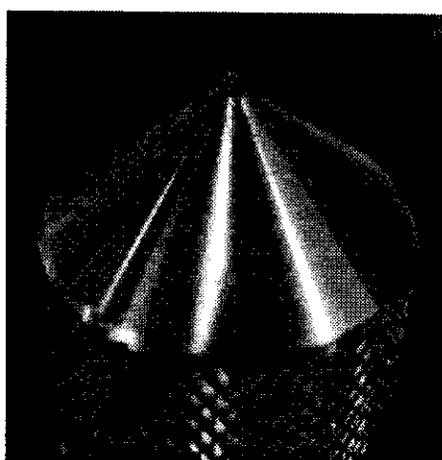


Figura 4.15: Configuração externa do bico injetor.

Grupo II - Alumina tabular

A alumina usada na suspensão do grupo II de experimentos foi a tabular. Esses ensaios do grupo II foram conduzidos a fim de medir as temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido, utilizadas posteriormente para se calcular a umidade do ar de secagem. Antes do início dos ensaios, foi feita uma limpeza no filtro de mangas, que impede que grânulos ou partículas não separados do gás no ciclone entrem na bomba de aspiração, e isso fez com que a vazão de ar de secagem aumentasse. Com uma vazão de gás maior, os depósitos de material na parede diminuíram consideravelmente, ocorrendo somente na parte superior

da câmara. Para um certo conjunto de parâmetros, pode-se eliminar completamente a deposição de pó na parede da câmara de secagem. Como a configuração do atomizador usada foi a da figura 4.15, não houve depósitos com direção preferencial.

4.2 Análises

Análises do material produzido no IPEN, do fornecido pela indústria de revestimento, e do grés porcelanato atomizado, que constituiu parte do trabalho de doutorado de Menegazzo [41], foram conduzidas para avaliar a consistência do modelo e também para alimentar as simulações. Através da microscopia eletrônica de varredura, pode-se estimar a faixa granulométrica do material e sua morfologia. A determinação da porosidade do grânulo, através da porosimetria de mercúrio, especifica a fração-peso de sólidos no grânulo, c_g , que compõe a expressão que condiciona a mudança do primeiro para o segundo período de secagem no modelo. As análises termogravimétricas determinam a quantidade de água residual nos grânulos; os valores obtidos nessas análises serão comparados aos resultados simulados. Por fim, a distribuição granulométrica dos grânulos, e das partículas que constituem esses grânulos, foi estabelecida e serviu como parâmetro para determinar nas simulações a faixa de diâmetros das gotas de suspensão de alumina.

4.2.1 Microscopia eletrônica de varredura

As análises no microscópio eletrônico foram realizadas para se estimar o tamanho aproximado dos grânulos produzidos nos diferentes ensaios e, principalmente, a morfologia desses grânulos. O microscópio utilizado foi o da Philips, modelo XL 30, com detectores para elétrons secundários (SE) e retroespalhados (BSE), pertence ao laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do IPEN.

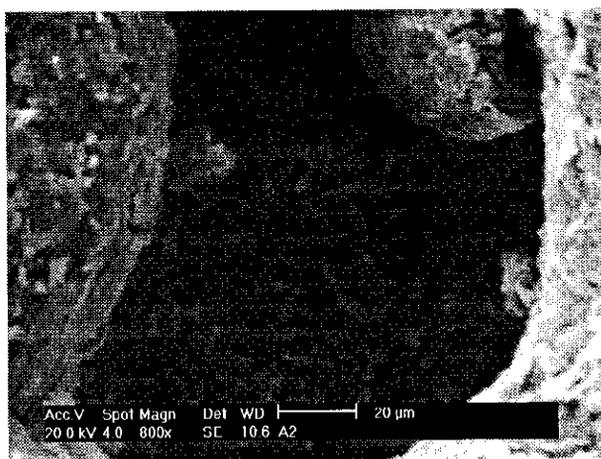
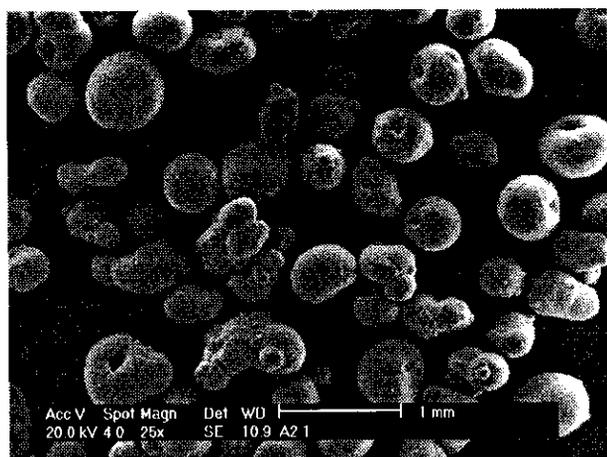


Figura 4.16: Grânulos de massa cerâmica produzidos na indústria de revestimento para fabricação do suporte cerâmico.

Figura 4.17: Detalhe de um grânulo: vão formado por arraste de partículas pela água que migra para a superfície mais quente.

Os grânulos das figuras 4.16 e 4.17 são do material utilizado na indústria de revestimento cerâmico. Pode-se verificar pela micrografia da figura 4.16 que, nesse caso, os diâmetros dos grânulos variam entre 200 e 500 μm ; a maior parte dos grânulos possui forma esférica, porém, há também grânulos disformes que reduzem a fluidez do material atomizado e podem, como consequência, prejudicar as etapas subseqüentes do processo de produção do suporte cerâmico. Em geral, os grânulos produzidos possuem um vão, figura 4.17, proporcional ao seu tamanho, que é provocado pela água que arrasta partículas de material quando migra para a superfície mais quente. Pode-se, também, estimar o tamanho das partículas que constituem o grânulo; no material fornecido pela indústria, as partículas variam entre 5 e 20 μm .

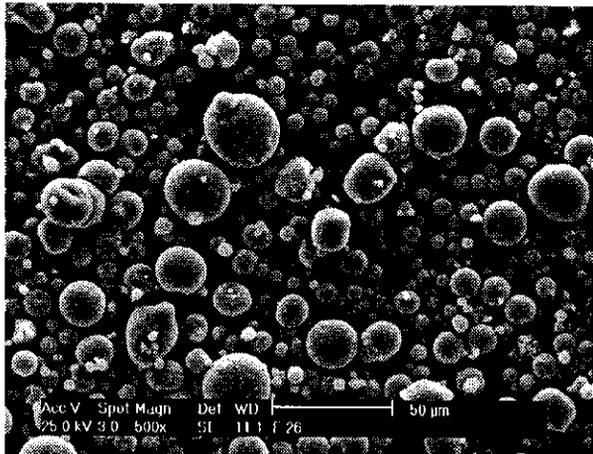


Figura 4.18: Grânulos de alumina produzidos no laboratório de insumos do IPEN: grupo I de experimentos.

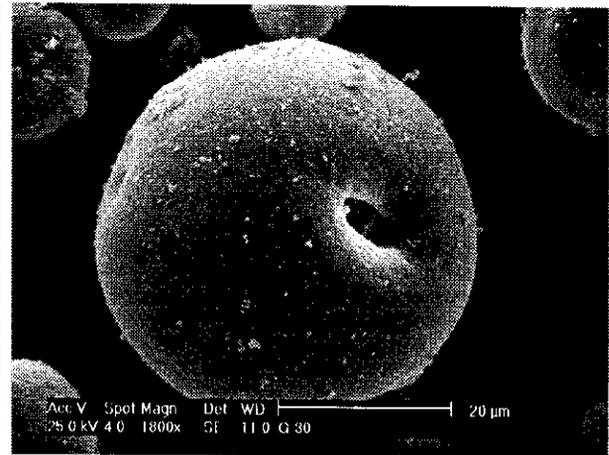


Figura 4.19: Grânulo de alumina: arraste de partículas pela água, formando o vão característico de materiais atomizados.

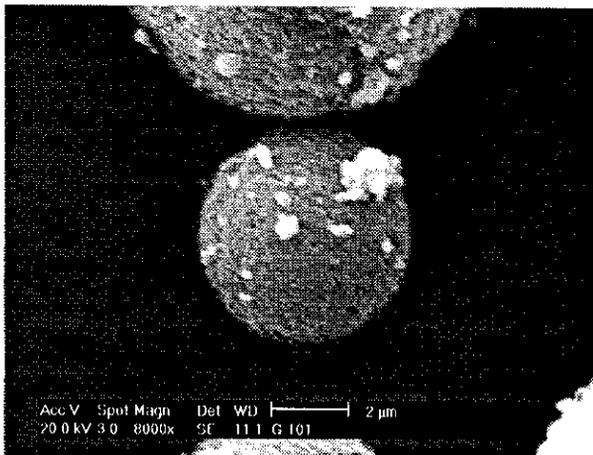


Figura 4.20: Grânulo de alumina produzido no IPEN: grupo I de experimentos.

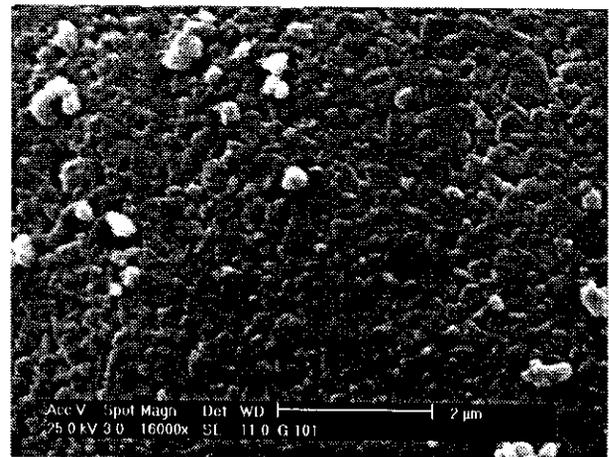


Figura 4.21: Detalhe da superfície do grânulo apresentado na figura anterior.

O material produzido no mini-atomizador do IPEN possui as mesmas características do industrial, porém de diâmetros bem menores: 5 a 50 μm , como pode ser visto na figura 4.18. Na figura 4.19, observa-se o vão característico de materiais atomizados.

Para grânulos pequenos, como o da figura 4.20, com diâmetro aproximado de 5 μm , é possível distinguir as partículas que os constituem; com um aumento maior, figura 4.21, essas partículas ficam nítidas: são submicrométricas, medindo entre 0,2 e 0,6 μm .

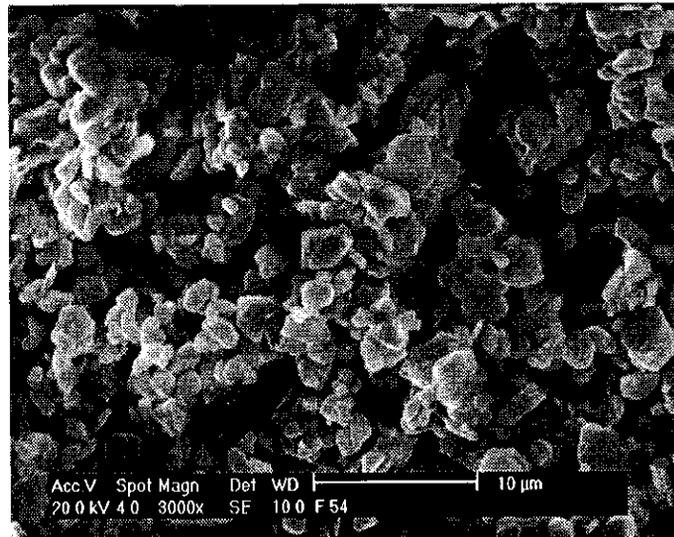


Figura 4.22: Partículas de alumina coletadas após a secagem: grupo II de experimentos.

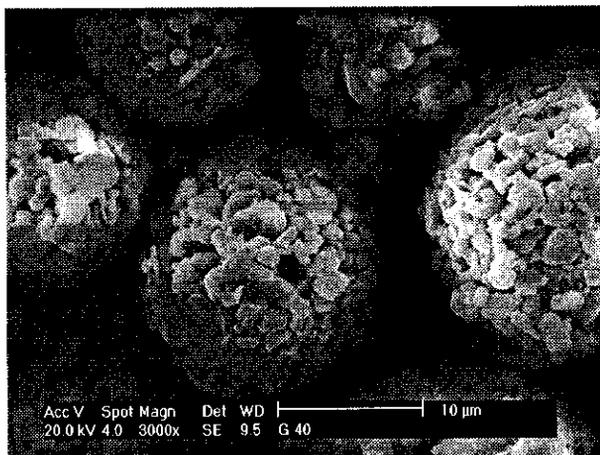


Figura 4.23: Material produzido no laboratório de insumos do IPEN: grupo II de experimentos.

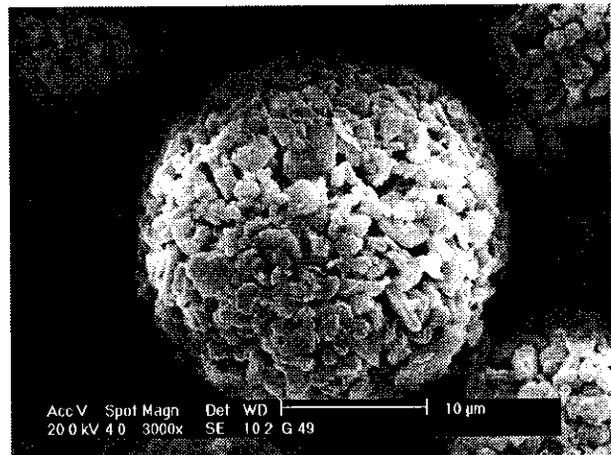


Figura 4.24: Grânulo de alumina produzido no IPEN: grupo II de experimentos.

Como a alumina do grupo II de experimentos é diferente da utilizada nos ensaios anteriores, e também pelo fato das partículas serem bastante grosseiras, o material recolhido

no ciclone não se manteve na forma de grânulos esféricos, como mostra a figura 4.22. O material recolhido na base do secador, porém, manteve-se aglomerado, como pode-se ver nas figuras 4.23 e 4.24. Em comparação com os grânulos produzidos com alumina A16 (figuras 4.19 e 4.21, por exemplo), nota-se claramente a diferença de tamanho entre as partículas que constituem os grânulos: variam de 2 a 5 μm , aproximadamente; a granulometria das partículas da alumina tabular observada no microscópio eletrônico está de acordo com a medida no sedígrafo (ver figura 4.11).

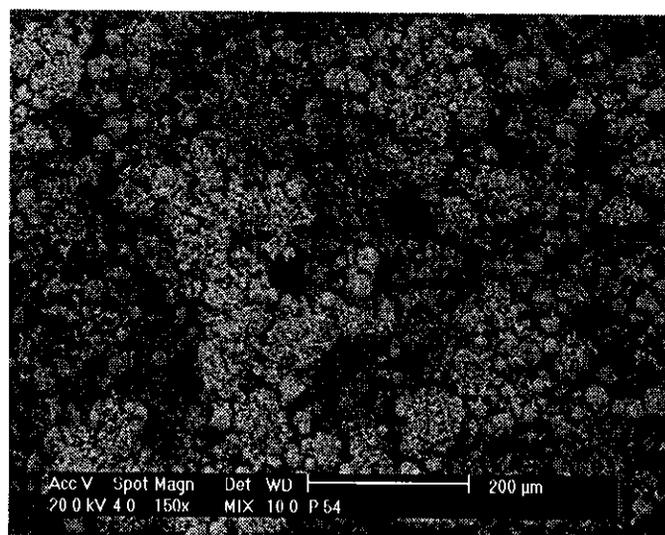


Figura 4.25: Partículas de alumina da parede do secador: grupo II de experimentos.

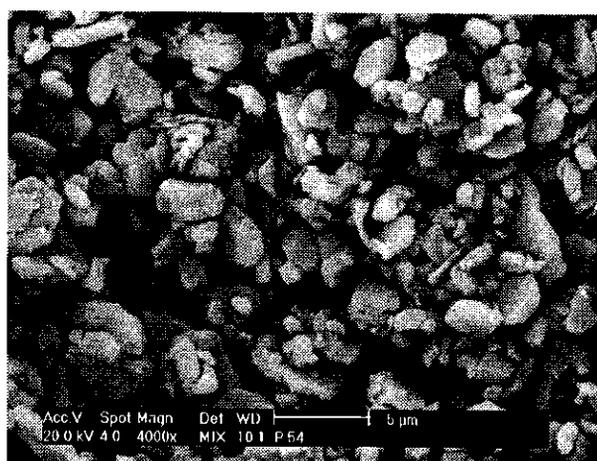


Figura 4.26: Partículas de alumina coletadas da parede do secador: grupo II de experimentos.

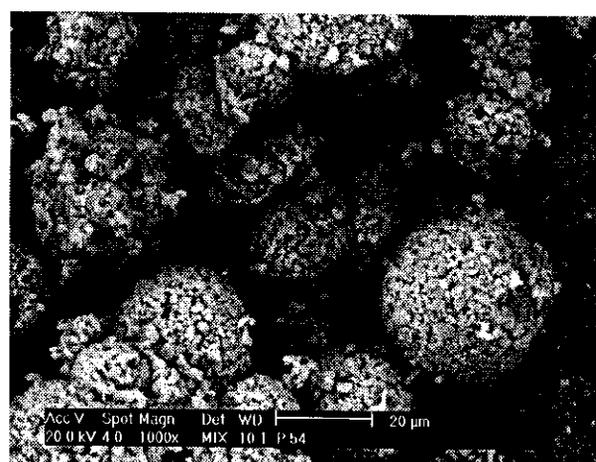


Figura 4.27: Grânulos de alumina retirados da parede do secador: grupo II de experimentos.

Num dos ensaios, foi possível coletar uma quantidade razoável de material da parede da câmara de secagem; nota-se, figura 4.25, a existência de grânulos nesse material, mas

também uma grande quantidade de pó não atomizado, ou seja, de partículas de alumina. As figuras 4.26 e 4.27 mostram, num aumento maior, as partículas e os grânulos desse material recolhido da parede.

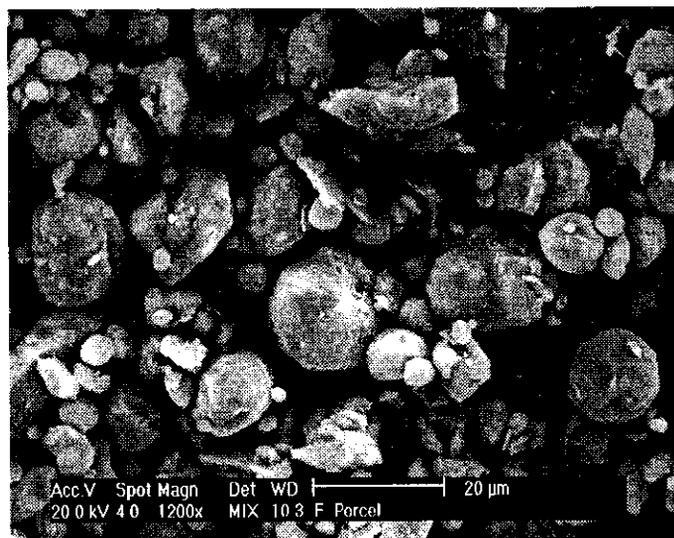


Figura 4.28: Grânulos de porcelanato produzido no IPEN.

Foi também processada uma suspensão para base de porcelanato como parte do trabalho de Menegazzo [41]; o material coletado na base do ciclone, mostrado na figura 4.28, é esférico, porém, há também uma quantidade relativamente grande de material não atomizado e de grânulos disformes. As micrografias das figuras 4.29 e 4.30 são grânulos do material coletado na base do secador: como existem matérias-primas plásticas na composição dessa suspensão, há grânulos que perdem sua forma esférica devido, provavelmente, à choques com a parede do secador.

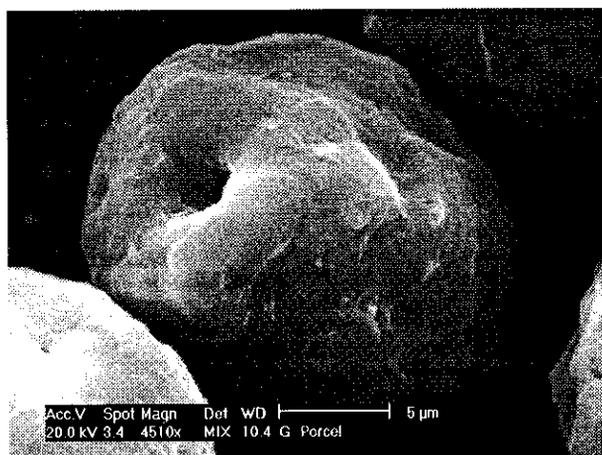


Figura 4.29: Grânulo de porcelanato esférico.

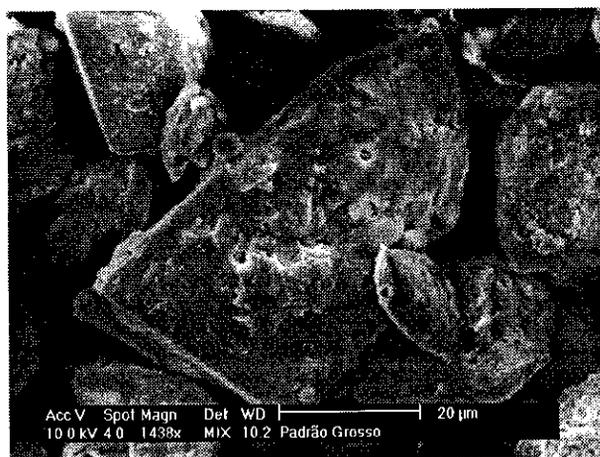


Figura 4.30: Grânulo de porcelanato disforme.

4.2.2 Porosimetria de mercúrio

As análises de porosidade foram realizadas no Centro de Processamento de Pós - CCTM, do IPEN e no Laboratório de Processos Cerâmicos do Departamento de Metalurgia e Materiais da Escola Politécnica, num porosímetro da Micromeritics, modelo *autopore* III, capaz de medir poros entre 360 e 0,003 μm . Através dessas análises, o tamanho, a quantidade de poros e a densidade volumétrica do grânulo puderam ser determinados. A porosidade é um parâmetro importante na modelagem, pois a partir dela pode-se estimar a quantidade de água existente no grânulo na mudança do primeiro para o segundo período de secagem e determinar a fração-massa de sólidos no grânulo, c_g , utilizada na equação 3.10.

O valor de porosidade obtido nas análises corresponde à quantidade de mercúrio que saiu do reservatório e entrou no cadinho com os grânulos. Logo, uma parte do mercúrio preenche os poros intergranulares e a outra parte, os poros intragranulares. Como a porcentagem de poros que se deseja obter é a intragranular, deve-se descontar a porosidade intergranular da porosidade total fornecida pelo porosímetro. Assumindo-se que os grânulos atomizados são esféricos e têm diâmetros iguais, pode-se estimar a porosidade intergranular através de uma analogia com estruturas cúbicas de corpo centrado (ccc), nas quais tem-se uma porosidade de 32%, pois o fator de empacotamento máximo é de 68%. Logo, do valor da porcentagem total de porosidade fornecido nas análises deve-se descontar 32% a fim de se obter a quantidade aproximada de poros dentro do grânulo.

Três tipos de materiais foram submetidos à análise de porosidade: os grânulos de massa cerâmica produzidos pela indústria, os de alumina pertencentes ao grupo I de experimentos, e os de porcelanato.

Nas análises realizadas no CCTM do IPEN, o valor fornecido pelo equipamento para a porosidade é de 34% para os grânulos de massa cerâmica produzidos pela indústria e de 25% a 38% para os grânulos de alumina produzidos no IPEN. Decerto, essas porcentagens para a porosidade dos grânulos deve representar somente os espaços intergranulares, pois tais valores são equiparáveis aos 32% de vazios entre as esferas de uma estrutura ccc. Outra evidência que leva à conclusão que porosidades da ordem de 30% correspondem somente às intergranulares é o tamanho de poros. Nos gráficos das figuras 4.31, 4.32, 4.33 e 4.34, tem-se que o tamanho médio de poros no material da indústria é de 100 μm e no material do IPEN é de 10 μm , ou seja, os poros têm a mesma ordem de grandeza dos grânulos e não das partículas, como se espera para poros intragranulares.

A confirmação que porosidades de aproximadamente 30% representam somente os poros intergranulares veio com as análises realizadas na Escola Politécnica: para os grânulos de porcelanato, de alumina do grupo I e do grupo II de experimentos, a porosidade medida é em média de 70%. As curvas das figuras 4.35 e 4.36 são respectivamente a variação com o diâmetro dos poros do volume de mercúrio acumulado e incrementado de uma análise realizada nos grânulos de alumina do grupo I de experimentos; nestas figuras pode-se ver claramente a existência de duas famílias de tamanho de poros, sendo uma delas de 20 μm e outra de 0,2 μm . Os poros de 0,2 μm têm a mesma ordem de grandeza das partículas

da alumina A16*, e são, portanto, poros intragranulares.

Assumindo-se que a porosidade intergranular do material atomizado é a de uma estrutura ccc, pode-se concluir, por fim, que a porosidade intragranular dos materiais analisados é de 38%.

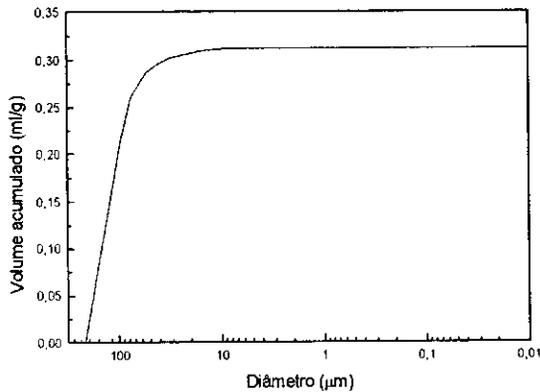


Figura 4.31: Variação do volume de mercúrio acumulado nos grânulos de massa cerâmica industrial com o diâmetro dos poros.

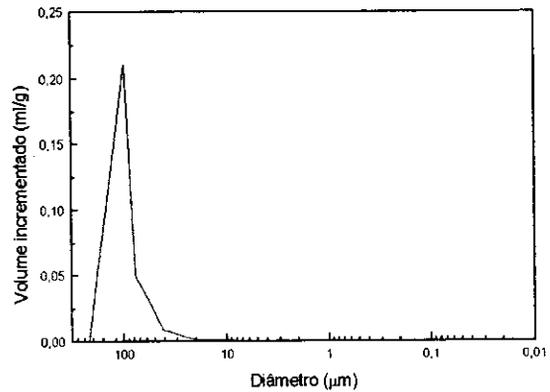


Figura 4.32: Variação do volume de mercúrio incrementado nos grânulos de massa cerâmica industrial com o diâmetro dos poros.

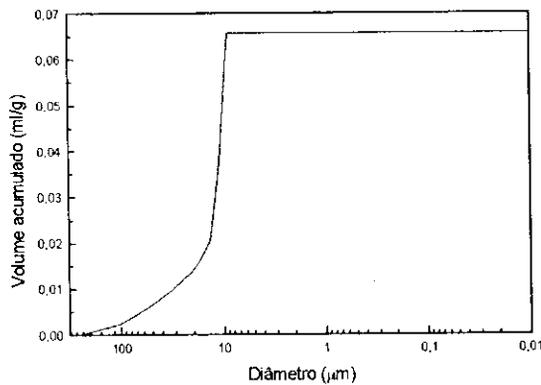


Figura 4.33: Variação do volume de mercúrio acumulado nos grânulos de alumina do grupo I com o diâmetro dos poros.

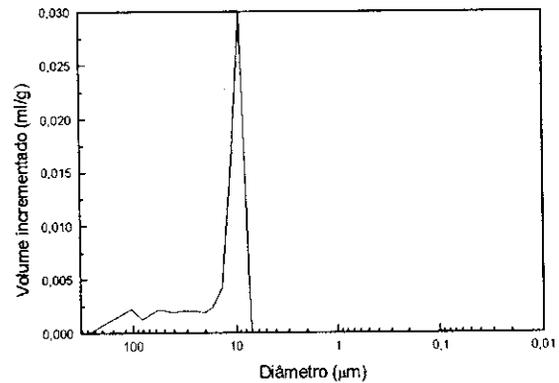


Figura 4.34: Variação do volume de mercúrio incrementado nos grânulos de alumina do grupo I com o diâmetro dos poros.

*Esse tamanho de $0,2 \mu\text{m}$ para as partículas da alumina A16 é comprovado tanto pelas análises no microscópio eletrônico como pelas análises de distribuição granulométrica realizadas no CILAS.

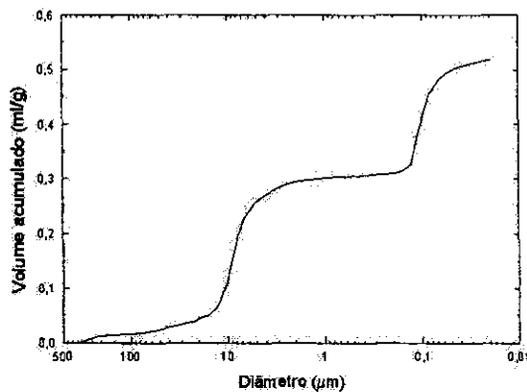


Figura 4.35: Variação do volume de mercúrio acumulado nos grânulos de alumina do grupo I de ensaios com o diâmetro dos poros.

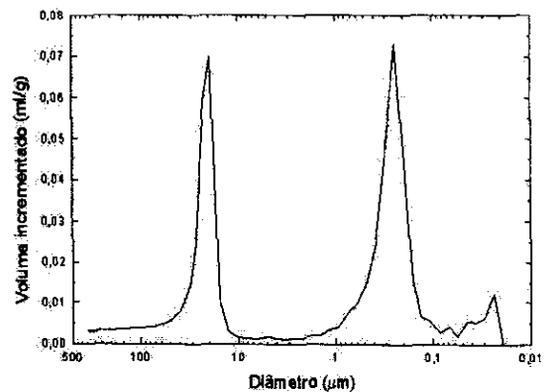


Figura 4.36: Variação do volume de mercúrio incrementado nos grânulos de alumina do grupo I de ensaios com o diâmetro dos poros.

4.2.3 Análise termogravimétrica

A umidade residual do material atomizado no IPEN (alumina do grupo I de experimentos e porcelanato) e da massa cerâmica fornecida pela indústria foi medida através de análises termogravimétricas e tem por finalidade a comparação entre os valores obtidos nas análises e os valores calculados nas simulações. Tais análises foram conduzidas numa termobalança Shimadzu, modelo TGA-50, pertencente ao Laboratório de Análises Térmicas do Centro de Tecnologia das Radiações do IPEN. O aquecimento foi feito a uma taxa de $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, com vazão de $50\text{ ml}/\text{min}$ de ar e com a massa das amostras variando entre 4 e 5 mg.

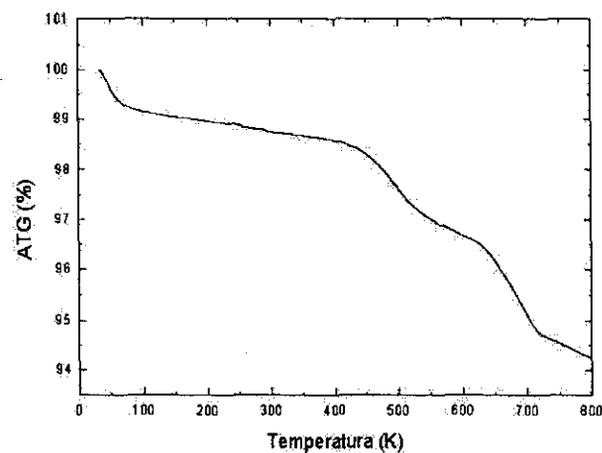


Figura 4.37: Curva TG do material utilizado na indústria.

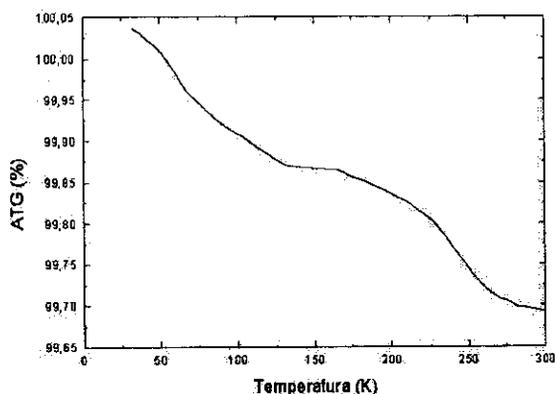


Figura 4.38: Curva TG da alumina produzida no grupo I de ensaios.

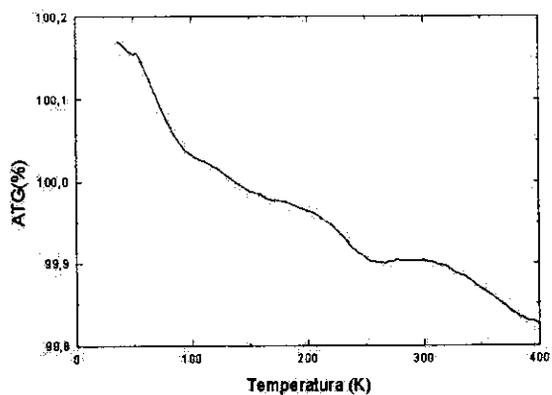


Figura 4.39: Curva TG da alumina produzida no grupo I de ensaios.

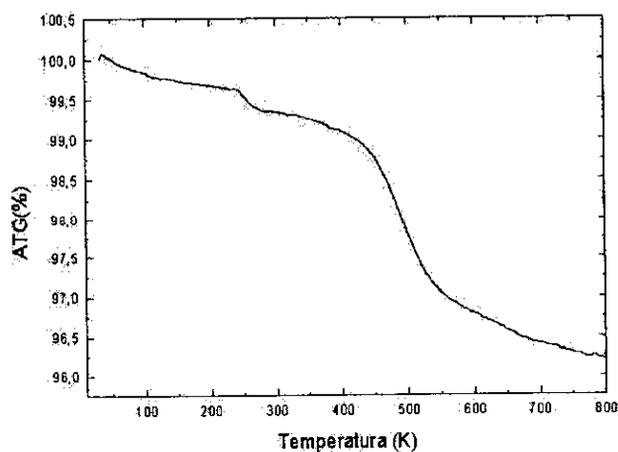


Figura 4.40: Curva TG do porcelanato produzido no IPEN.

A figura 4.37 apresenta perda de massa de voláteis (água mais aditivos orgânicos) até uma temperatura de 800 °C para a massa cerâmica utilizada na indústria; a redução de massa é de aproximadamente 6%, como esperado para esse material.

Nos grânulos de alumina produzidos no IPEN, a umidade residual é menor que 0,5%, como pode-se constatar nas figuras 4.38 e 4.39. Esses materiais foram aquecidos até uma temperatura de 300 e 400 °C, respectivamente; porém, foram realizadas análises até 800°C em materiais semelhantes sem que se observasse um decréscimo maior 0,5% na massa da amostra.

O porcelanato, figura 4.40, apresentou uma redução de 3,5% em massa, sendo aproximadamente 3% referente a aditivos e somente 0,5% a água. A tabela 4.1 resume os resultados de umidade residual obtidos para os três tipos de material analisado.

Tabela 4.1: Valores de umidade residual determinados por análises termogravimétricas da massa cerâmica industrial, da alumina do grupo I de ensaios e do porcelanato.

<i>Material</i>	<i>Perda de massa total Água + aditivos(%)</i>	<i>Perda de água (%)</i>
Massa cerâmica industrial	5,75	1,5
Alumina	0,3	0,3
Porcelanato	3,75	0,4

Como a quantidade de aditivos adicionada à suspensão de alumina é pequena (menos de 0,1% da massa total) e considerando que a temperatura em todo o processo de secagem é menor que a necessária para evaporar os compostos orgânicos usados como ligantes e dispersantes, conclui-se que a água residual em materiais processados no secador Büchi é, aproximadamente, de 0,3%.

4.2.4 Determinação do tamanho de grânulos e de partículas

As análises de distribuição granulométrica dos grânulos foram a base para o estabelecimento, nas simulações, do diâmetro inicial das gotas atomizadas, bem como da fração que cada classe de diâmetro representa do total. Os materiais submetidos a tal análise foram a massa industrial e a alumina produzida no IPEN. As análises foram feitas num equipamento CILAS, pertencente ao Laboratório de Materiais Nucleares do CTMSP de Aramar, capaz de caracterizar amostras em meio aquoso ou seco; no caso dos grânulos, era necessário a análise a seco pois a água desfaz o aglomerado.

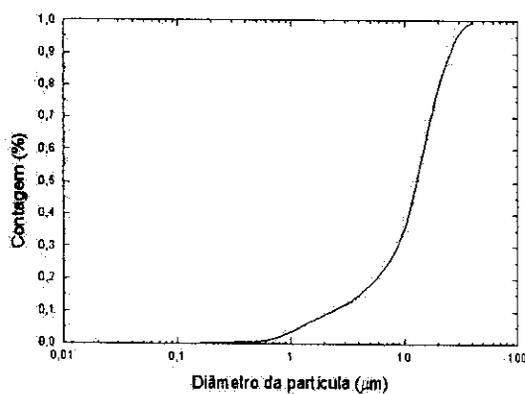


Figura 4.41: Distribuição do tamanho de partículas do material produzido na indústria.

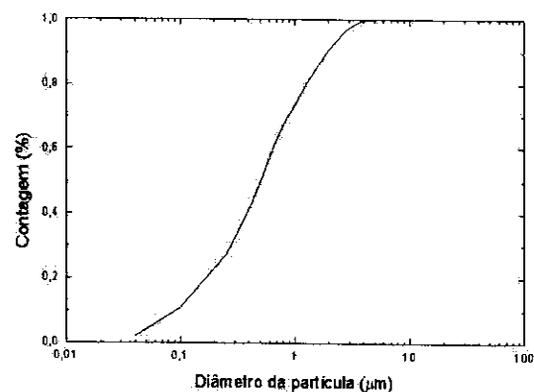


Figura 4.42: Distribuição do tamanho de partículas da alumina A16 utilizada nos ensaios do grupo I.

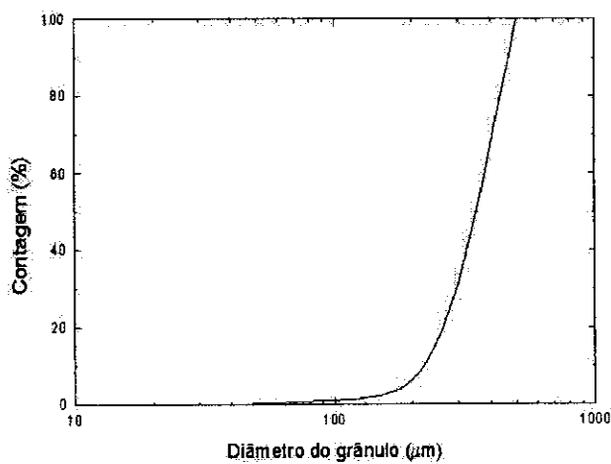


Figura 4.43: Distribuição do tamanho dos grânulos produzidos na indústria.

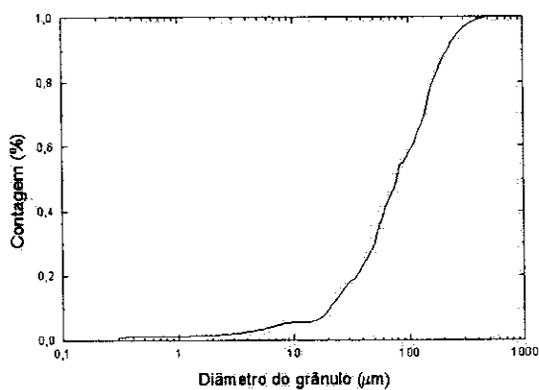


Figura 4.44: Distribuição do tamanho de grânulos da alumina produzida no IPEN: material recolhido na base da câmara.

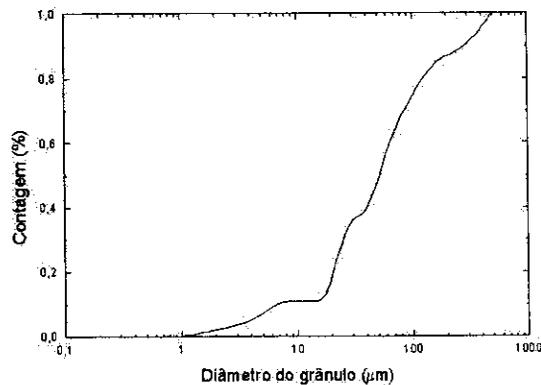


Figura 4.45: Distribuição do tamanho de grânulos da alumina produzida no IPEN: material recolhido na base da câmara.

As figuras 4.41 e 4.42 são as curvas de distribuição granulométrica das partículas que constituem os grânulos de massa cerâmica da indústria e da alumina A16, respectivamente. O valor médio das partículas da massa cerâmica é de $12,8 \mu m$, com 10% das partículas abaixo de $2,3 \mu m$ e 10% acima de $25,3 \mu m$. As de alumina têm em média $0,5 \mu m$, com 10% abaixo de $0,09 \mu m$ e 10% acima de $1,93 \mu m$; confirma-se com a análise no CILAS, portanto, o tamanho de partículas da alumina A16 observado no microscópio eletrônico.

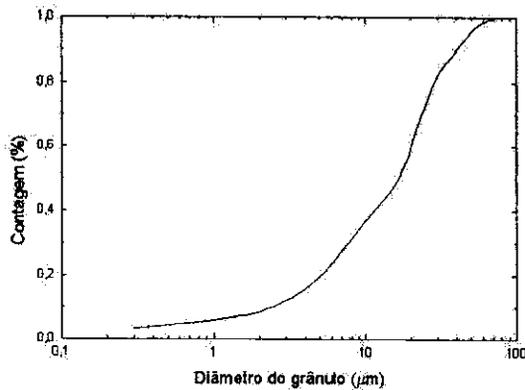


Figura 4.46: Distribuição do tamanho de grânulos da alumina produzida no IPEN: material recolhido no ciclone.

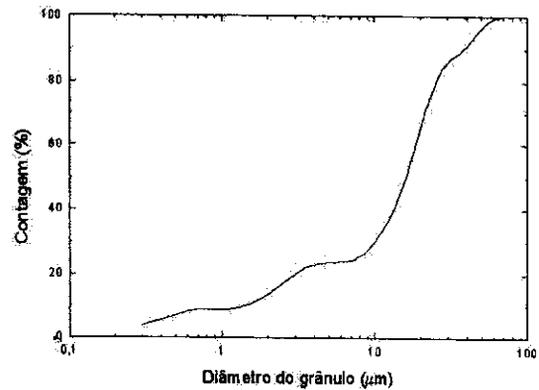


Figura 4.47: Distribuição do tamanho de grânulos da alumina produzida no IPEN: material recolhido na base da câmara.

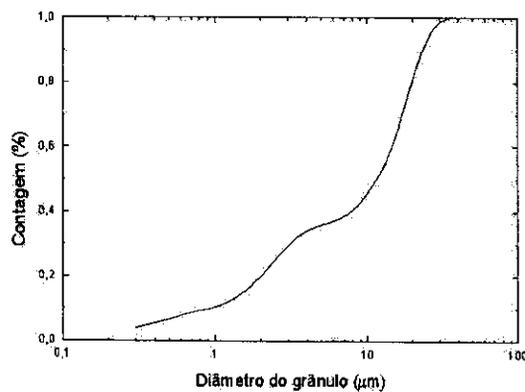


Figura 4.48: Distribuição do tamanho de grânulos da alumina produzida no IPEN: material retirado da parede e do ciclone.

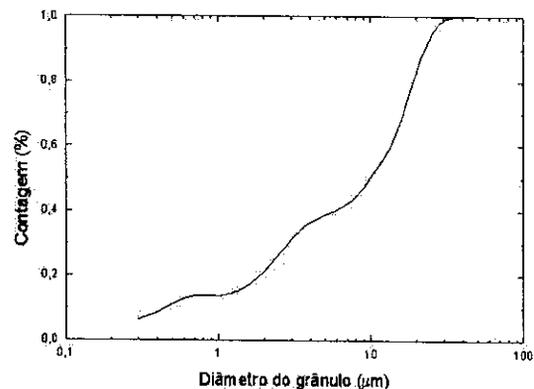


Figura 4.49: Distribuição do tamanho de grânulos da alumina produzida no IPEN: material retirado da parede e do ciclone.

Os grânulos de massa cerâmica medem em média $355 \mu m$, como mostra a curva da figura 4.43. Os grânulos de alumina apresentaram três padrões de distribuição granulométrica. O primeiro padrão, *P1*, é o das curvas 4.44 e 4.45, com diâmetro médio de,

respectivamente, 75 e 52 μm . Na análise da figura 4.44, 10% dos grânulos estão abaixo de 20 μm e 10% estão acima de 218 μm . As figuras 4.46 e 4.47 formam o segundo padrão de granulometria, *P2*, com tamanho médio de grânulo de aproximadamente 16 μm ; em ambos os casos, 10% dos grânulos estão abaixo de 2 μm e 10% acima de 40 μm . O último padrão de distribuição, *P3*, são as curvas 4.48 e 4.49; o diâmetro médio nos dois casos é de 10 μm , com 10% abaixo de 1 μm e 10% acima de 20 μm .

Conclui-se, com base nos resultados das análises de granulometria, que os grânulos produzidos pelo processo de atomização no Büchi têm diâmetro médio que varia entre 10 e 70 μm . A tabela 4.2 resume os resultados da distribuição de tamanho de partículas e de grânulos do material produzido no IPEN e na indústria.

Tabela 4.2: Distribuição granulométrica das partículas e dos grânulos do material produzido no IPEN e na indústria.

<i>Material</i>	<i>Tamanho médio das partículas (μm)</i>	<i>Tamanho médio dos grânulos (μm)</i>
Massa cerâmica industrial	12,8	355
Alumina do grupo I - <i>P3</i>	0,5	10
<i>P2</i>	0,5	16
<i>P1</i>	0,5	52
<i>P1</i>	0,5	75
Alumina do grupo II	2,7	

Capítulo 5

Água e suspensão de alumina

Neste capítulo são apresentados os experimentos numéricos realizados para testar o programa simulador desenvolvido. Relatam-se testes de secagem de gotículas de água e de suspensão de alumina.

As equações 3.1 a 3.13 são resolvidas para o estudo da influência da fase gasosa na fase dispersa, e vice-versa. Os primeiros resultados obtidos com as simulações foram os da evaporação de gotículas de água dentro de uma câmara com fluxo de ar quente. Em seguida, a água é substituída pela suspensão de alumina e os perfis de velocidade, temperatura e umidade do ar de secagem e o histórico de temperatura e de massa das gotas de suspensão são determinados. O código computacional utilizado nos ensaios numéricos é o desenvolvido por Patankar [42], Favalli [43] e Bianchini [44].

5.1 Evaporação de gotas de água

A opção de simular a evaporação de água (fase dispersa) numa câmara de secagem com fluxo de ar (fase gasosa) na primeira etapa do trabalho foi em parte devido à simplicidade do sistema bifásico ar-água, e em parte devido à água ser sempre um dos componentes de suspensões de produtos cerâmicos. Portanto, a inclusão de suas propriedades na modelagem é, de toda forma, obrigatória. O domínio computacional, as condições iniciais e de contorno usados para resolução das equações são os apresentados nas seções 3.3 e 3.4 do capítulo 3.

Para a modelagem da evaporação de gotas de água, foi implementado o modelo de Crowe [29, 35], que simula somente a secagem de gotas líquidas, ou seja, materiais que ao evaporarem não deixam resíduos sólidos; para tanto, foram efetuados ajustes no código para o escoamento do ar de secagem através da câmara e para os cálculos da troca de calor e de massa entre as fases dispersa e gasosa.

As equações do escoamento do ar de secagem dentro da câmara, sob as condições descritas na seção 3.4, são resolvidas primeiro. Após sua convergência, pois o método é iterativo, dá-se início à resolução das equações referentes às gotas injetadas nesse ambiente. A partir dos resultados, é possível obter os perfis de temperatura, velocidade e umidade do gás de secagem modificados pela presença das gotículas. Nesse novo ambiente, a troca

de calor, a de massa e as trajetórias das gotas são novamente determinados. Os cálculos se repetem até que os valores das variáveis dependentes de ambas as fases não mais se alterem. Foram conduzidos alguns testes com a posição e o ângulo de injeção das gotas de água, alterando-se diretamente o parâmetro desejado. Os diferentes perfis do gás e do material demonstram a versatilidade do código.

5.1.1 Perfis do gás de secagem

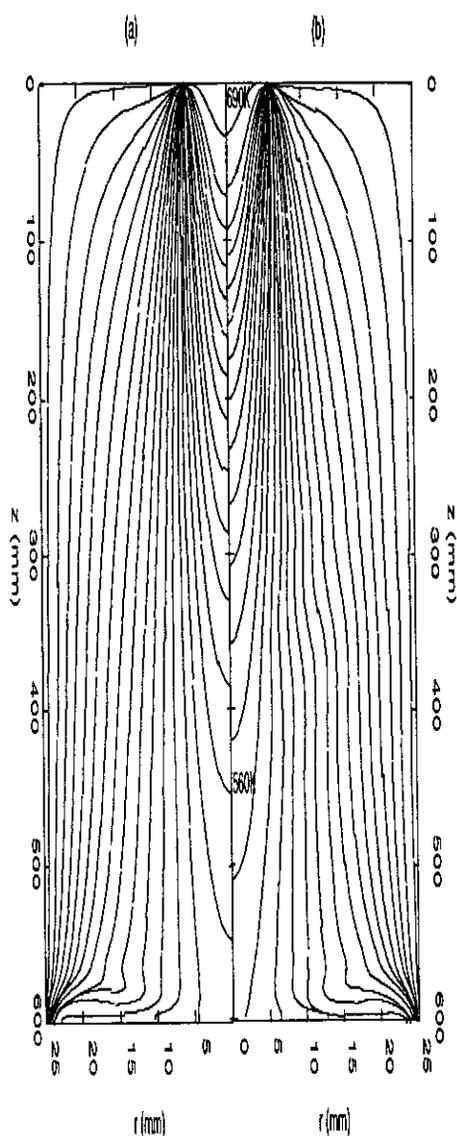


Figura 5.1: Isotermas do gás (a) antes e (b) depois da injeção das gotas de água. Linha mais interna de 690 K, diminuindo em intervalos de 10 K.

As isotermas do gás dentro do secador são mostradas na figura 5.1 antes e depois da

injeção das gotas de água. Como a taxa de injeção de material é pequena, apenas 1,5% da vazão do ar de secagem, a redução na temperatura do gás também o é, variando de 1 a 2% no eixo de simetria. A região central da câmara é a mais quente. Se o material a ser seco não for termolábil, isto é, um material que não se deteriora a altas temperaturas, e a umidade final requerida for pequena, esse é o local mais propício para injetá-lo; isso permite que uma maior taxa de material possa ser processada.

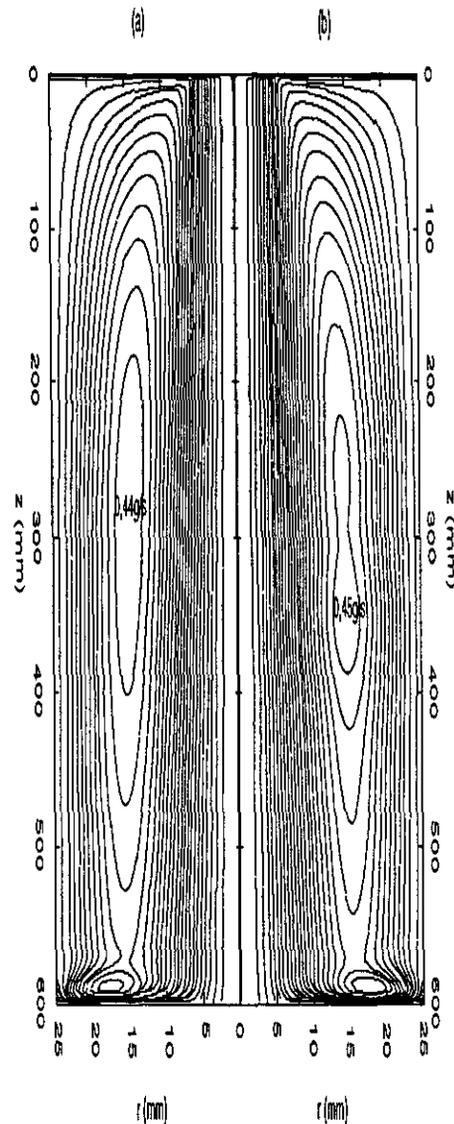


Figura 5.2: Linhas de fluxo do gás (a) antes e (b) depois da injeção das gotas de água. Linha mais interna (próxima ao eixo de simetria) de $0,22 \text{ g/s}$, aumentando em intervalos de $1 \times 10^{-2} \text{ g/s}$.

A influência das gotas nas linhas de fluxo e na velocidade do ar é menor que no campo de temperaturas, como pode-se observar, nas figuras 5.2 e 5.3, os perfis antes e

depois da injeção do material. Devido as regiões de contorno que representam as paredes lateral, superior e inferior, cria-se uma região de recirculação na qual, eventualmente, as gotas podem ficar presas, aumentando seu tempo de residência dentro do secador. Em contrapartida, há, no caso das gotas entrarem nessa região, a possibilidade de choque com as paredes da câmara.

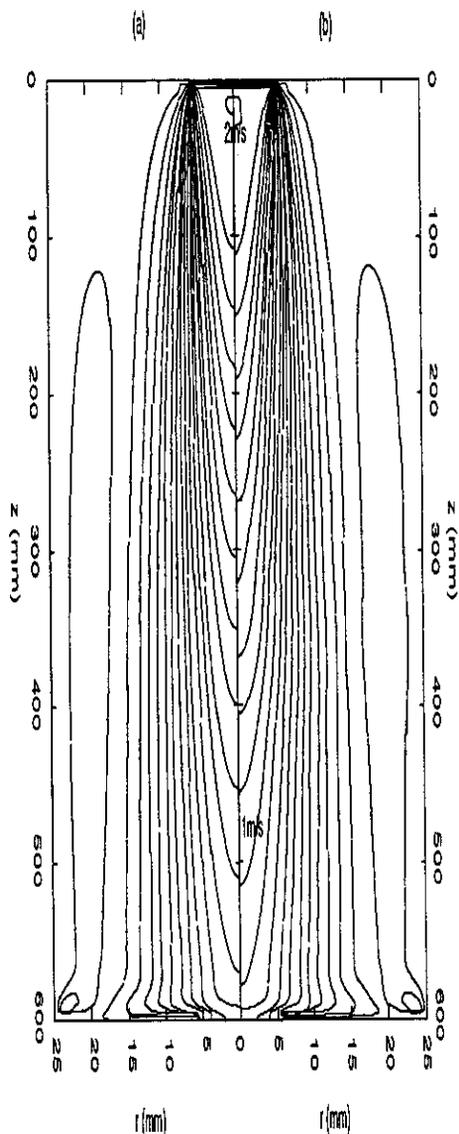


Figura 5.3: Linhas de velocidade constante do gás (a) antes e (b) depois da injeção das gotas de água. Linha mais interna de 2 m/s , diminuindo em intervalos de $0,1\text{ m/s}$.

5.1.2 Variação da trajetória com a posição e o ângulo de injeção

Nestes testes foram ensaiadas gotas de três diâmetros distintos, 30, 40 e 50 μm , que são próximos aos dos grânulos produzidos no atomizador usado nos ensaios experimentais

deste trabalho. Cada uma dessas gotas de diâmetros diferentes descreve uma trajetória possível e representa uma porcentagem do total de massa injetada no sistema. Na modelagem, a injeção perpendicular de gotas na câmara corresponde a um ângulo de 0° , aumentando no sentido anti-horário. A figura 5.4 apresenta as trajetórias das gotículas injetadas com um ângulo de 0° . As partículas maiores, e por conseqüência com maior inércia, penetram mais profundamente na câmara, indo além do eixo de simetria (indicado pela coordenada radial negativa), enquanto que as menores, e mais leves, são arrastadas mais facilmente pelo gás de secagem. Quando o ângulo de injeção é alterado, as trajetórias descritas são diferentes: na figura 5.5 as gotas foram injetadas com 75° e na figura 5.6, com 285° .

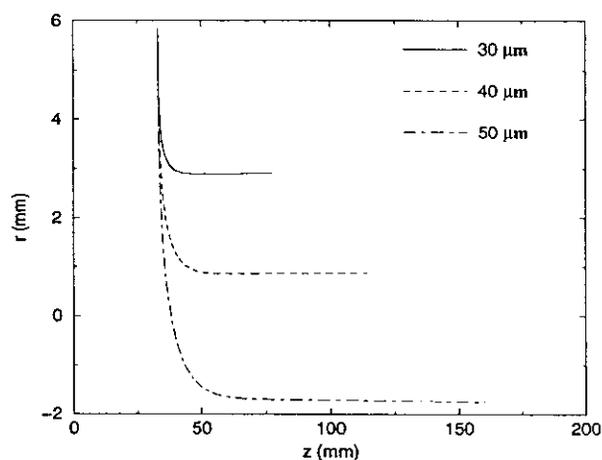


Figura 5.4: Trajetória das gotas de água: injeção com ângulo de 0° .

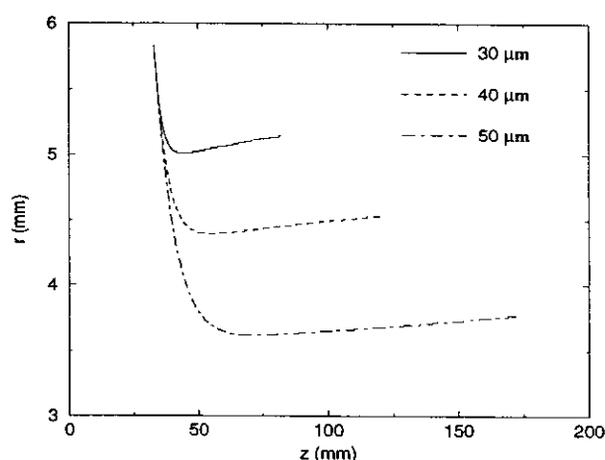


Figura 5.5: Trajetória das gotas de água: injeção com ângulo de 75° .

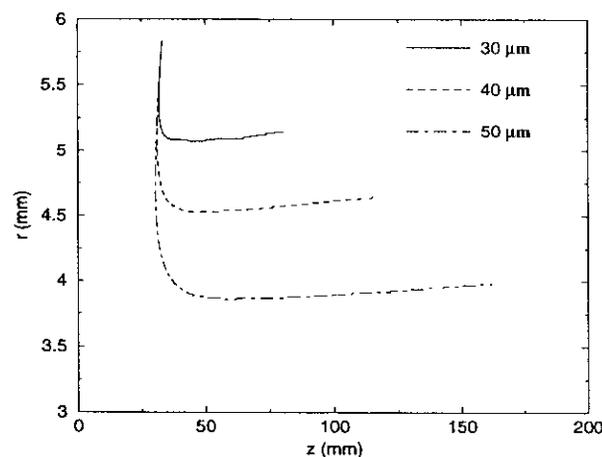


Figura 5.6: Trajetória das gotas de água: injeção com ângulo de 285° .

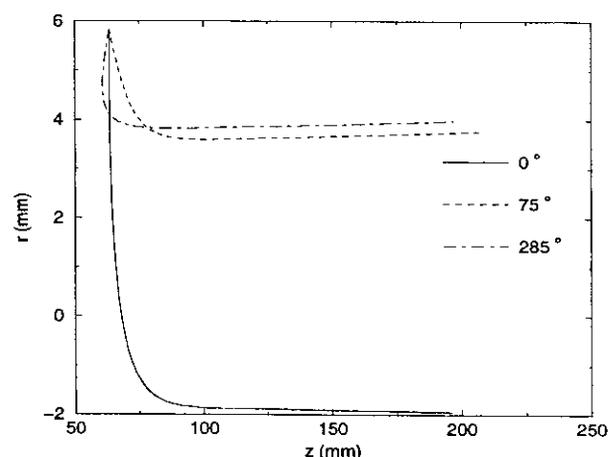


Figura 5.7: Comparação entre trajetórias das gotas injetadas com 0° , 75° e 285° .

A figura 5.7 faz uma comparação entre as gotículas de $50\ \mu\text{m}$ injetadas com ângulos diferentes: 0 , 75 e 285° . Nota-se que há uma forte redução na penetração das gotas, mas a distância axial que elas percorrem para que se evaporem por completo não é muito alterada. Entretanto, as condições experimentadas em cada caso são bastante diferentes. A diferença de temperatura é de $80\ \text{K}$ entre a região próxima ao eixo de simetria e a de coordenada radial de aproximadamente $4\ \text{mm}$.

Como se trata de evaporação de gotas de água, as trajetórias descritas são interrompidas bem antes do final do domínio de cálculo e indicam completa evaporação dentro do secador, como pode-se notar na figura 5.5, por exemplo.

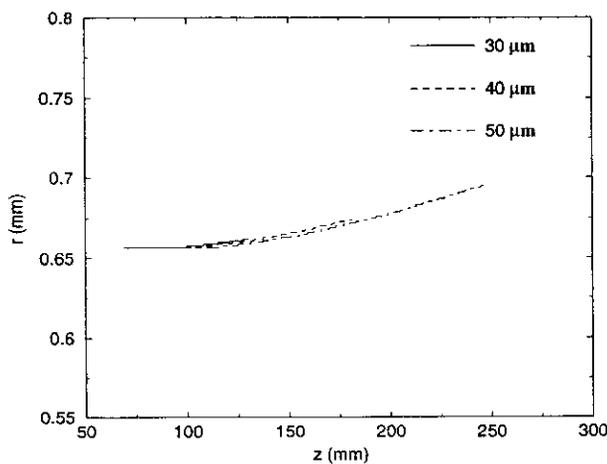


Figura 5.8: Trajetória das gotas de água: injeção com ângulo de 95° .

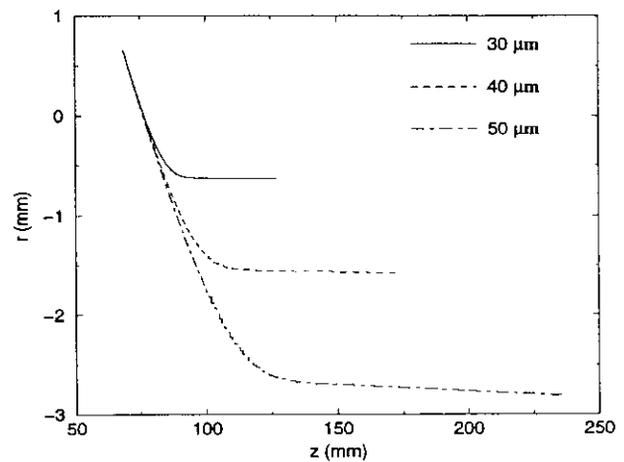


Figura 5.9: Trajetória das gotas de água: injeção com ângulo de 90° .

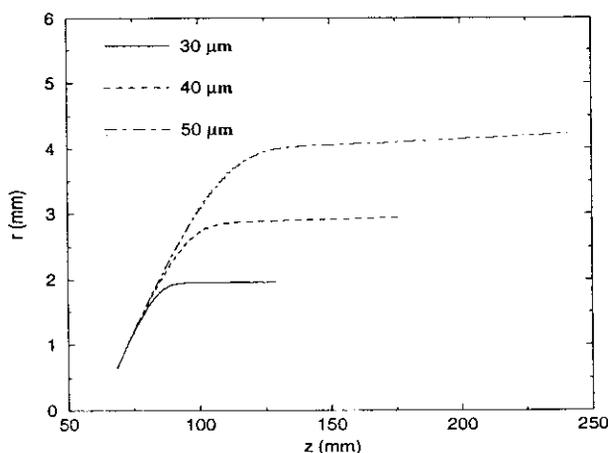


Figura 5.10: Trajetória das gotas de água: injeção com ângulo de 85° .

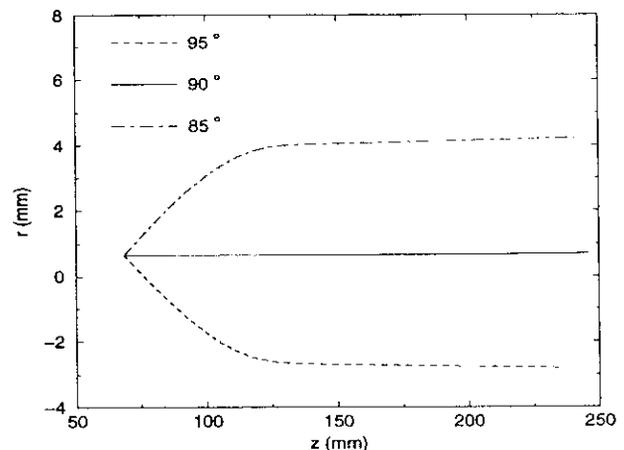


Figura 5.11: Comparação entre trajetórias das gotas injetadas com 85 , 90 e 95° .

Diversas aplicações que se utilizam da secagem por atomização fazem-na em fluxo concorrente, gás e suspensão injetados na mesma direção e sentido, pois materiais sensíveis ao calor estão protegidos pela água em sua superfície, que começa evaporar a temperaturas

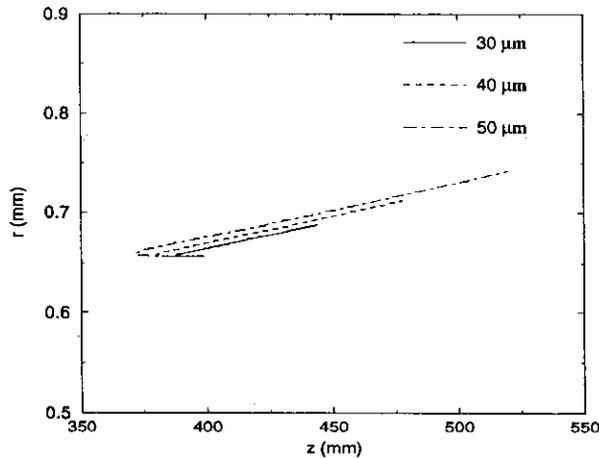


Figura 5.12: Trajetória das gotas água: injeção com ângulo de 270°.

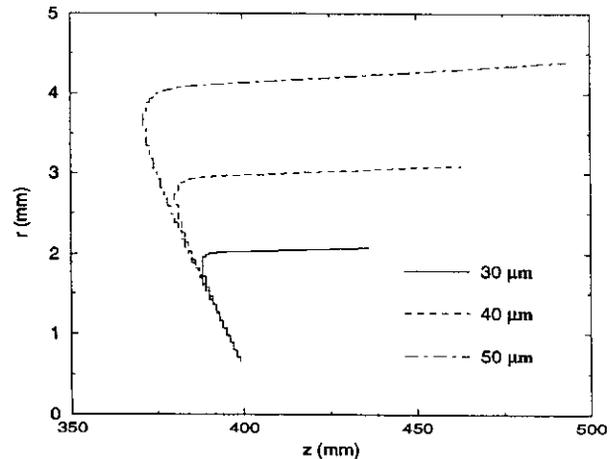


Figura 5.13: Trajetória das gotas água: injeção com ângulo de 265°.

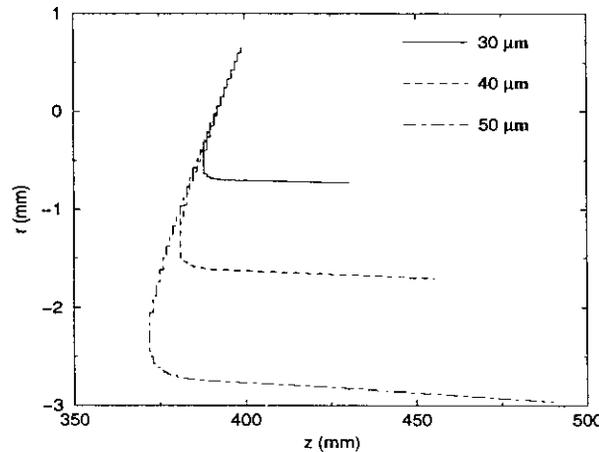


Figura 5.14: Trajetória das gotas de água: injeção com ângulo de 275°.

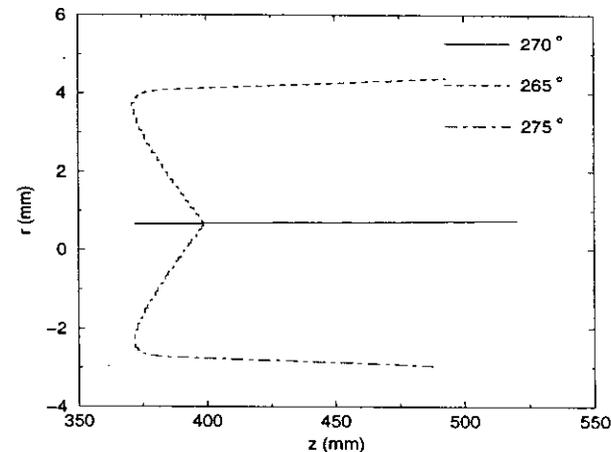


Figura 5.15: Comparação entre trajetórias das gotas injetadas com 265, 270 e 275°.

de aproximadamente 40 ou 50 °C; somente quando não há mais água suficiente para envolver o material é que este começa a ser aquecido, o que acontece em regiões de menor temperatura nessa configuração. Essa situação pode ser simulada com a alteração de alguns parâmetros no programa. Para que ficasse mais evidente a injeção paralela ao eixo, a velocidade da partícula foi aumentada de 2,5 para 12 m/s; mantêm-se todos os outros parâmetros. A figura 5.8 mostra a trajetória das gotas injetadas nessas condições. Há pouco desvio da condição paralela assumida inicialmente, e este desvio deve-se às linhas de fluxo do gás de secagem que apresentam-se ligeiramente inclinadas devido às paredes da câmara. Quando o ângulo de injeção é alterado, as trajetórias são modificadas, como mostram as figuras 5.9 e 5.10. Comparando-se os trajetos das partículas com 50 μm de diâmetro injetadas com 85, 90 e 95°, figura 5.11, nota-se que o desvio é relativamente grande; essa mudança nas trajetórias é diretamente proporcional à velocidade de injeção da gota e, portanto, quanto maior a velocidade, mais longe da posição inicial ela irá.

Outro arranjo é o fluxo misto. A principal vantagem da secagem em fluxo misto é que a altura do secador é menor que a do secador de fluxo concorrente, pois o material é injetado na base da câmara, de baixo para cima, percorrendo uma certa distância e, posteriormente, devido aos efeitos de gravidade, retornam secos para a base. O gás de secagem é, em geral, injetado no topo da câmara. A figura 5.12 apresenta as trajetórias das gotas injetadas em fluxo misto, com uma velocidade inicial de 12 m/s . O desvio da posição inicial de injeção deve-se também à inclinação das linhas de fluxo que nessa região são maiores. Variando-se o ângulo de injeção em 5° , as novas trajetórias são as mostradas nas figuras 5.13 e 5.14. Utilizando-se as gotículas de $50\ \mu\text{m}$ injetadas em 265 , 270 e 285° , figura 5.15, pode-se visualizar o impacto da alteração desse parâmetro: os desvios são relativamente grandes, como no caso da injeção concorrente, e mostram que, dependendo da velocidade de injeção e do tamanho da gota, pode haver choque do material com as paredes da câmara de secagem.

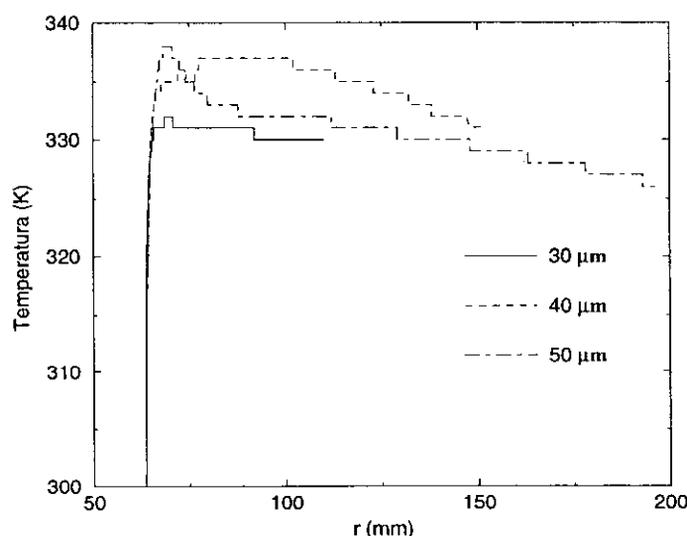


Figura 5.16: Temperatura das gotas de água ao longo de sua trajetória.

A temperatura das gotas ao longo de suas trajetórias são mostradas na figura 5.16; ela não ultrapassa a temperatura de bulbo úmido, aproximadamente $50\ ^\circ\text{C}$ para a água, pois ao atingir esse valor, todo o calor fornecido pelo gás às gotas é usado para evaporá-las.

5.2 Secagem da suspensão de alumina

Nessa etapa do trabalho, as gotas de água foram substituídas por gotas de suspensão de alumina. Para simular o sistema ar-suspensão, implementou-se o modelo de troca de calor e de massa para o segundo período de secagem, mantendo-se o modelo usado para evaporação da água. Torna-se possível, portanto, a simulação da secagem de suspensões cerâmicas com a troca de calor e de massa entre as fases no segundo período calculada de modo diferenciado daquele do primeiro período de secagem. A resolução das equações

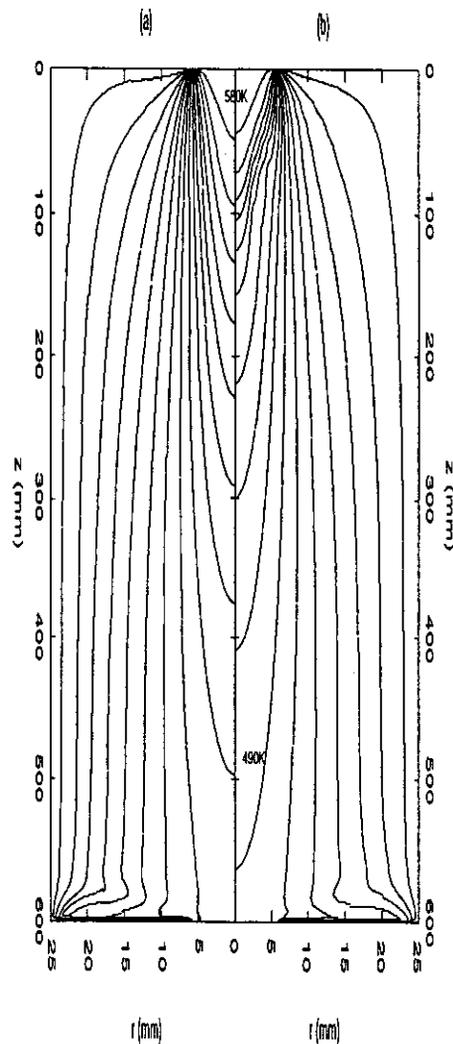


Figura 5.17: Isotermas do gás (a) antes e (b) depois da injeção das gotas de suspensão de alumina. Linha mais interna de 580 K, diminuindo em intervalos de 10 K.

de ambas as fases, gasosa e dispersa, é feita de forma iterativa, como descrito anteriormente na seção 5.1. O domínio de cálculo, as condições iniciais e de contorno foram essencialmente as descritas na seção 3.4, modificando-se somente a taxa de alimentação de material que passou a ser de 3% do fluxo de gás, isto é, de $0,4 \text{ l/min}$. A quantidade inicial de água na suspensão foi de 50% (base seca).

As principais dificuldades encontradas na implementação desse modelo foram de caráter numérico. Algumas variáveis que diminuíam de valor ficavam tão pequenas que acabavam gerando divisões por zero, fazendo com que os cálculos fossem interrompidos. Outra fonte de problemas que produzia resultados incoerentes foi a adoção acidental de diferentes sistemas de unidades: é fácil cometer erros desse tipo pois a quantidade de variáveis, parâmetros e propriedades do gás e do material é extremamente grande.

Os testes paramétricos realizados com as gotas de água, posição e ângulo de injeção,

foram também efetuados para as gotas de suspensão de alumina.

5.2.1 Perfis do gás de secagem

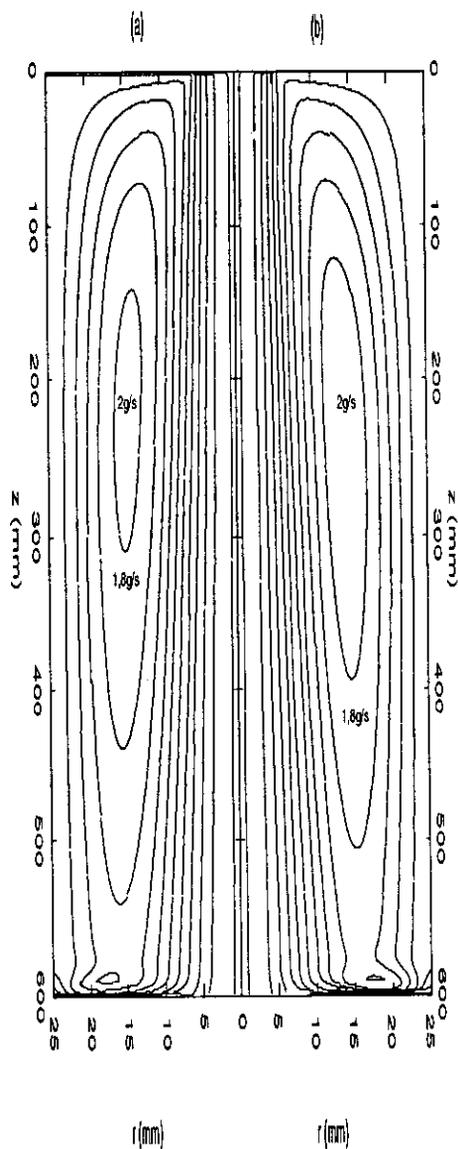


Figura 5.18: Linhas de fluxo do gás (a) antes e (b) depois da injeção das gotas de suspensão de alumina. Linha mais interna (próxima ao eixo de simetria) de $0,001 \text{ g/s}$, aumentando em intervalos de $2 \times 10^{-2} \text{ g/s}$.

As isothermas do gás antes e depois da injeção das gotas de suspensão de alumina são apresentadas na figura 5.17. A temperatura é reduzida principalmente perto do ponto de injeção devido à transferência de calor do gás para o material; pode-se perceber a retração das linhas nessa região. O decréscimo da temperatura é de 5 a 7% na região do eixo da

câmara. O perfil de velocidades, como mostra a figura 5.18, é bem menos afetado que o perfil de temperatura, e isso se deve, provavelmente, à baixa taxa de fluxo de material e à pequena velocidade inicial assumida para as gotículas de suspensão.

5.2.2 Variação da trajetória com a posição e o ângulo de injeção

As gotas de suspensão de alumina são injetadas com três diâmetros distintos, 30, 40 e 50 μm , da mesma maneira que para o caso das gotas de água. As trajetórias descritas pelas gotas injetadas em fluxo concorrente, com ângulo de 90° , são apresentadas na figura 5.19. O desvio nas trajetórias são devidos às linhas de fluxo que se curvam por causa da existência das paredes da câmara.

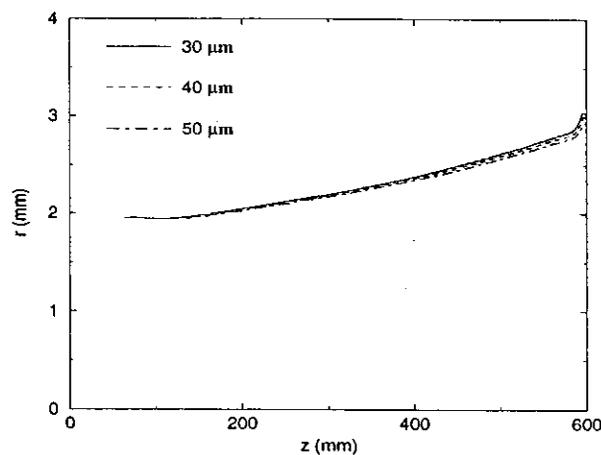


Figura 5.19: Trajetória das gotas/grânulos de alumina: injeção com ângulo de 90° .

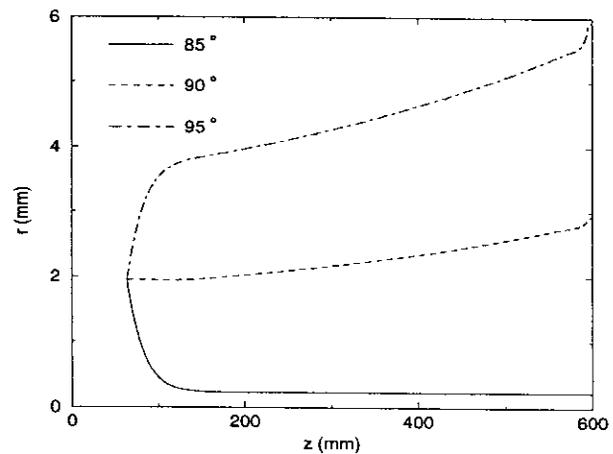


Figura 5.20: Comparação entre as trajetórias das gotas/grânulos de alumina injetados com 85° , 90° e 95° .

Variando-se o ângulo em 5° , as trajetórias são alteradas; a figura 5.20 compara as trajetórias das gotas de 50 μm de diâmetro inicial injetadas com ângulos de 85° , 90° e 95° . O comportamento das gotas, ou grânulos, é semelhante ao apresentado pelas gotículas de água, porém as trajetórias não são mais interrompidas antes do final do domínio e, provavelmente devido às diferenças nas propriedades de transporte desses dois materiais, fica evidente no caso concorrente, por exemplo, que a injeção foi paralela ao eixo mesmo usando-se 2,5 m/s de velocidade inicial para as gotas.

A figura 5.21 apresenta as trajetórias de partículas de diferentes tamanhos, injetadas em fluxo misto; o desvio da posição inicial deve-se também às linhas de fluxo do gás. Variando-se o ângulo em 5° , figura 5.22, as gotas de suspensão têm um comportamento semelhante ao caso da injeção mista das gotas de água: as trajetórias das gotas são amplamente desviadas, e este desvio é acentuado à medida que a velocidade de injeção da gota aumenta, podendo até atingir a parede antes de estar completamente seca. Em alguns testes experimentais, notou-se a formação de depósitos numa determinada região da parede do secador, que acontecia devido à pequena descentralização do bico injetor

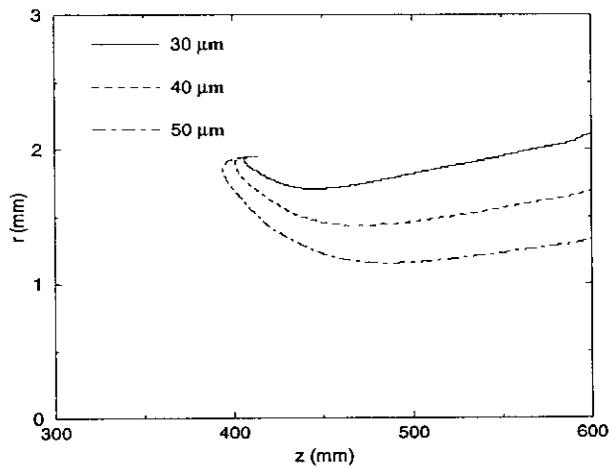


Figura 5.21: Trajetória das gotas/grânulos de alumina: injeção com ângulo de 270° .

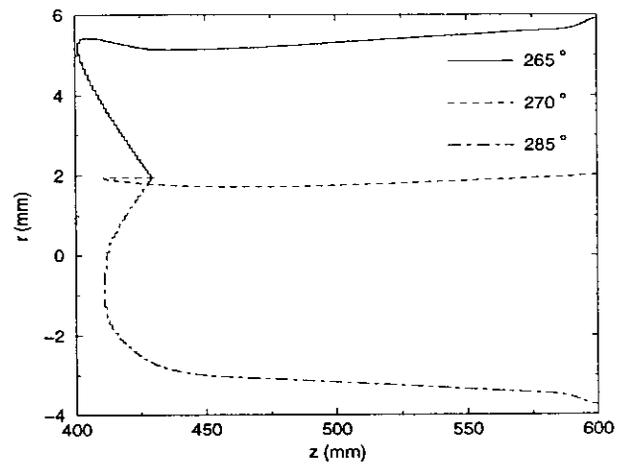


Figura 5.22: Comparação entre as trajetórias das gotas/grânulos de alumina injetadas com 265° , 270° e 275° .

(ver capítulo 4); os resultados numéricos obtidos na simulação de diversos ângulos de injeção podem, de forma qualitativa, explicar tais depósitos.

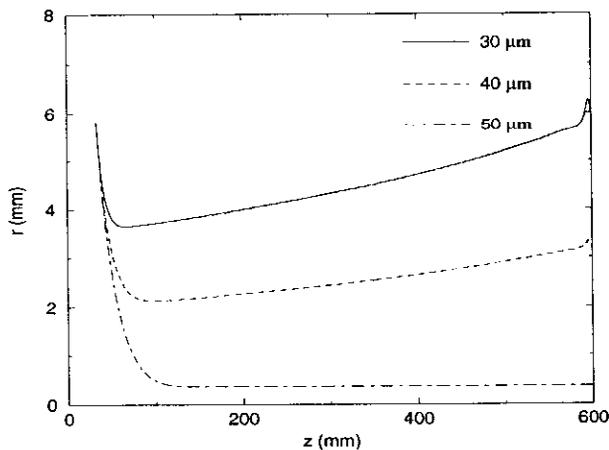


Figura 5.23: Trajetória das gotas/grânulos de alumina: injeção com ângulo de 75° .

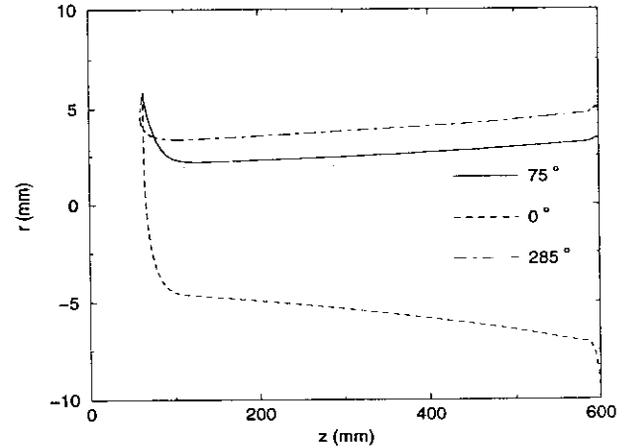


Figura 5.24: Comparação entre as trajetórias das gotas/grânulos de alumina injetadas com 0° , 75° e 285° .

O último caso simulado foi o da injeção em fluxo concorrente para partículas injetadas com um ângulo de 75° , figura 5.23. Com a mudança do ângulo, as trajetórias se modificam. A comparação entre os trajetos descritos pelas gotas, ou grânulos, injetadas com diferentes ângulos (0° , 75° e 285°) é feita na figura 5.24. A penetração das gotas de suspensão de alumina com relação às gotas de água é bem mais acentuada, certamente, por causa das diferenças nas propriedades de transporte de ambos os materiais.

Na figura 5.25 são apresentadas as temperaturas das gotas de suspensão de alumina

ao longo de suas trajetórias dentro do secador. Enquanto há água suficiente para cobrir a superfície da gota, a temperatura é a de bulbo úmido ($\approx 50^\circ\text{C}$ para a água); porém, ao passar do período de taxa de secagem constante para o de taxa decrescente, a temperatura do grânulo começa a aumentar até entrar em equilíbrio com a temperatura do gás de secagem, pois a água restante não envolve mais o material. A curva calculada no programa para as gotas de suspensão, que resultam em grânulos de alumina num dado instante, tem o comportamento esperado, como pode-se verificar pela semelhança entre o perfil obtido com as simulações e o perfil de temperatura teórico, figura 5.26.

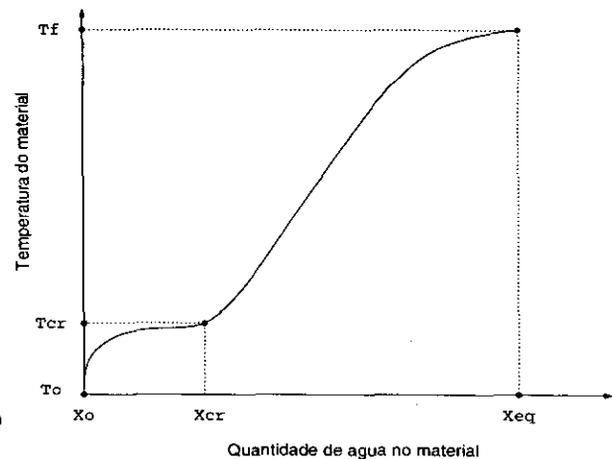
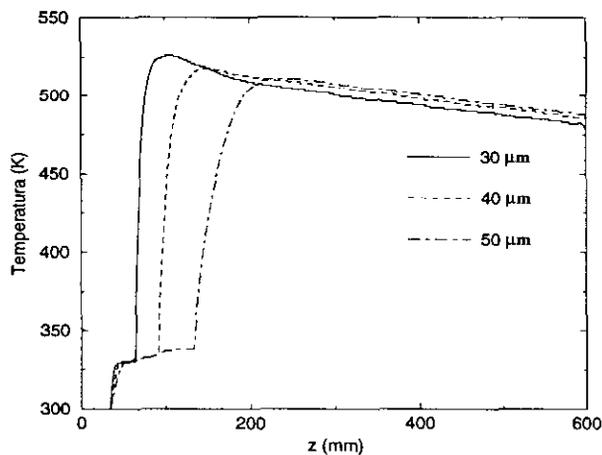


Figura 5.25: Temperatura das gotas/grânulos de alumina ao longo de sua trajetória.

Figura 5.26: Perfil teórico de temperatura de materiais submetidos à secagem.

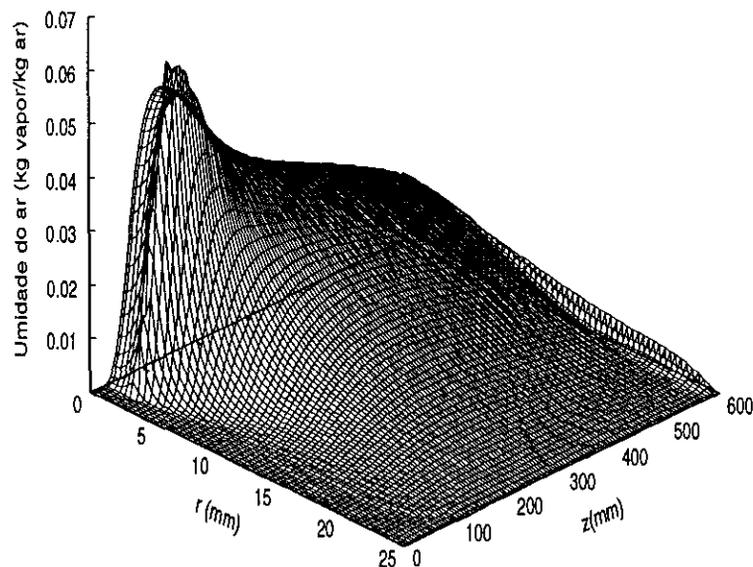


Figura 5.27: Perfil de umidade do ar dentro da câmara de secagem.

Após a injeção das gotas de suspensão de alumina, a umidade do gás de secagem

aumenta em consequência da evaporação da água contida no material, como evidencia a figura 5.27. Mesmo com uma taxa de alimentação pequena, a umidade absoluta do ar, que no início era nula, chega a 0,06 kg vapor/kg de ar nas regiões de maior concentração de vapor.

Capítulo 6

Secador Büchi

Neste capítulo são apresentadas as simulações numéricas e comparações com os ensaios experimentais realizados no secador Büchi.

O equipamento utilizado nos ensaios experimentais, descrito no capítulo 4, foi simulado para verificar a consistência do modelo empregado para o sistema de secagem de suspensões cerâmicas por atomização. As equações são resolvidas da mesma forma e usando o mesmo programa que nas simulações apresentadas no capítulo anterior para as gotas de água e de suspensão de alumina, porém com base nos parâmetros de operação e na geometria da câmara do mini-secador Büchi.

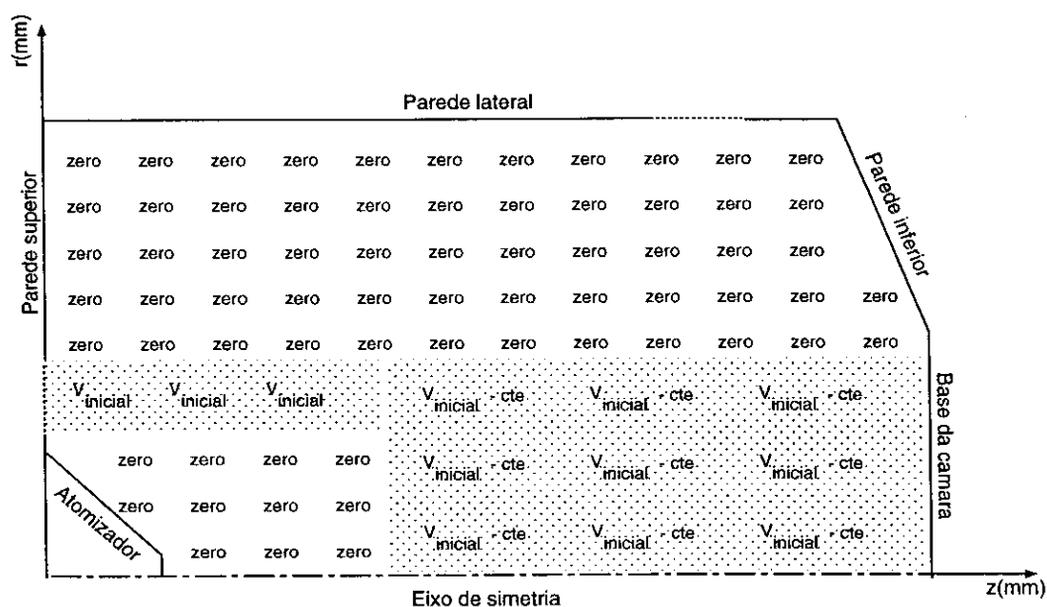


Figura 6.1: Esquema da estimativa inicial para a velocidade dentro da câmara de secagem com entrada descentralizada.

Algumas alterações geométricas e paramétricas necessárias para simulação do Büchi exigiram atenção especial. A condição inicial para a velocidade do ar de secagem na

câmara com entrada descentralizada foi difícil de ser estabelecida e causava divergência nos resultados. A condição inicial que eliminou essa divergência é esquematizada na figura 6.1: na região perto da entrada da câmara, coloca-se o valor total da velocidade ($V_{inicial}$) e mais adiante se reduz esse valor ($V_{inicial}-cte$); nas outras regiões a velocidade é zerada. Em certos casos, como os que simulavam temperatura menor para o gás na entrada ou vazão elevada, por exemplo, esse artifício não era suficiente e foi necessário também se valer de uma introdução mais lenta e gradual do valor da velocidade inicial.

O decréscimo de massa de água no segundo período de secagem apresentou uma queda relativamente elevada, contrariando as teorias de secagem. Isso acontece porque o modelo não leva em conta que a água dentro do grânulo tem temperatura diferente, e por certo menor, que a da alumina. Logo, a pressão de vapor, que cresce em função da temperatura, é maior do que a real, gerando valores altos para a taxa de secagem e causando divergência nos resultados pois, em certos pontos, o gradiente de umidade era acentuado demais e reduzia a temperatura do gás a valores irrealis. A solução se deu com a introdução de um fator de relaxamento para a taxa de secagem.

As medidas de vazão, temperatura de bulbo úmido e seco, os ensaios experimentais e as análises foram usados para alimentar e calibrar o programa, e são também usados como parâmetros de comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e os calculados nas simulações.

O domínio computacional, as condições iniciais e de contorno para o Büchi são diferentes dos utilizados até então. A seção 6.1 apresenta as condições e domínio usados para o equipamento. Os resultados numéricos obtidos são discutidos na seção 6.2. Foi feito um estudo numérico dos parâmetros variados nos ensaios experimentais e a discussão sobre os perfis obtidos nesse estudo está na seção 6.3; outros parâmetros de operação, tais como velocidades de injeção das gotas de suspensão mais altas e o efeito do diâmetro inicial das gotas, entre outros, também foram estudados e são apresentados na seção 6.4.

6.1 Domínio computacional, condições iniciais e de contorno

A figura 6.2 é um esquema com dimensões da metade da câmara de secagem do Büchi, que foi utilizado como base para a determinação do domínio de cálculo para resolução das equações de ambas as fases, dispersa e gasosa, figura 6.3.

A injeção das gotas de suspensão de alumina é feita em fluxo concorrente; o ar de secagem entra pelo topo da câmara e sua saída está localizada na parede lateral. Nesse ponto, fez-se necessário assumir um diâmetro de saída menor que o do equipamento para que se conservasse, em termos relativos, a vazão e a velocidade do gás na saída. A câmara de secagem deste equipamento não possui simetria axial, que é uma das hipóteses do modelo.

Definem-se, com base no domínio computacional adotado, figura 6.3, as condições iniciais e de contorno para simulação do processo de secagem do mini-secador Büchi. A entrada do ar na câmara é feita a temperaturas entre 120 e 220 °C e a velocidades entre

28 e 61 m/s (equivalentes a 20 e 45 m^3/h); esses valores de velocidade inicial são para sua componente axial, pois a componente radial da velocidade nesse ponto é nula. A umidade inicial do gás é calculada através de cartas psicrométricas e das medidas de temperatura de bulbo seco e úmido do ar antes da injeção da suspensão no sistema, variando entre 6×10^{-3} e $1,5 \times 10^{-2}$ kg água/kg ar seco. O valor usado nos programas, exceto naqueles que simulam os experimentos, foi a média de 1×10^{-2} kg água/kg ar seco. A temperatura nas paredes lateral e inferior é constante e estimada, com base em dados experimentais, em 42 °C. As hipóteses assumidas e as condições impostas na seção 3.4 para as variáveis dependentes no eixo de simetria, paredes e saída da câmara permanecem inalteradas.

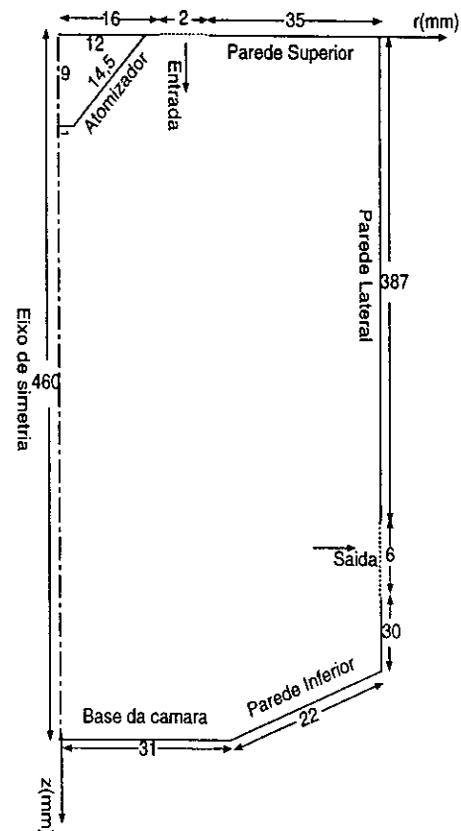
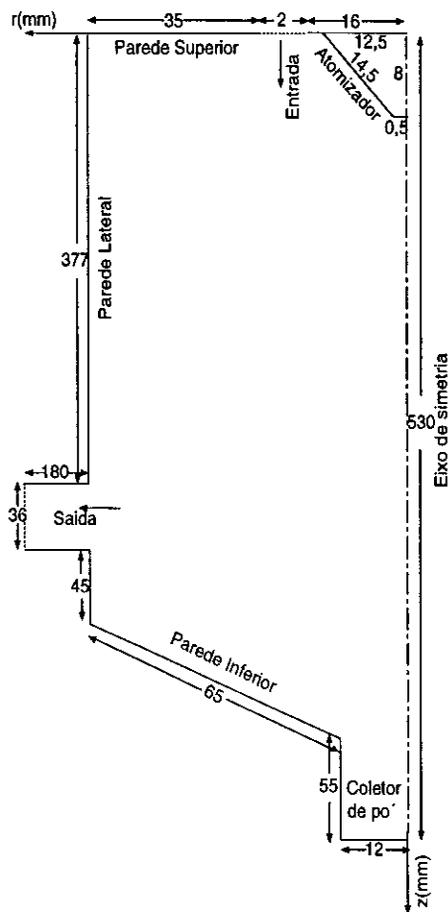


Figura 6.2: Esquema métrico do mini-secador Büchi.

Figura 6.3: Domínio computacional do mini-secador Büchi.

A velocidade de injeção das gotículas de suspensão de alumina é calculada com base na velocidade do ar de atomização e do ar de secagem, através da expressão $\vec{u}_{p_0} = \vec{u} + 0,04\vec{u}_{atz}$ [28]; a velocidade do ar de atomização varia entre 100 e 200 m/s para a configuração externa do bico injetor, e entre 50 e 100 m/s para a configuração interna. A taxa de alimentação de material medida está entre $4,8 \times 10^{-5}$ e $3,6 \times 10^{-4}$ m^3/h . O atomizador é posicionado no centro da câmara, e a injeção das gotas é feita num ângulo de 10°

em relação ao eixo de simetria. Assume-se que a temperatura de injeção do material atomizado seja a ambiente, pois o atomizador é resfriado durante todo o processo. A fração-massa de água da gota de suspensão de alumina no início do processo é de 0,333 kg água/kg suspensão e a do sólido é, conseqüentemente, de 0,667 kg sólido/kg suspensão. A fração-massa de sólidos no grânulo é de 0,87 e foi determinada com base na porosidade do grânulo e na quantidade inicial de água. As análises de granulometria indicaram que os diâmetros dos grânulos medem de 10 a 70 μm e, com base nesse resultado, estabelece-se que a distribuição de diâmetros empregada até o momento, 30, 40 e 50 μm , cada uma representando respectivos 30, 40 e 30% do total de massa injetado no sistema, continua a ser usada nas simulações do Büchi; de qualquer maneira, um estudo numérico variando-se essa faixa de tamanhos foi realizado.

6.2 Consistência dos resultados numéricos

Depois de implementar as modificações necessárias para a simulação do Büchi, simularam-se alguns ensaios experimentais; os valores da taxa de água evaporada, obtidos através das medidas de temperatura de bulbo seco e bulbo úmido realizadas durante a secagem nesses experimentos, podem ser comparados aos calculados pelo programa. As tabelas 6.1 e 6.2 apresentam os parâmetros ensaiados, a taxa de água evaporada medida e calculada, e a diferença percentual entre esses valores para seis ensaios diferentes.

No programa, os valores da taxa de água evaporada são calculados através da integração do fluxo de vapor d'água num corte transversal próximo à saída de gás, em $z = 376 \text{ mm}$. As medições foram feitas depois da bomba de aspiração de ar (ver esquema do aparato experimental no apêndice D).

Tabela 6.1: Parâmetros ensaiados e comparação entre a taxa de água evaporada calculada e medida. Parte I: ensaios de 1 a 3.

<i>Parâmetros de operação</i>	<i>E1</i>	<i>E2</i>	<i>E3</i>
Temperatura inicial do ar ($^{\circ}C$)	140	140	120
Vazão do ar (m^3/h)	33	33	33
Taxa de alimentação (m^3/h)	$3,6 \times 10^{-4}$	$3,6 \times 10^{-4}$	$2,4 \times 10^{-4}$
Vazão do ar de atomização (m^3/h)	0,7	0,6	0,8
Umidade antes da injeção (kg vapor/kg ar)	1×10^{-2}	$1,3 \times 10^{-2}$	$7,4 \times 10^{-3}$
Umidade depois da injeção (kg vapor/kg ar)	$1,9 \times 10^{-2}$	2×10^{-2}	$1,4 \times 10^{-2}$
Taxa de secagem medida (kg/s)	$8,52 \times 10^{-5}$	$7,07 \times 10^{-5}$	$6,17 \times 10^{-5}$
Taxa de secagem calculada (kg/s)	$8,56 \times 10^{-5}$	$7,2 \times 10^{-5}$	$5,75 \times 10^{-5}$
Diferença (%)	0,5	2	7

Tabela 6.2: Parâmetros ensaiados e comparação entre a taxa de água evaporada calculada e medida. Parte II: ensaios de 4 a 6.

Parâmetros de operação	E4	E5	E6
Temperatura inicial do ar ($^{\circ}\text{C}$)	130	140	130
Vazão do ar (m^3/h)	21	33	33
Taxa de alimentação (m^3/h)	$3,6 \times 10^{-4}$	$3,6 \times 10^{-4}$	$2,4 \times 10^{-4}$
Vazão do ar de atomização (m^3/h)	0,8	0,8	0,7
Umidade antes da injeção (kg vapor/kg ar)	$7,6 \times 10^{-3}$	$6,9 \times 10^{-3}$	$5,7 \times 10^{-3}$
Umidade depois da injeção (kg vapor/kg ar)	2×10^{-2}	$1,6 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-2}$
Taxa de secagem medida (kg/s)	$7,81 \times 10^{-5}$	$9,19 \times 10^{-5}$	$7,46 \times 10^{-5}$
Taxa de secagem calculada (kg/s)	$8,68 \times 10^{-5}$	$7,34 \times 10^{-5}$	$5,83 \times 10^{-5}$
Diferença (%)	10	25	28

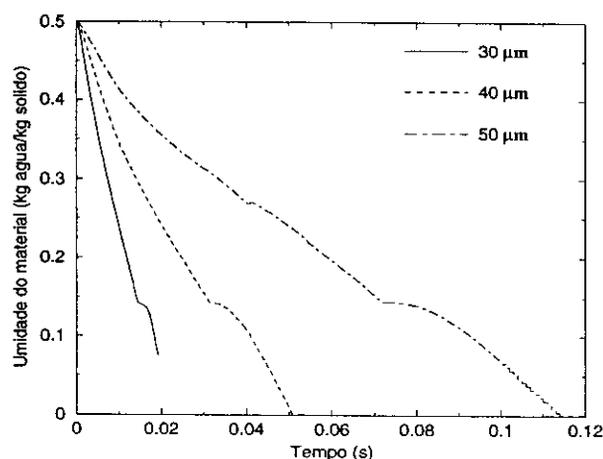


Figura 6.4: Ensaio E1. Umidade do material ao longo do tempo.

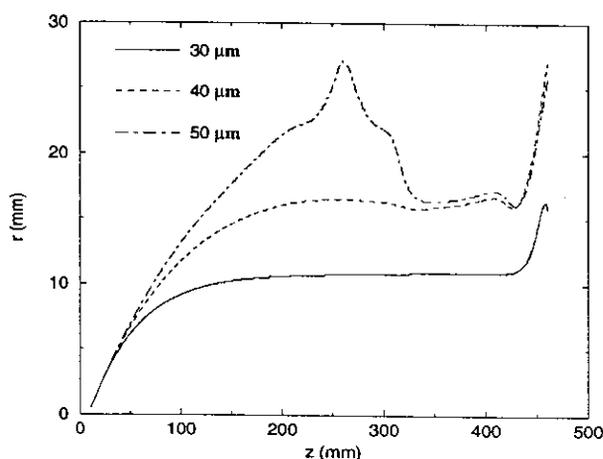


Figura 6.5: Ensaio E1. Trajetória das gotas e grânulos dentro do secador.

Em geral, o material seco no Büchi tem umidade residual menor que 0,5%, conforme análises termogravimétricas apresentadas no capítulo 4. Nos ensaios numéricos, os cálculos de transferência de calor e de massa são interrompidos assim que os grânulos entram no volume de controle imediatamente anterior ao volume que define a base do secador, ou alguma de suas paredes. Portanto, quando as gotas de diâmetros relativamente pequenos alcançam a região da entrada de gás, a região de maior velocidade, são facilmente arrastadas pelo ar de secagem e atingem a base da câmara sem estarem secas por completo, permanecendo com a umidade e a temperatura calculadas até esse volume; nos experimentos, os grânulos que atingem a base da câmara numa situação semelhante a essa não deixam necessariamente de trocar calor e massa com o meio de secagem, pois há recirculação de gás nessa região.

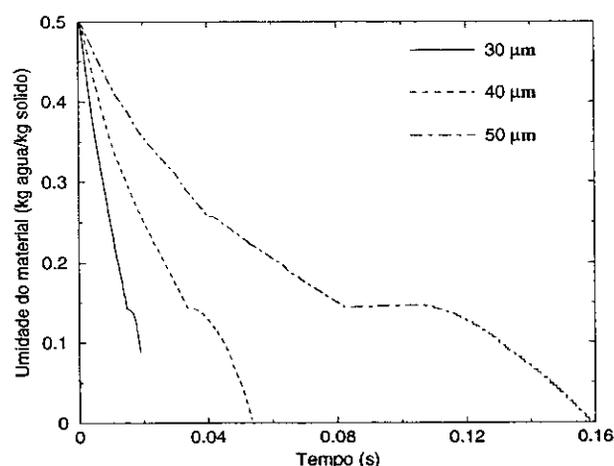


Figura 6.6: Ensaio *E2*. Umidade do material ao longo do tempo.

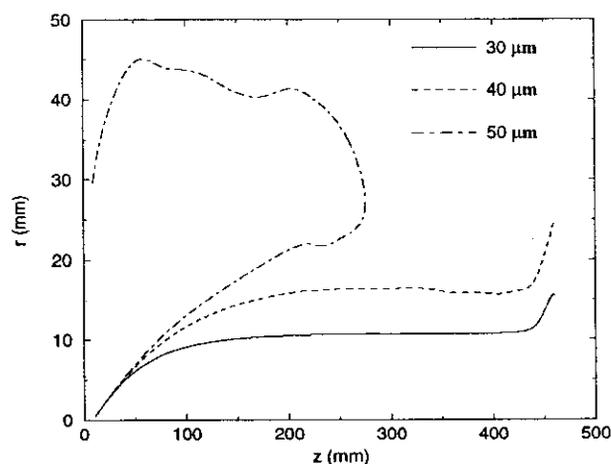


Figura 6.7: Ensaio *E2*. Trajetória das gotas e grânulos dentro do secador.

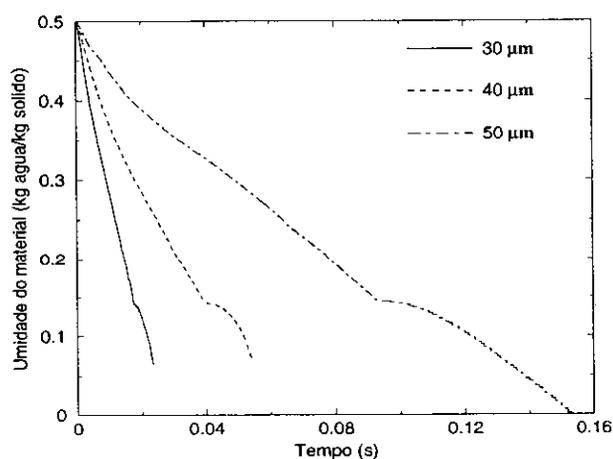


Figura 6.8: Ensaio *E3*. Umidade do material ao longo do tempo.

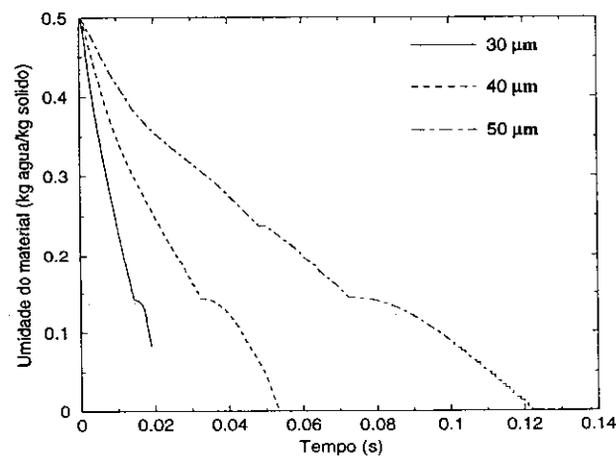


Figura 6.9: Ensaio *E5*. Umidade do material ao longo do tempo.

Nos ensaios *E1* e *E2*, a taxa de água evaporada calculada é maior que a medida, e deveria ser ainda maior se toda a água fosse evaporada, pois, como mostram as figuras 6.4, 6.5, 6.6 e 6.7, as gotas da classe de $30\ \mu\text{m}$ de diâmetro inicial atingem a base da câmara ainda contendo uma pequena quantidade de água. Logo, a diferença entre os valores medidos e calculados para esses dois ensaios deveria ser também maior se a secagem se completasse.

Para os ensaios *E3*, *E5* e *E6*, os valores calculados são menores que os medidos; porém, como pode-se ver nas figuras 6.8, 6.9 e 6.10, ainda havia água nos grânulos que se evaporaria se os cálculos não tivessem que ser interrompidos; as diferenças entre os valores obtidos numericamente e experimentalmente seriam, portanto, menores.

Acredita-se que a diferença entre os valores de taxa de água evaporada que o ensaio

E4 apresentou é a mais próxima da real pois, como mostra a figura 6.11, esse conjunto de parâmetros permitiu a secagem completa de todas as classes de grânulos simuladas.

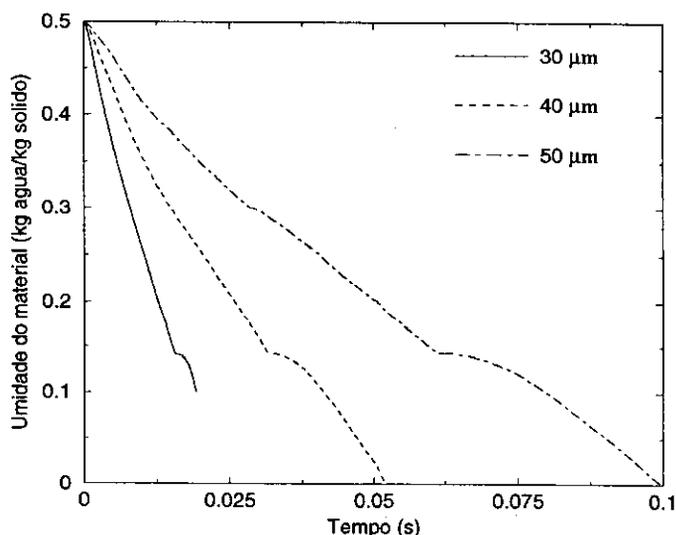


Figura 6.10: Ensaio *E6*. Umidade do material ao longo do tempo.

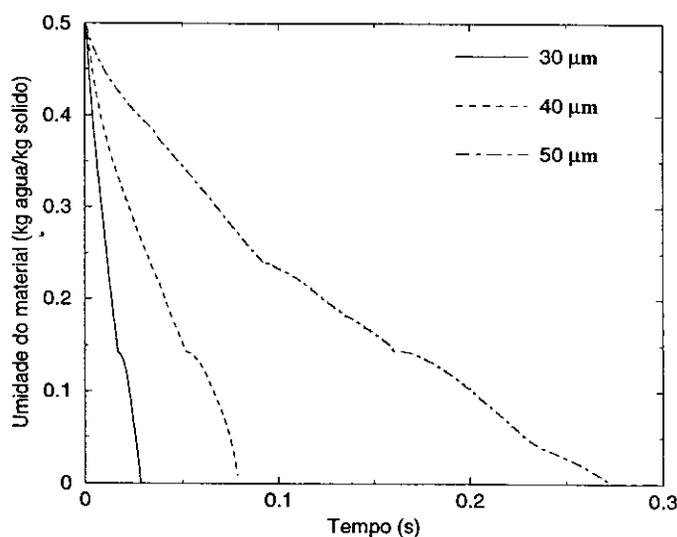


Figura 6.11: Ensaio *E4*. Umidade do material ao longo do tempo.

Pode-se concluir, portanto, que os modelos empregados e o código computacional utilizado são consistentes, e que os valores obtidos nas simulações diferem dos experimentais em 10%, aproximadamente. As principais causas dessa diferença podem ser devidas a diversos fatores: *i*) o cálculo da taxa de secagem é feito, nas medições e no programa, em regiões diferentes do equipamento; *ii*) a velocidade e o ângulo de injeção das gotas não são conhecidos experimentalmente, portanto, os utilizados no programa são valores

aproximados; *iii*) a injeção das gotas no equipamento tem uma componente azimutal, não considerada na modelagem, que influencia não somente na trajetória do material atomizado, como também nos perfis de temperatura e velocidade do gás, que se tornam mais homogêneos; *iv*) hipótese de escoamento laminar, quando na realidade ele é de natureza turbulenta; *v*) fatores numéricos, como, por exemplo, o uso de um modelo discreto de distribuição de diâmetros de gotas e de uma de malha regular.

Os perfis do gás de secagem, antes e depois da injeção, das gotas e dos grânulos de alumina obtidos na simulação do ensaio *E4* são apresentados e discutidos nas seções que seguem.

6.2.1 Gás de secagem antes da injeção

Antes da injeção, os perfis de temperatura, velocidades e concentração de vapor do ar de secagem são calculados. A figura 6.12 mostra o perfil de temperatura dentro da câmara; as regiões da entrada e do centro do secador são as mais quentes, porém à medida que o raio aumenta, a temperatura diminui devido à condição de contorno na parede lateral da câmara.

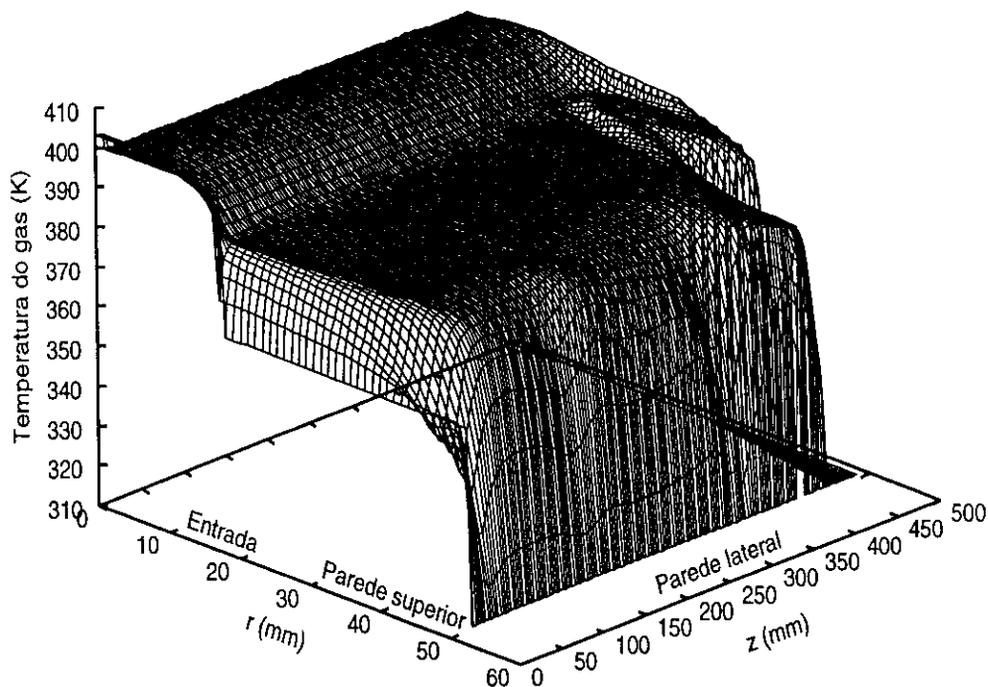


Figura 6.12: Malha tridimensional da distribuição da temperatura do gás antes da injeção das gotas.

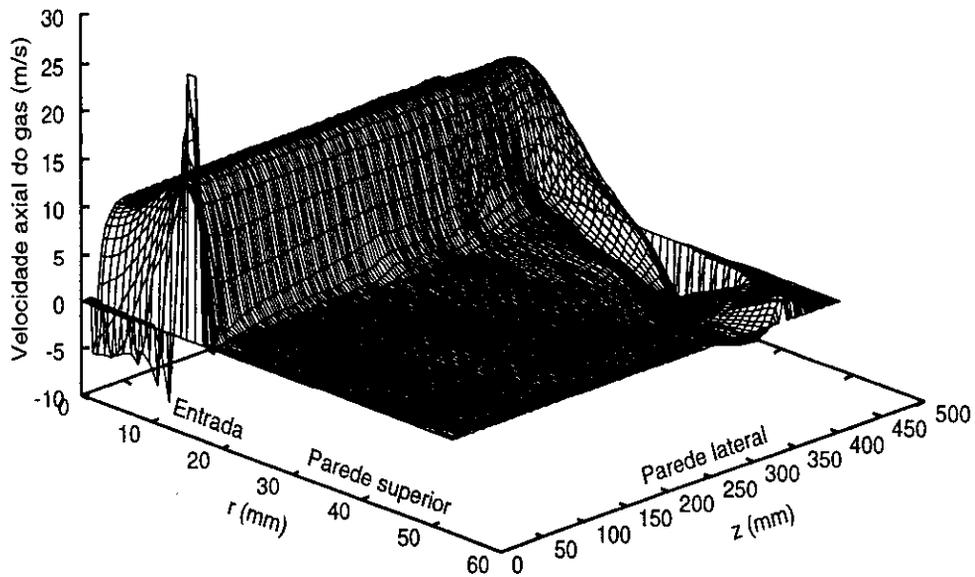


Figura 6.13: Malha tridimensional da velocidade axial do gás antes da injeção das gotas.

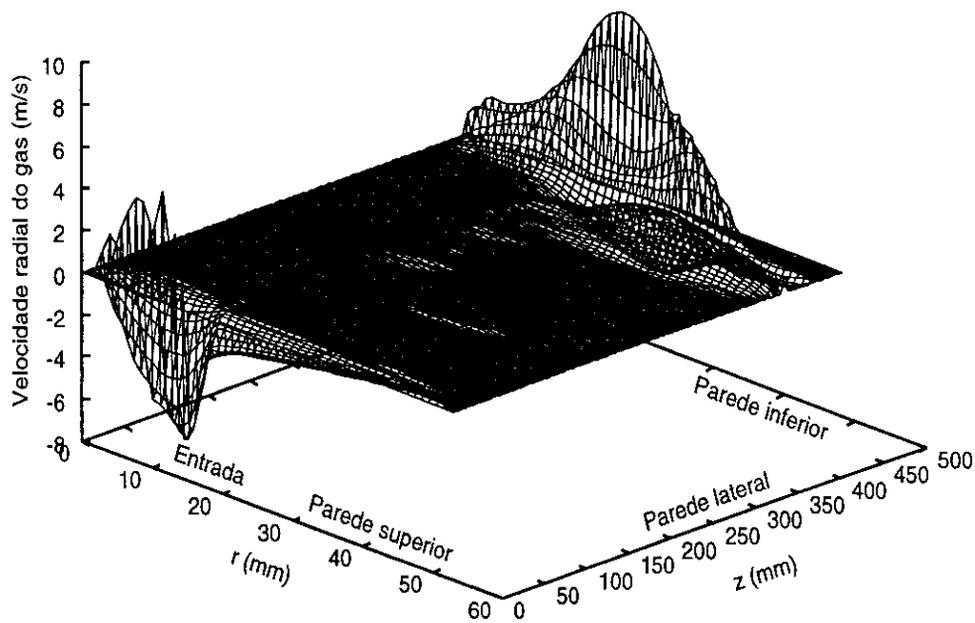


Figura 6.14: Malha tridimensional da velocidade radial do gás antes da injeção das gotas.

O escoamento do gás é preferencialmente axial, como mostra a figura 6.13; no entanto, perto das paredes superior e inferior da câmara a componente radial da velocidade torna-se diferente de zero, figura 6.14, para que haja o desvio do fluxo de ar determinado por essas paredes. A velocidade axial na entrada da câmara é a de contorno, 28 m/s , porém, antes de atingir o valor de 20 mm em z esse valor cai pela metade.

A umidade do gás antes da secagem é praticamente constante, diminuindo perto das paredes devido à condição de concentração de vapor nula imposta nessas regiões.

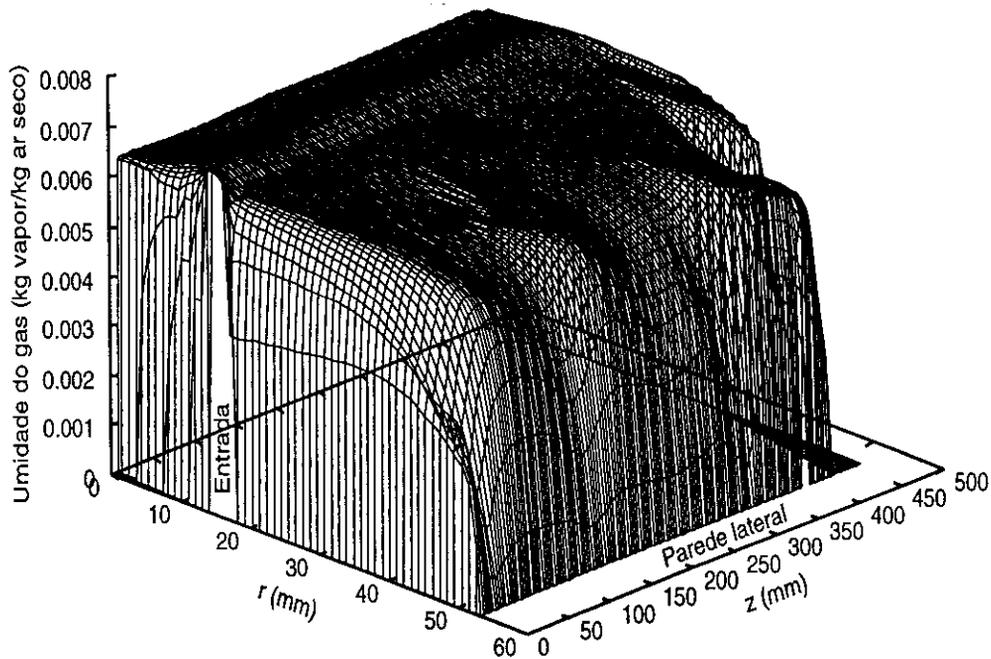


Figura 6.15: Malha tridimensional da distribuição da umidade do gás antes da secagem.

6.2.2 Gotas de suspensão e grânulos de alumina

Com os perfis do gás antes da injeção calculados, é possível simular a secagem da suspensão. As trajetórias das gotas, que ao longo do processo se transformam em grânulos de alumina, são mostradas na figura 6.16. As gotas de diâmetro inicial menores penetram radialmente menos, sendo arrastadas antes mesmo de atingirem a região da entrada de ar, que se localiza entre 16 e 18 mm.

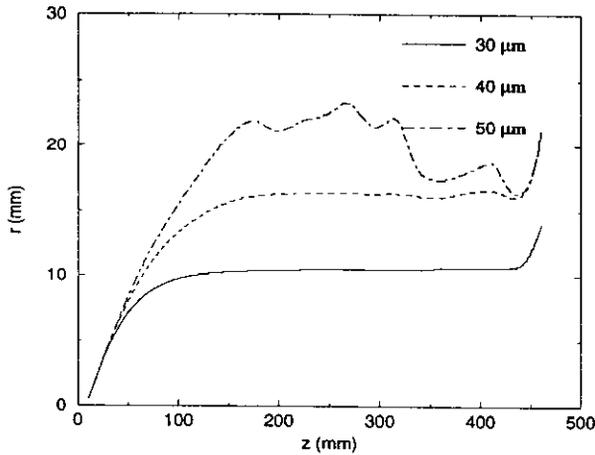


Figura 6.16: Trajetórias das gotas de suspensão, ou grânulos, de alumina.

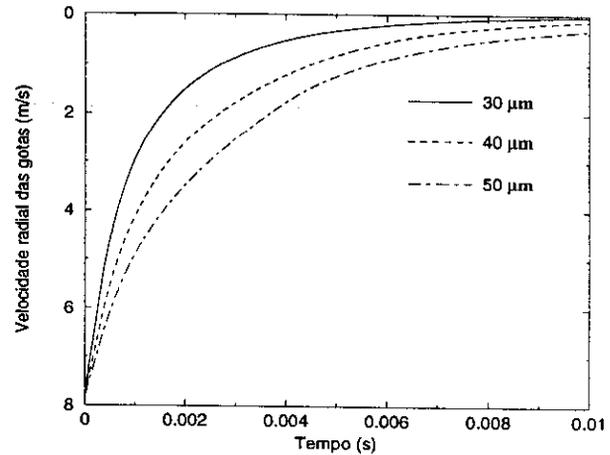


Figura 6.17: Velocidade radial das gotas dentro da câmara de secagem.

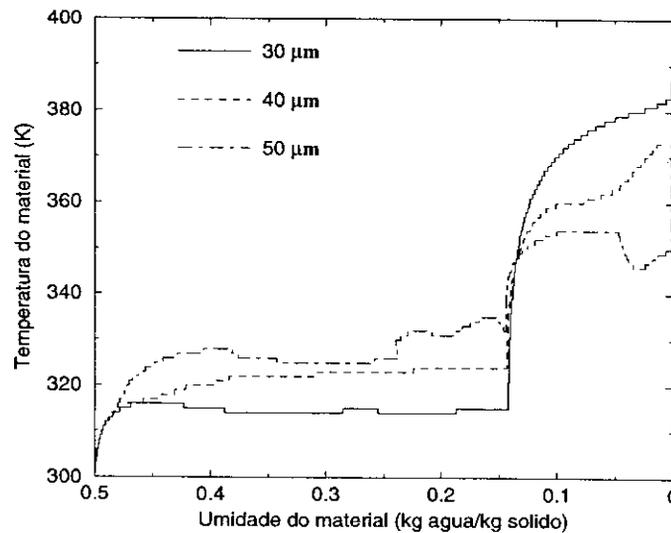


Figura 6.18: Temperatura das gotas, ou grânulos, em função de sua umidade.

A velocidade radial de cada classe de diâmetros ao longo do tempo é apresentada na figura 6.17. Nessa figura, constata-se que, apesar de terem sido todas injetadas com a mesma velocidade, as gotículas menores têm suas velocidades rapidamente reduzidas: em apenas 0,01 s elas são zeradas.

No primeiro período de secagem, enquanto há água na superfície do material, a temperatura permanece na de bulbo úmido; após a troca de períodos, a temperatura aumenta e entra em equilíbrio com a do meio de secagem, como mostra a figura 6.18. Na tabela 6.3 são apresentados o tempo, a temperatura, a umidade e as coordenadas das gotas quando da mudança do primeiro para o segundo período de secagem, e na tabela 6.4, o tempo de residência, a temperatura, o diâmetro e a umidade residual dos grânulos no fim do processo.

Tabela 6.3: Dados da fase dispersa na mudança do primeiro para o segundo período de secagem.

<i>Diâmetro inicial</i> (μm)	<i>Tempo</i> (s)	<i>Temperatura</i> ($^{\circ}\text{C}$)	<i>Umidade</i> (kg água/kg sólido)	<i>r; z</i> (mm)
30	0,017	42	0,141	(10; 278)
40	0,052	51	0,142	(16; 327)
50	0,16	59	0,143	(23; 257)

Tabela 6.4: Dados da fase dispersa ao final do processo de secagem.

<i>Diâmetro inicial</i> (μm)	<i>Tempo de residência</i> (s)	<i>Temperatura</i> ($^{\circ}\text{C}$)	<i>Umidade residual</i> (kg água/kg sólido)	<i>Diâmetro final</i> (μm)
30	0,03	114	—	27,2
40	0,08	101	9×10^{-3}	36,2
50	0,3	101	—	45,3

De acordo com os cálculos, a umidade crítica é de 0,14 kg água/kg sólido seco para os três diâmetros simulados; entretanto, o tempo para que se atinja esse valor é bastante diferente, variando entre 0,02 e 0,2 s conforme o tamanho inicial das gotas. Ao final do processo, praticamente toda a água do material foi evaporada, porém os grânulos com 40 μm de diâmetro inicial possuem umidade residual de 9×10^{-3} kg água/kg sólido seco. O tempo de residência calculado, dependendo do tamanho da gota/grânulo, varia entre 0,03 e 0,3 s.

6.2.3 Gás de secagem depois da injeção

Quando o material é injetado no secador, os perfis do gás sofrem alterações devido à presença da fase dispersa e devem, portanto, ser recalculados. A figura 6.19 apresenta uma malha tridimensional da distribuição de temperatura do gás depois da injeção e a

figura 6.20 apresenta as isotermas do ar na câmara de secagem (a) antes e (b) depois da injeção das gotas.

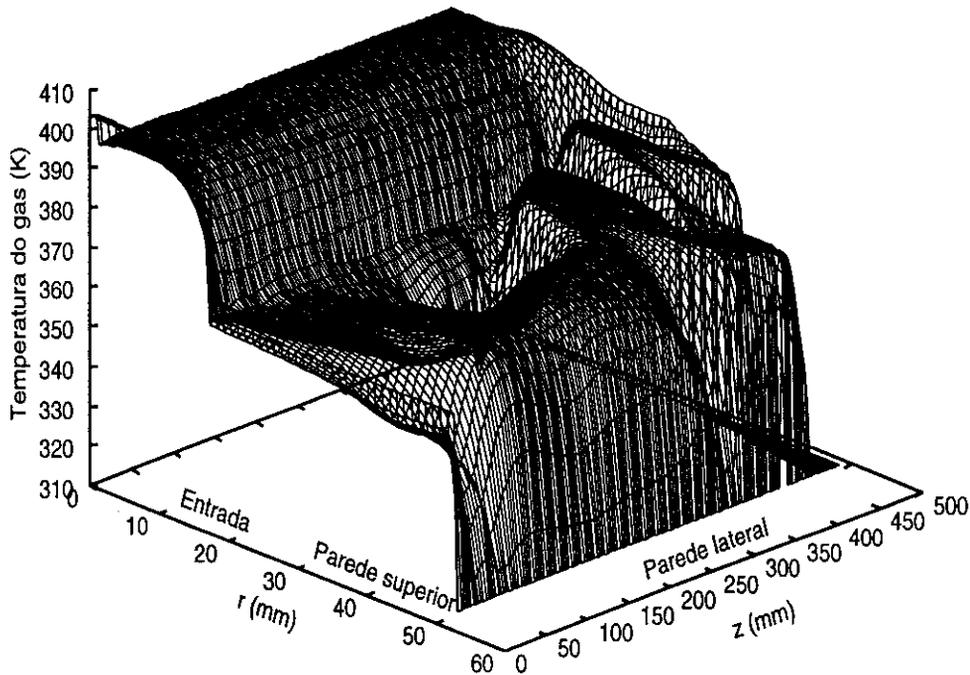


Figura 6.19: Malha tridimensional da distribuição da temperatura do gás depois da secagem.

A temperatura do gás diminui em todo o domínio com a injeção da suspensão, sendo que a região mais afetada é em z entre 200 e 350 mm, pois é nessa região que se dá a mudança do primeiro para o segundo período de secagem, como apresentado na tabela 6.3, e os recém-formados grânulos passam da temperatura de bulbo úmido para a do gás, retirando do gás o calor necessário para essa transição. Antes da injeção, a temperatura do gás no ponto de coordenadas $r = 20$ e $z = 275$ mm era de 390 K e depois da injeção passa a ser de 340 K, ou seja, há uma redução de 15% na temperatura, aproximadamente.

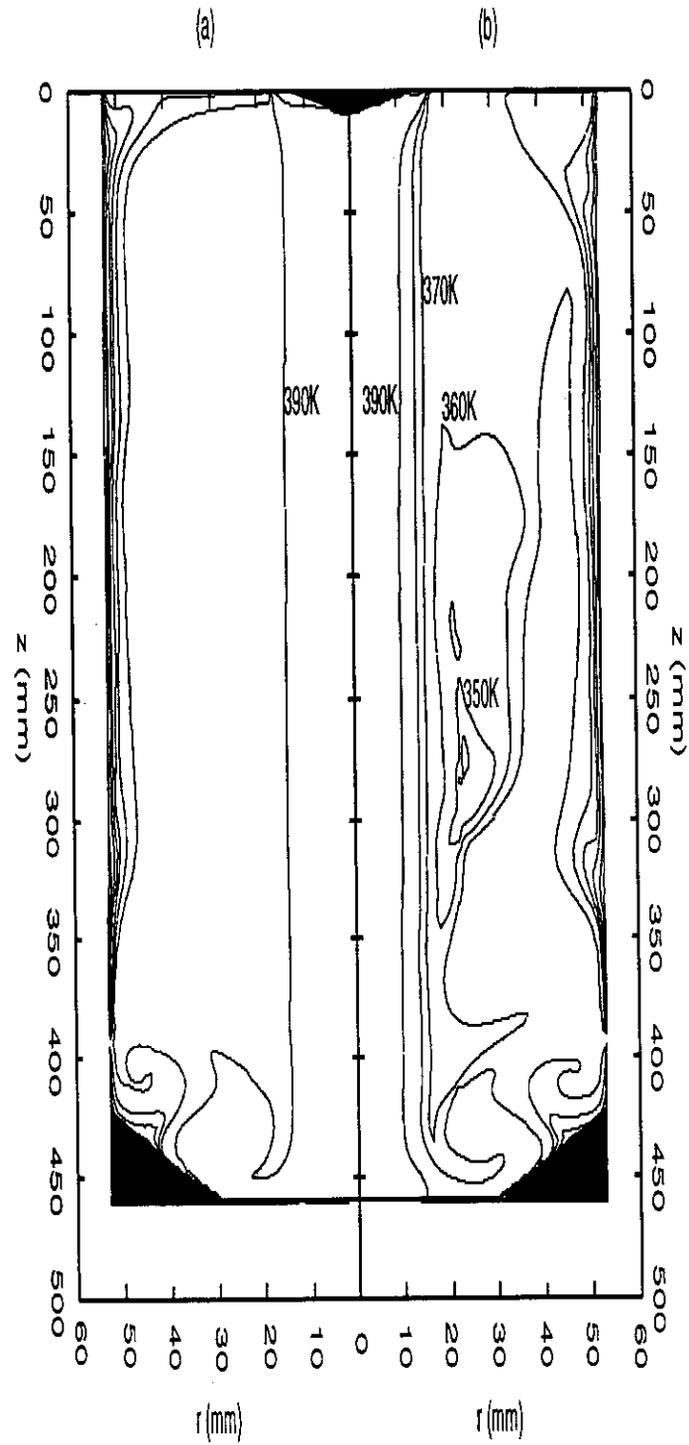


Figura 6.20: Isotermas do gás (a) antes e (b) depois da injeção das gotas de suspensão de alumina. Linha mais interna de 390 K (117 °C), diminuindo em intervalos de 10 K.

As componentes axial e radial da velocidade, figuras 6.21, 6.22 e 6.24, são pouco modificadas ao longo do escoamento quando comparadas com seus perfis antes da injeção, pois a velocidade das gotas são completamente relaxadas em menos de 2 centésimos de segundo após a injeção (ver figura 6.17), correspondendo a uma distância axial de aproximadamente 150 *mm*; a partir desse ponto, o material atomizado é conduzido pelo fluxo do ar de secagem. A velocidade é modificada mais na região ao redor do ponto de injeção, apresentando um aumento localizado de até 30%. No restante do domínio, o perfil de velocidades após a injeção oscila em relação ao perfil anterior à introdução do material, como mostra a figura 6.22, porém, conserva as mesmas características do escoamento do gás antes da secagem.

As linhas de fluxo, figura 6.23, aumentam devido à evaporação da água contida no material, pois essa massa de vapor é somada à massa do ar de secagem. O aumento é maior em *z* entre 200 e 350 *mm* e em *r* entre 10 e 30 *mm*, pois essa é a região da maior parte do trajeto das gotas/grânulos e, portanto, de maior concentração de vapor.

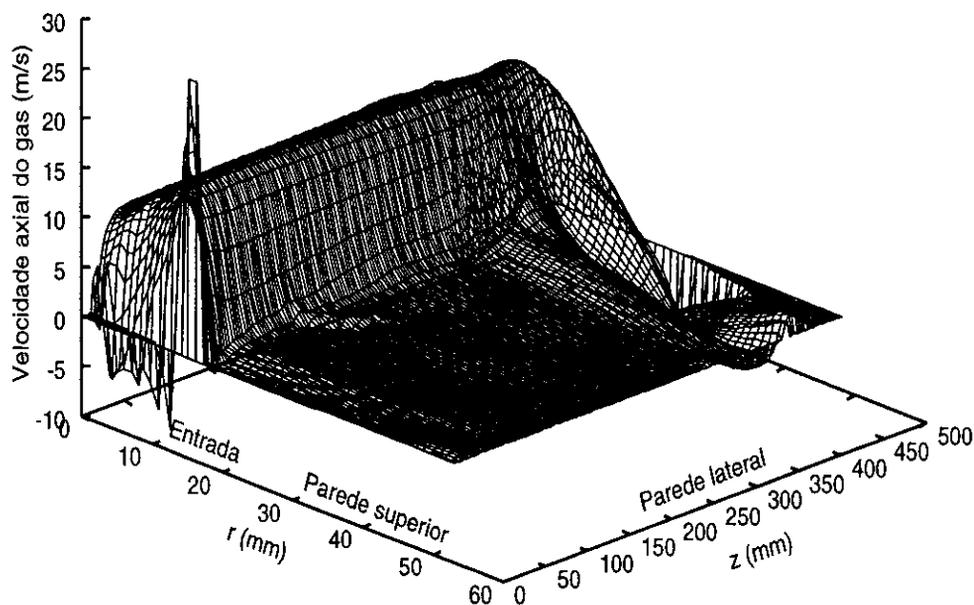


Figura 6.21: Malha tridimensional da velocidade axial do gás depois da secagem.

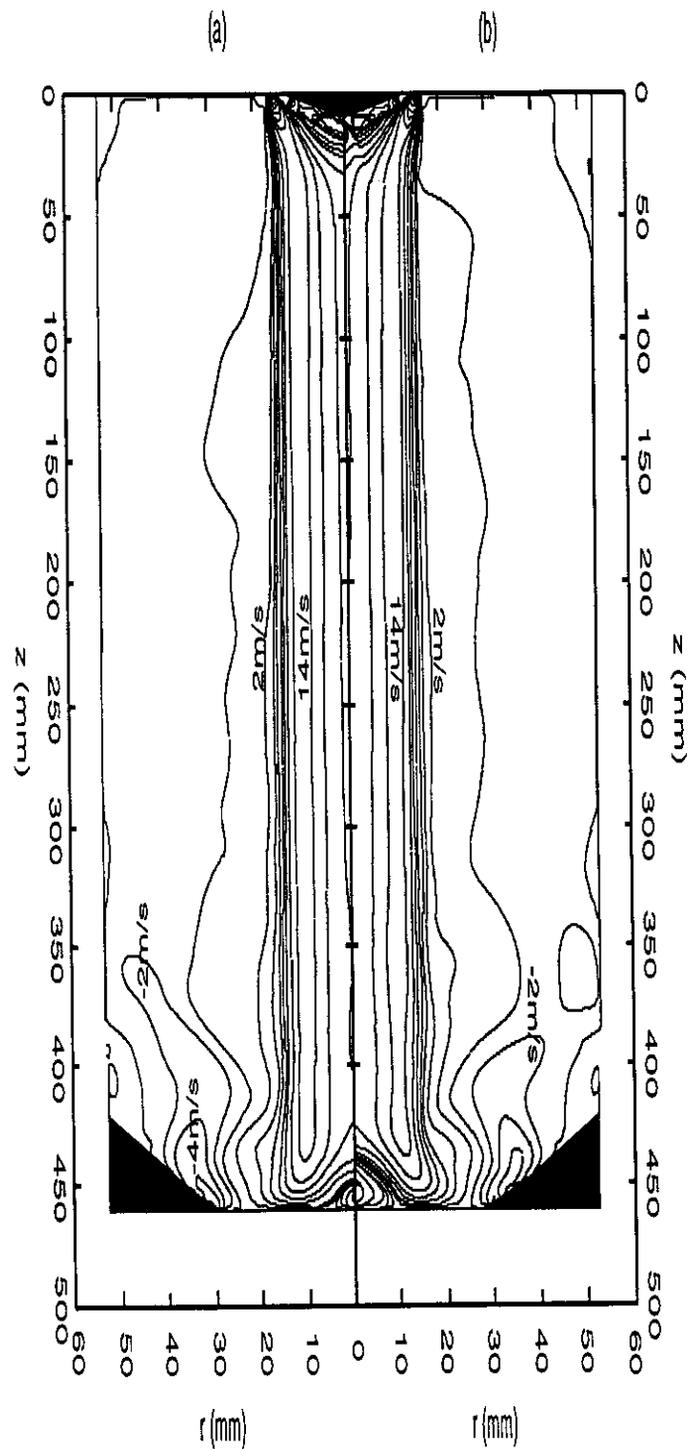


Figura 6.22: Linhas de velocidade constante do gás (a) antes e (b) depois da injeção das gotas de suspensão de alumina. Linha central de 14 m/s , variando em intervalos de 2 m/s .

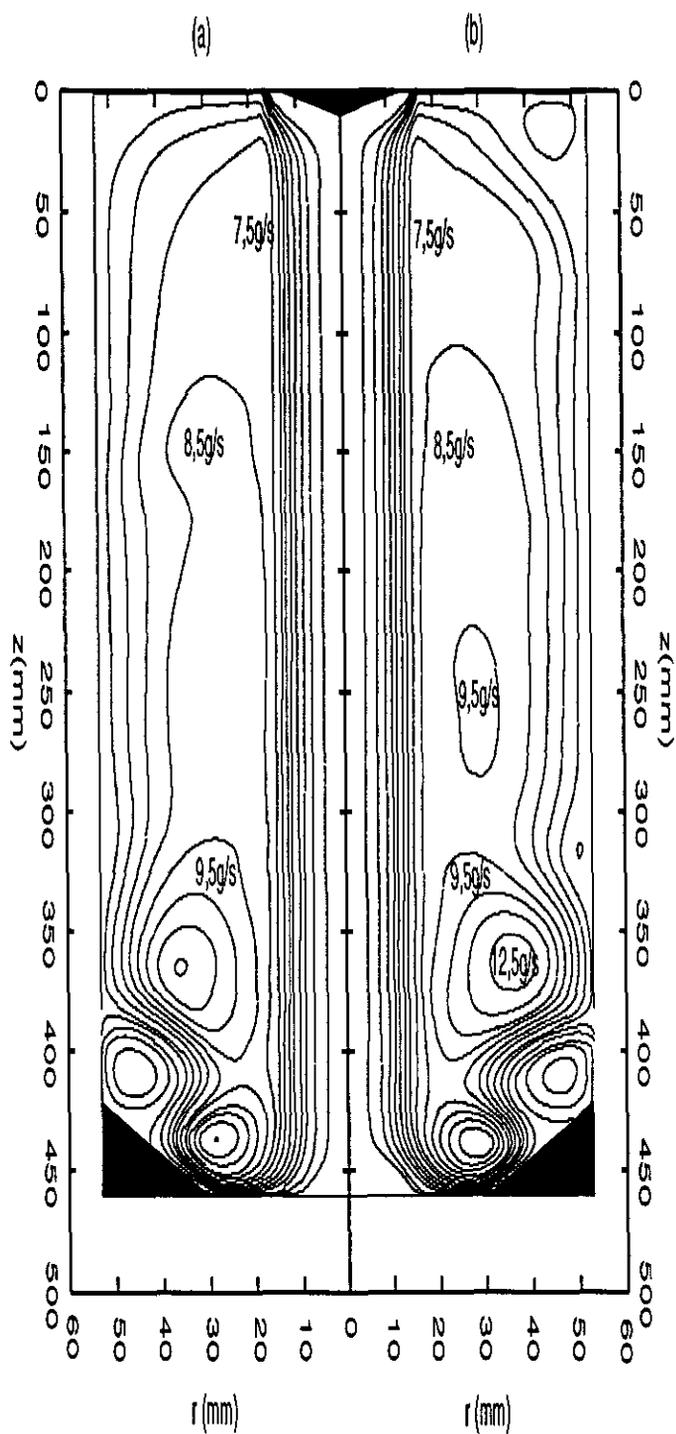


Figura 6.23: Linhas de fluxo do gás (a) antes e (b) depois da injeção das gotas de suspensão de alumina. Linha mais interna (próxima ao eixo de simetria) de $0,5 \text{ g/s}$, aumentando em intervalos de 1 g/s .

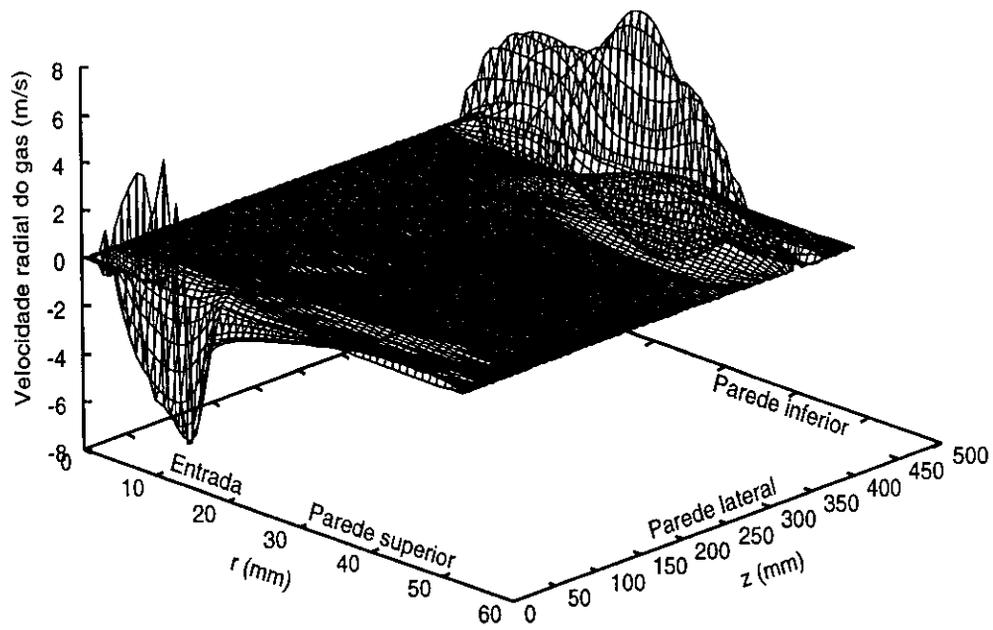


Figura 6.24: Malha tridimensional da velocidade radial do gás depois da secagem.

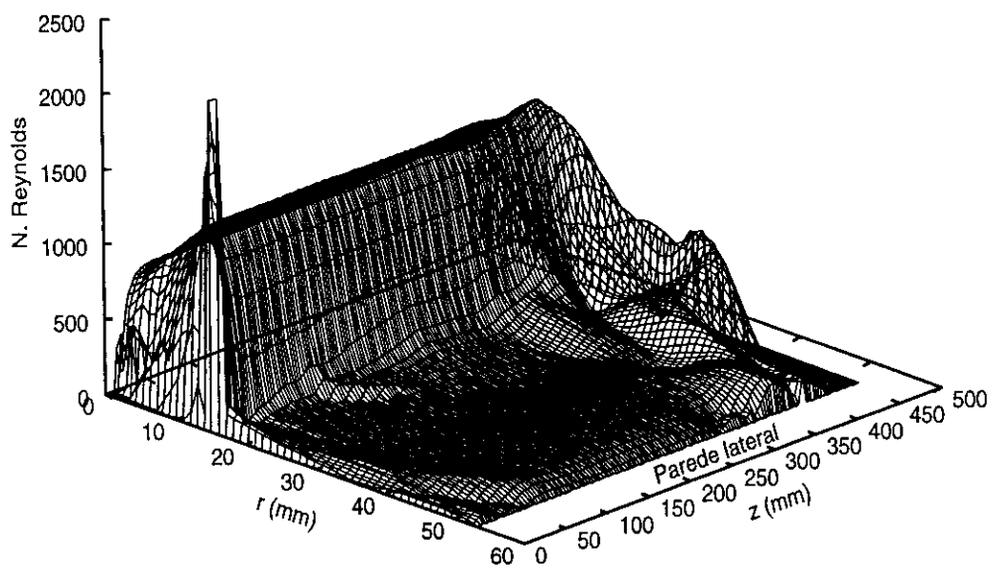


Figura 6.25: Malha tridimensional do número de Reynolds do escoamento do gás depois da secagem.

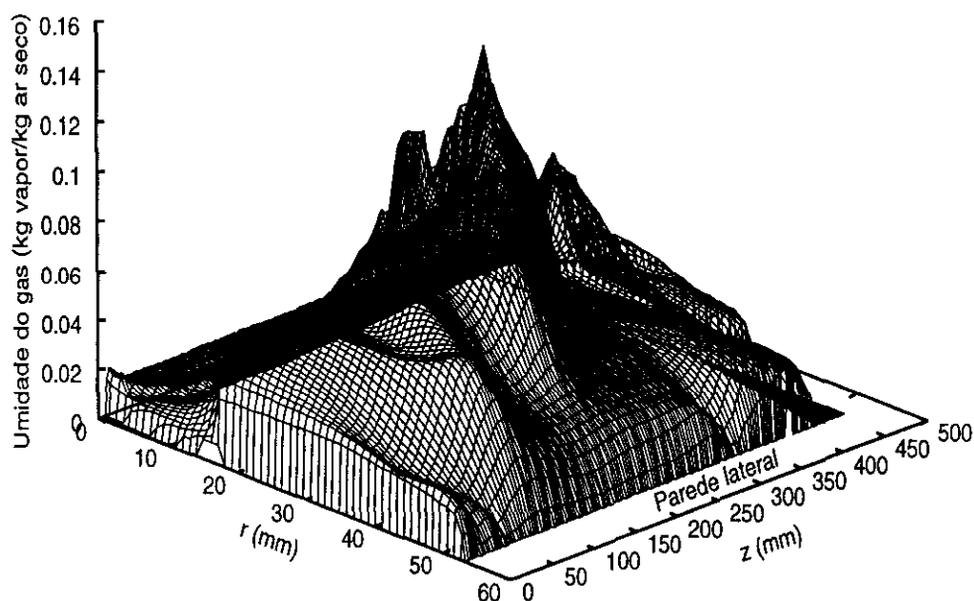


Figura 6.26: Malha tridimensional da distribuição da umidade do gás depois da secagem.

A figura 6.25 apresenta o número de Reynolds do escoamento do gás de secagem, $Re \equiv \rho d_{cm} \bar{u} / \mu$, em todo o domínio de cálculo; para as condições de operação do ensaio $E4$, o escoamento se mostra essencialmente laminar, com Re variando entre 500 e 1000, exceto na região da entrada do ar de secagem, onde $Re = 2000$. Para escoamentos em tubos circulares, valores de Reynolds da ordem de 2000 indicam o início da transição entre os regimes laminar e turbulento. Porém, o escoamento de gás no Büchi deve apresentar números de Reynolds mais elevados que os calculados no programa pois há simplificações assumidas na modelagem que decerto afetam esse parâmetro, como por exemplo, a exclusão da componente azimutal da velocidade de injeção das gotas na câmara por se assumir simetria axial. Como o número de Reynolds está na região de transição para escoamentos em tubos, a hipótese de regime laminar feita para o escoamento do ar na câmara de secagem do Büchi é plausível, uma vez que escoamentos nessa faixa de número de Reynolds conservam características laminares. Ademais, foge ao escopo do trabalho a inclusão de modelos de turbulência, pois isso exigiria o conhecimento dos vários parâmetros livres inerentes a tais modelos, que, para o equipamento em questão, não existem na literatura e teriam que ser medidos. Logo, a simulação em regime turbulento seria meramente especulativa, sem contribuições efetivas ao trabalho.

Como se esperava, a umidade do ar de secagem aumenta sensivelmente durante o processo de secagem: a região de maior concentração de vapor chega a ser 8 vezes maior que no início, como pode-se constatar através dos gráficos da umidade do ar antes, figura 6.15, e depois da injeção do material no secador, figura 6.26. É exatamente nessa região

do domínio que ocorre o maior aumento do fluxo de massa e o maior decréscimo da temperatura do ar, como evidenciam as figuras 6.20 e 6.22, respectivamente. Nas outras regiões da câmara, a umidade do gás é também alta, sendo de 2 a 4 vezes maior que a estabelecida inicialmente.

6.3 Estudo paramétrico

Uma das grandes vantagens da simulação numérica é sua versatilidade, pois é possível estudar a influência que cada condição de operação, ou qualquer parâmetro experimental, exerce no processo de maneira relativamente simples e direta. Além da simplicidade, os resultados desse estudo auxiliam na compreensão de fenômenos físicos importantes para a otimização do sistema; um estudo similar em termos experimentais, principalmente em escalas industriais, é inviável pois os custos envolvidos, como por exemplo com materiais e mão-de-obra, são muito elevados.

Para o estudo paramétrico do Büchi, adotou-se um ensaio de referência, *ER*, cujos parâmetros de operação são descritos na tabela 6.5.

Tabela 6.5: Parâmetros de operação do Ensaio de Referência *ER*.

<i>Parâmetros de operação</i>	<i>Valor</i>
Temperatura inicial do ar ($^{\circ}\text{C}$)	193
Vazão do ar (m^3/h)	33
Taxa de alimentação (m^3/h)	$3,6 \times 10^{-4}$
Vazão do ar de atomização (m^3/h)	0,7
Umidade antes da injeção (kg vapor/kg ar)	1×10^{-2}

A partir desse ensaio, simularam-se valores iniciais diferentes para a taxa de alimentação de material, a vazão e a temperatura do gás de secagem, que são os parâmetros da secagem dos quais se tem controle nos experimentos.

6.3.1 Vazão do gás de secagem

A faixa de vazão do Büchi varia entre 21 e 45 m^3/h , sendo que nos ensaios experimentais foram usados três valores diferentes: 21, 33 e 45 m^3/h . Alterar esta vazão corresponde, nas simulações, a alterar a velocidade inicial do ar de secagem. Essas velocidades são calculadas dividindo-se a vazão pela área da seção transversal de entrada do gás, e variam entre 28 e 61 m/s . A tabela 6.6 faz um resumo dos valores de vazão e de suas respectivas velocidades.

Modificando-se, então, a velocidade inicial do ar, obtêm-se os perfis de temperatura, velocidade e umidade do gás nos três casos, bem como as trajetórias e umidades das gotas/grânulos processados em ambientes de velocidades diferentes.

Tabela 6.6: Valores da vazão e da velocidade inicial do ar.

<i>Parâmetro testado</i>	<i>EV1</i>	<i>ER</i>	<i>EV2</i>
Vazão do ar (m^3/h)	21	33	45
Velocidade correspondente (m/s)	28	45	61

Na figura 6.27, as trajetórias das gotas de $50 \mu m$ de diâmetro inicial para as diferentes vazões são comparadas. Como a velocidade de injeção das gotas é função da velocidade do gás de secagem, quando se aumenta a vazão do gás, a velocidade das gotas também aumenta, figuras 6.28 e 6.29, e por esse motivo penetram mais na direção radial. Com velocidades maiores, penetram mais na direção radial. Em compensação, a evaporação é mais lenta pois as gotas experimentam, em posições radiais crescentes, temperaturas menores; a umidade das gotas/grânulos com diâmetro inicial de $50 \mu m$ em cada caso está representada na figura 6.30.

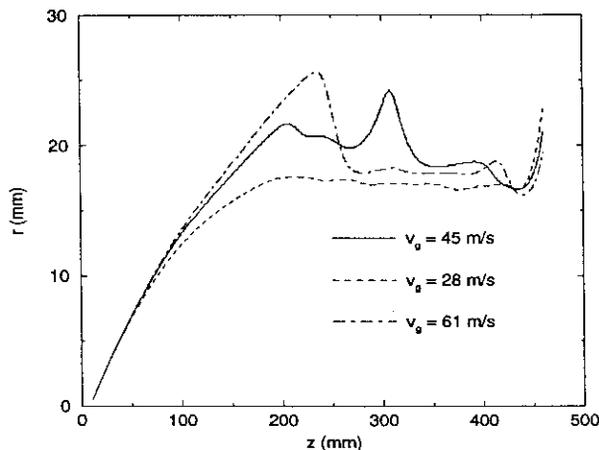


Figura 6.27: Trajetórias das gotas de diâmetro inicial de $50 \mu m$ para uma vazão de ar de 21, 33 e $45 m^3/h$ (28, 45 e $61 m/s$, respectivamente).

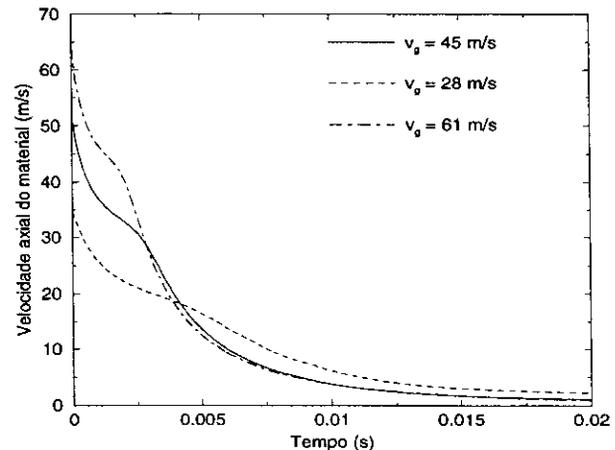


Figura 6.28: Velocidade axial das gotas de diâmetro inicial de $50 \mu m$ para uma vazão de ar de 21, 33 e $45 m^3/h$ (28, 45 e $61 m/s$, respectivamente).

A diferença no tempo para troca de períodos e no tempo total de secagem* é de aproximadamente 45% entre as vazões mínima e máxima. Decerto, esse retardo no tempo

*Nota-se: o tempo total para secagem difere, para o equipamento simulado neste trabalho, do tempo de residência do material no secador.

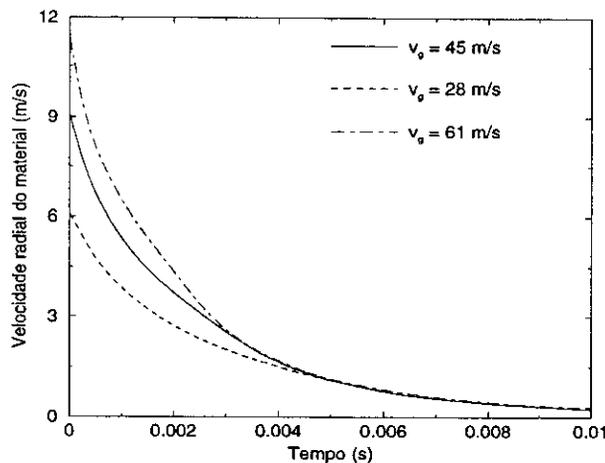


Figura 6.29: Velocidade radial das gotas de diâmetro inicial de $50 \mu m$ para uma vazão de ar de 21, 33 e $45 m^3/h$ (28, 45 e $61 m/s$, respectivamente).

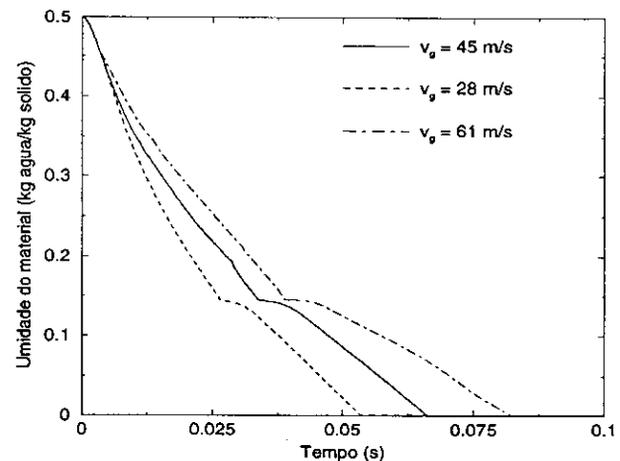


Figura 6.30: Umidade das gotas de diâmetro inicial de $50 \mu m$ para uma vazão de ar de 21, 33 e $45 m^3/h$ (28, 45 e $61 m/s$, respectivamente).

não afeta o material produzido no Büchi porque, para diversos conjuntos de parâmetros operacionais, a umidade residual dos grânulos é praticamente nula, porém, pode ser fator diferencial em equipamentos de maior escala. Com efeito, a umidade residual de grânulos produzidos na indústria cerâmica deve ter umidade entre 5 e 6%.

Os gráficos das figuras 6.28 e 6.29 são as respectivas velocidades axial e radial das gotas de $50 \mu m$ ao longo do tempo para as diferentes vazões de gás simuladas; como mencionado acima, a velocidade de injeção das gotas é função da velocidade do gás de secagem e do gás de atomização e por esse motivo variam proporcionalmente à vazão. Após um tempo aproximado de $0,01 s$, no entanto, as três velocidades estão completamente relaxadas, porém a diferença existente entre elas antes de atingirem esse tempo mostrou-se suficiente para alterar as trajetórias e, principalmente, para alterar o tempo total de secagem, como pode-se observar no gráfico da umidade do material em função do tempo, figura 6.30.

Tabela 6.7: Dados da fase dispersa na troca do primeiro para o segundo período de secagem nos ensaios *ER*, *EV1* e *EV2*.

Ensaio	Tempo (s)	Umidade (kg água/kg sólido)	$r; z$ (mm)
<i>EV1</i> ($21 m^3/h$)	0,027	0,14	(17; 222)
<i>ER</i> ($33 m^3/h$)	0,034	0,14	(20; 228)
<i>EV2</i> ($45 m^3/h$)	0,04	0,14	(25; 241)

A umidade crítica, a residual e o diâmetro final dos grânulos são iguais nos três casos porque, no modelo, esses parâmetros são independentes da vazão do gás; porém, o tempo

para a troca do primeiro para o segundo período de secagem aumenta com a vazão pois, como exposto acima, as regiões da câmara de raio maiores são caracterizadas por temperaturas menores. As tabelas 6.7 e 6.8 apresentam esses dados para as gotas de $50 \mu\text{m}$ de diâmetro inicial obtidos nos ensaios *ER*, *EV1* e *EV2*.

Tabela 6.8: Dados da fase dispersa ao final do processo de secagem para os ensaios *ER*, *EV1* e *EV2*.

Ensaio	Tempo de residência (s)	Umidade residual (kg água/kg sólido)	Diâmetro final (μm)	Taxa de água evaporada (kg/s)
<i>EV1</i> ($21 \text{ m}^3/\text{h}$)	0,11	—	45	$4,93 \times 10^{-5}$
<i>ER</i> ($33 \text{ m}^3/\text{h}$)	0,15	—	45	$7,73 \times 10^{-5}$
<i>EV2</i> ($45 \text{ m}^3/\text{h}$)	0,11	—	45	$8,89 \times 10^{-5}$

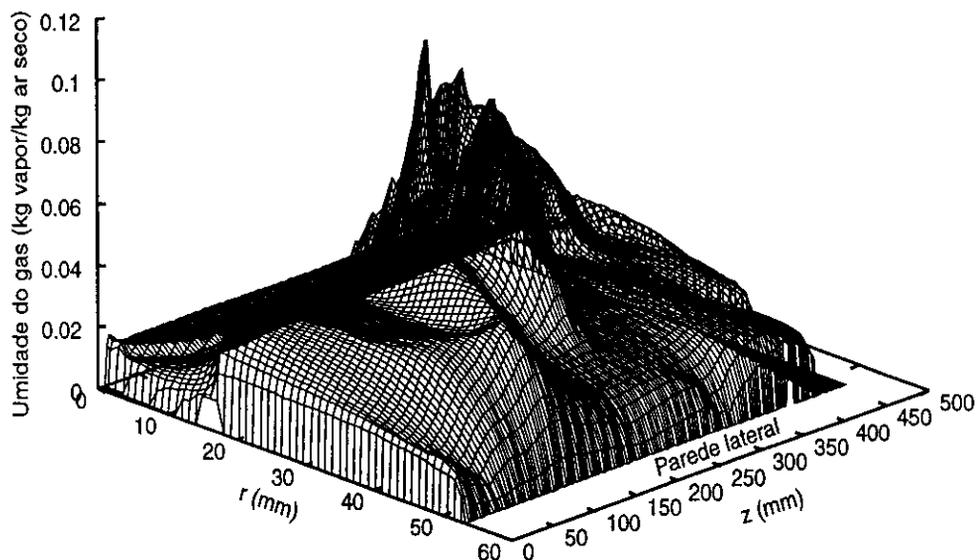


Figura 6.31: Distribuição da umidade do gás depois da secagem para o ensaio com vazão de $33 \text{ m}^3/\text{h}$.

A medida que a vazão aumenta, os perfis calculados para a umidade do gás, figuras 6.31, 6.32 e 6.33, e a taxa de massa de água evaporada, tabela 6.8, também aumentam. A diferença na variação líquida da umidade do ar, isto é, a umidade total menos a inicial, entre as vazões de 21 e $45 \text{ m}^3/\text{h}$ é 2,5 vezes maior nas regiões de maior gradiente de concentração de vapor.

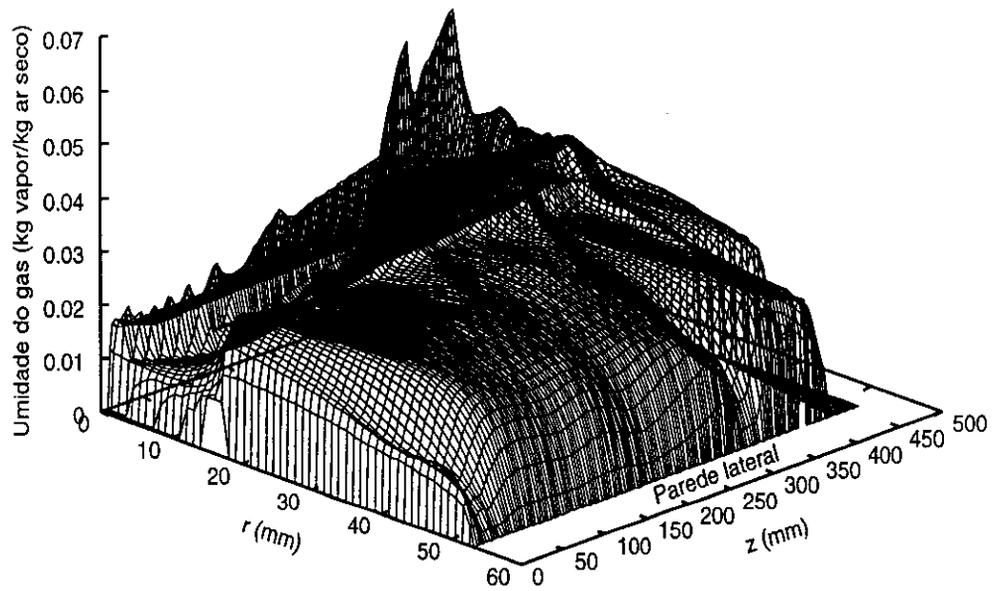


Figura 6.32: Distribuição da umidade do gás depois da secagem para o ensaio com vazão de $21 \text{ m}^3/h$.

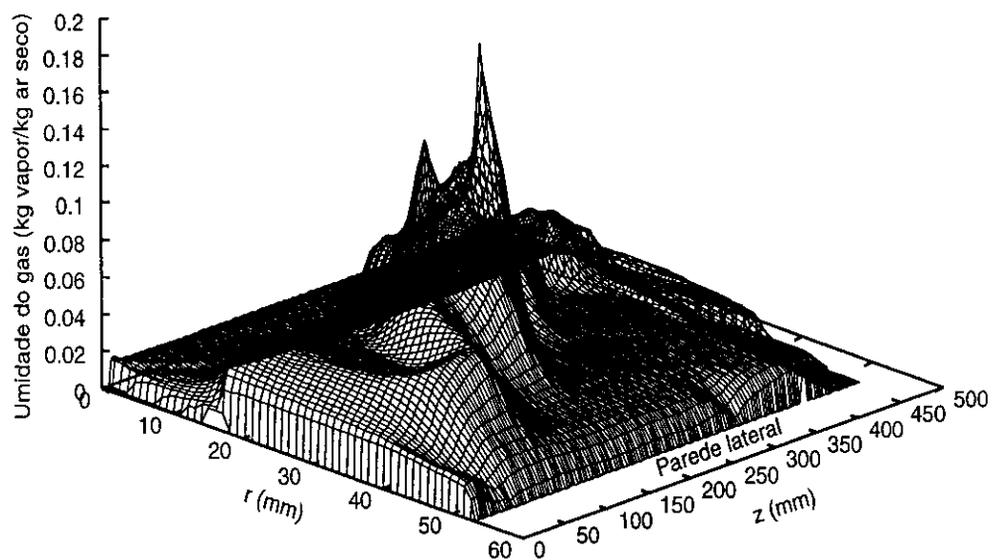


Figura 6.33: Distribuição da umidade do gás depois da secagem para o ensaio com vazão de $45 \text{ m}^3/h$.

Experimentalmente verifica-se uma diferença de 110% na variação líquida da umidade para essas vazões; entretanto, os valores da taxa de água evaporada obtidos nas simulações paramétricas da vazão não se comportam como nos experimentos pois a umidade inicial usada para os cálculos dessa variável é igual nos três ensaios quando, na realidade, variam de forma não linear para cada conjunto de parâmetros operacionais.

A distribuição do número de Reynolds do ar de secagem para as três vazões estudadas, figuras 6.34, 6.35 e 6.36, mostra que, para a vazão maior, $45 \text{ m}^3/\text{h}$, o escoamento começa a se aproximar da região de transição entre os regimes laminar e turbulento não somente na entrada da câmara, como no caso do ensaio *E4* apresentado na seção anterior, mas sim em quase todo o comprimento da câmara, na altura da entrada de gás. Nos outros dois casos, exceto pela região da entrada de ar, o número de Reynolds calculado indica um escoamento laminar.

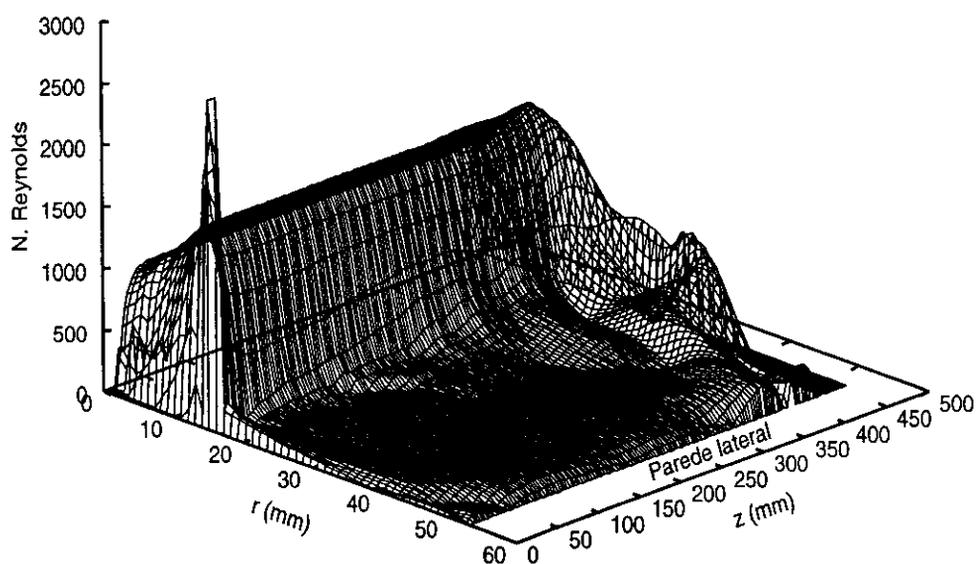


Figura 6.34: Número de Reynolds do escoamento depois da secagem para uma vazão de $33 \text{ m}^3/\text{h}$.

Comparando-se as isotermas do gás nos ensaios *ER*, *EV1* e *EV2* antes da injeção, figuras 6.37 (a), 6.38 (a) e 6.39 (a), toda a câmara torna-se mais quente devido à maior difusão de calor causada pelo aumento da velocidade do ar. Depois da injeção, a redução da temperatura dos três ensaios, figuras 6.37, 6.38 e 6.39, é, em média, de 10%, diminuindo em 40 ou 50 K. Entretanto, as coordenadas r e z que apresentam maior queda na temperatura são diferentes porque a concentração de vapor depende da trajetória das gotas, que se altera quando se modifica o valor da vazão.

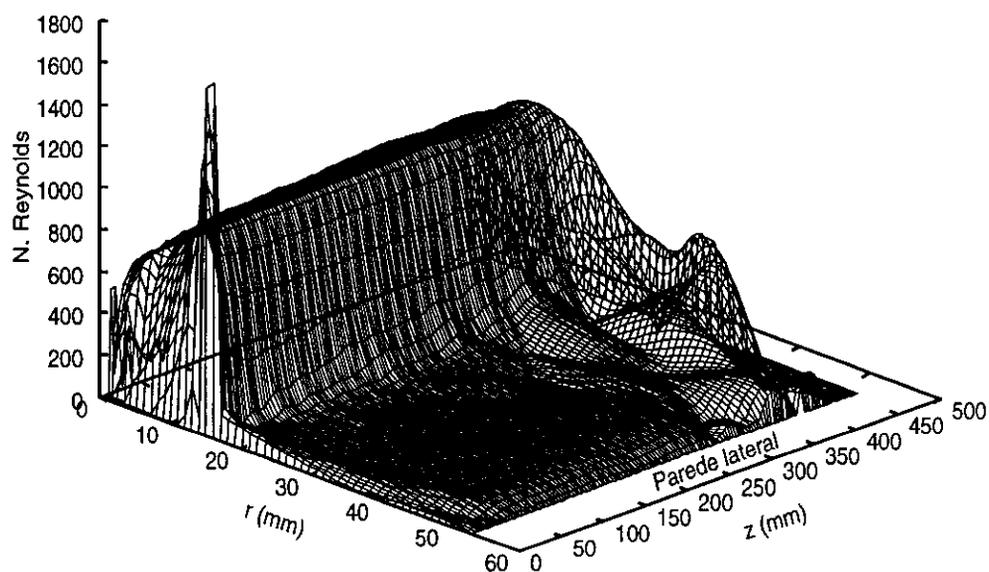


Figura 6.35: Número de Reynolds do escoamento depois da secagem para uma vazão de $21 \text{ m}^3/h$.

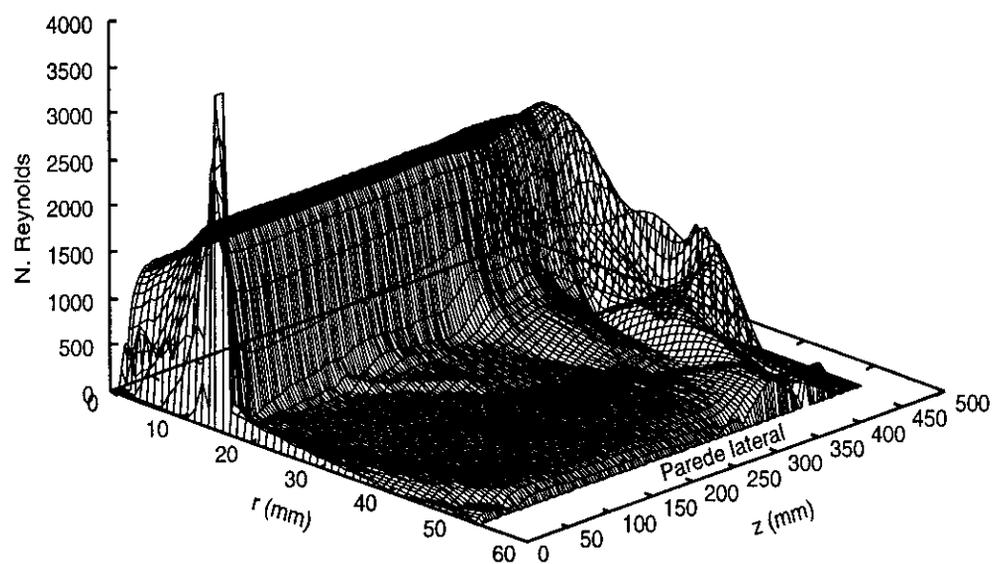


Figura 6.36: Número de Reynolds do escoamento depois da secagem para uma vazão de $45 \text{ m}^3/h$.

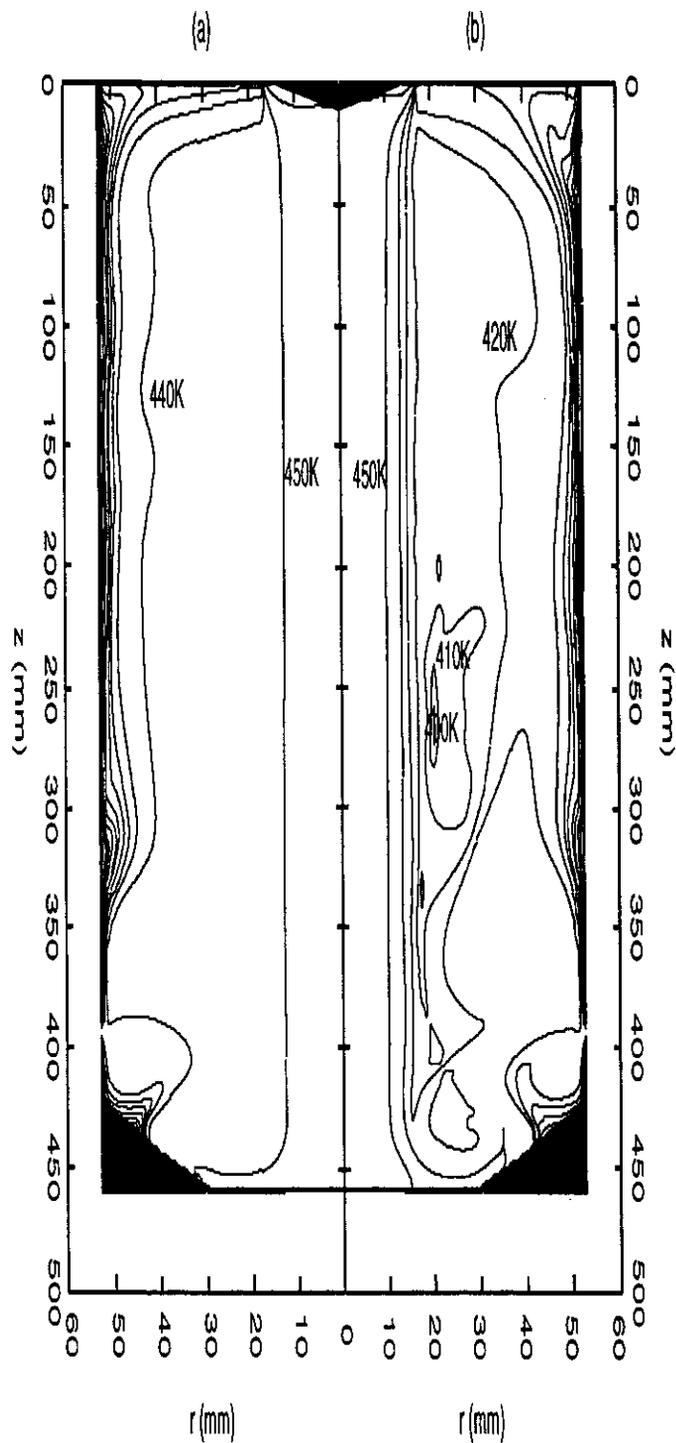


Figura 6.37: Ensaio $ER - 33 \text{ m}^3/h$. Isotermas do gás (a) antes e (b) depois da injeção das gotas de suspensão de alumina. Linha mais interna de 450 K (177 °C), diminuindo em intervalos de 10 K.

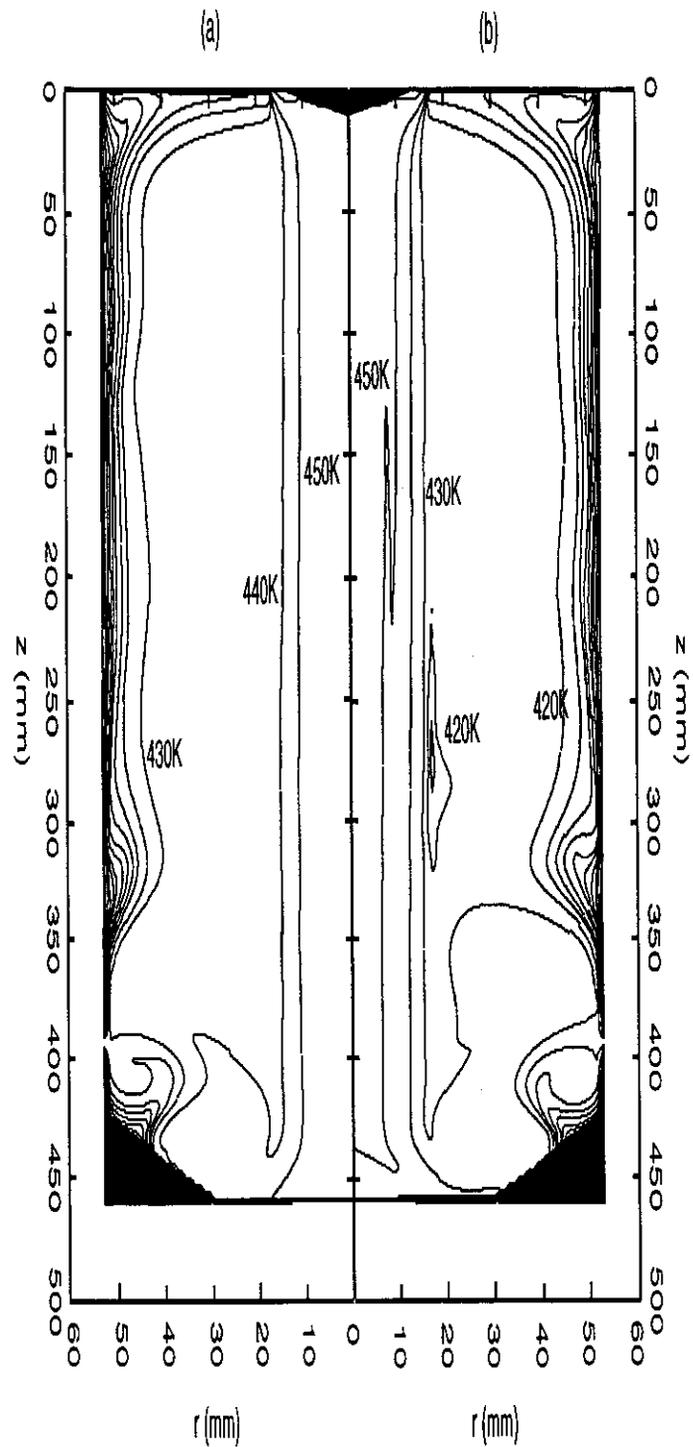


Figura 6.38: Ensaio *EV1* - $21 \text{ m}^3/\text{h}$. Isotermas do gás (a) antes e (b) depois da injeção das gotas de suspensão de alumina. Linha mais interna de 450 K ($177 \text{ }^\circ\text{C}$), diminuindo em intervalos de 10 K.

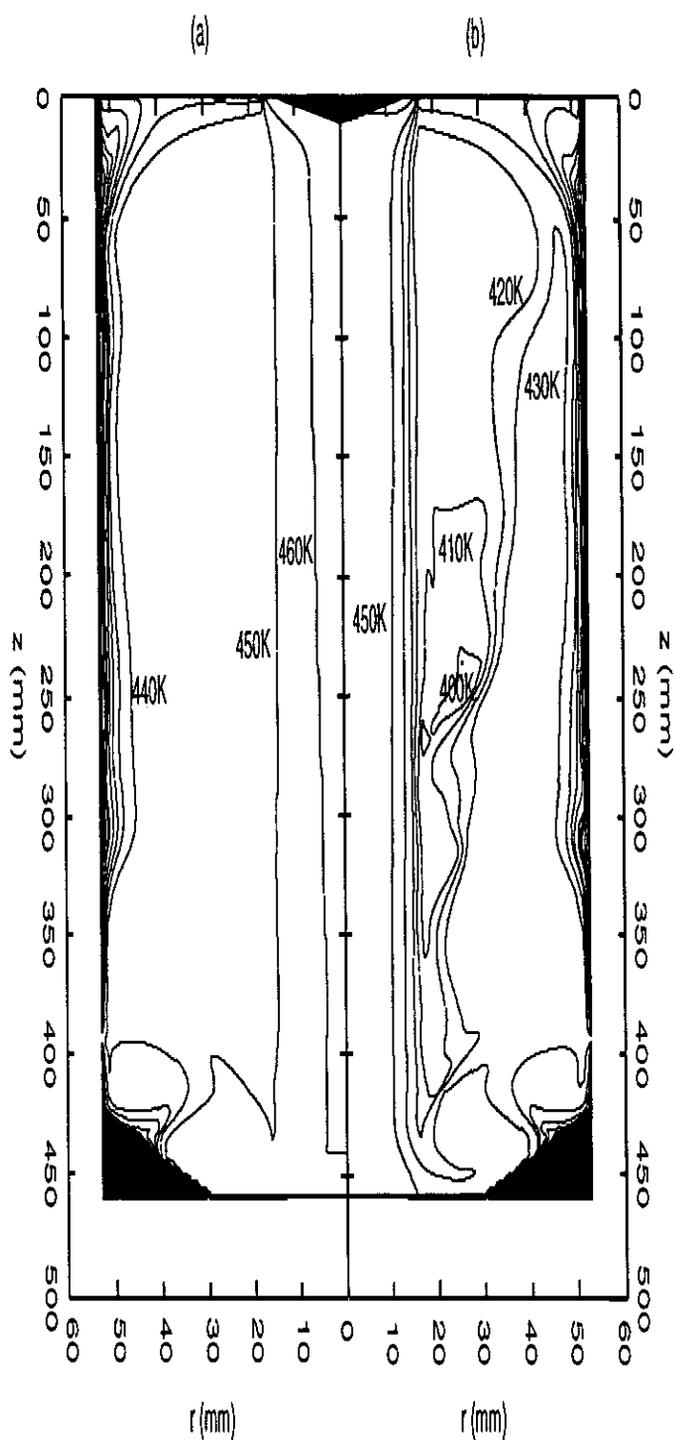


Figura 6.39: Ensaio *EV2* - $45 \text{ m}^3/\text{h}$. Isotermas do gás (a) antes e (b) depois da injeção das gotas de suspensão de alumina. Linha mais interna de 460 K (187 °C), diminuindo em intervalos de 10 K.

6.3.2 Temperatura na entrada da câmara

Depois dos testes com a variação da vazão do gás, foi estudada a influência da temperatura do ar na entrada da câmara no processo de secagem. A tabela 6.9 apresenta os valores de temperatura (em graus Celsius e Kelvin) simulados. A faixa de temperatura operacional do equipamento adotada nos experimentos e nos ensaios numéricos foi de 120 a 220 °C. Os resultados obtidos para as temperaturas de 130 e 180 °C são comparados entre si e com o ensaio de referência *ER*.

Tabela 6.9: Valores da temperatura do ar na entrada da câmara.

Parâmetro testado	ET1	ET2	ER
Temperatura (°C)	130	180	193
Temperatura (K)	403	453	466

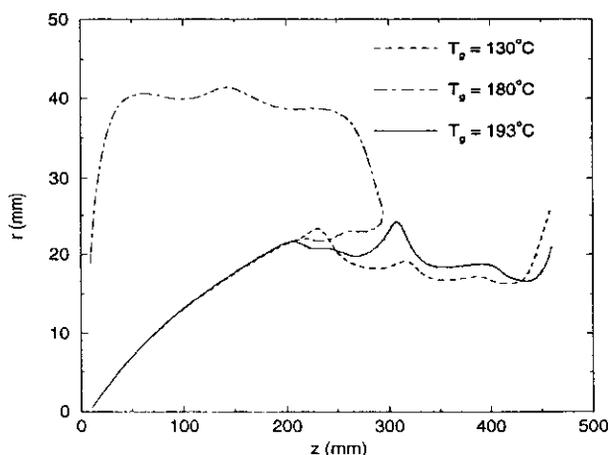


Figura 6.40: Trajetórias das gotas de diâmetro inicial de 50 μm para as temperaturas de ar na entrada de 130, 180 e 193 °C.

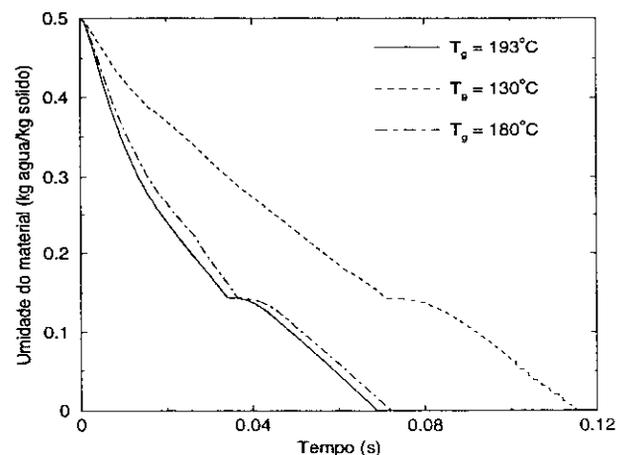


Figura 6.41: Umidade das gotas de diâmetro inicial de 50 μm para as temperaturas de ar na entrada de 130, 180 e 193 °C.

Por se tratar de um escoamento no qual as variáveis dependentes são acopladas, quando se altera a temperatura, a distribuição de velocidade do gás também muda, fazendo com que, ocasionalmente, as partículas sigam caminhos diferentes dentro do secador, como mostra a figura 6.40, das trajetórias das gotas de 50 μm de diâmetro inicial para as temperaturas de 130, 180 e 193 °C[†]. Para essa classe de tamanho de gota em particular, há um desvio na trajetória quando a temperatura inicial é 180 °C pois esse conjunto de condições de operação permitiu que a gota entrasse na região de recirculação de gás; esse retorno de material é observado nos experimentos. No entanto, elevando-se em apenas

[†]Vale ressaltar que a temperatura de 193 °C foi escolhida de modo totalmente aleatório.

13 °C a temperatura, essa mesma classe de gotas não retorna para a parte superior da câmara.

Como intuitivamente se esperava, a medida que a temperatura do gás aumenta, o tempo para a mudança do primeiro para o segundo período e o tempo total para secagem diminuem; nesse caso verificam-se reduções de 75 e 57%, respectivamente. A temperatura do grânulo na troca de períodos é praticamente igual nas três situações, variando menos de 1%. Isso demonstra que o modelo simula corretamente a termodinâmica do processo. A tabela 6.10 mostra os dados dos grânulos de 50 μm de diâmetro inicial para os ensaios *ET1*, *ET2* e *ER* no momento da troca entre os períodos de secagem.

Tabela 6.10: Dados da fase dispersa na troca do primeiro para o segundo período de secagem nos ensaios *ER*, *ET1* e *ET2*.

Ensaio	Temperatura (°C)	Tempo (s)	r; z (mm)
<i>ET1</i> (130 °C)	53	0,07	(20; 255)
<i>ET2</i> (180 °C)	53	0,04	(22; 236)
<i>ER</i> (193 °C)	54	0,04	(21; 228)

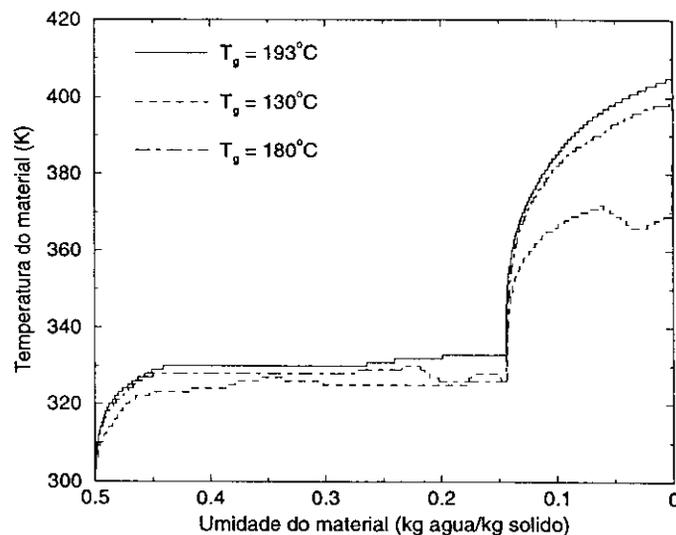


Figura 6.42: Temperatura das gotas, ou grânulos, em função de sua umidade para as temperaturas de ar na entrada de 130, 180 e 193 °C.

A figura 6.42 apresenta a temperatura das gotas/grânulos em função de suas umidades ao longo do processo de secagem; a umidade crítica é 0,14 kg água/kg sólido seco em todos os ensaios pois esse parâmetro não é função da temperatura do gás. Após atingir a umidade crítica, a temperatura do material começa a aumentar para entrar em equilíbrio com o ar. Logo, como a distribuição de temperatura nos três ensaios simulados é diferente, a temperatura final do material também será diversa.

A temperatura dos grânulos ao final do processo é diferente em consequência dos diferentes perfis de temperatura do gás: para a classe de gotas com 50 μm de diâmetro inicial, a temperatura final é de 111 °C quando os grânulos são processados num ambiente com temperatura inicial de 130 °C, e de 159 °C quando a temperatura inicial do gás é de 193 °C. O tempo de residência do material na câmara é aproximadamente 3 vezes maior no ensaio *ET2* porque a trajetória descrita por essa classe de tamanho de gotas nesse caso é desviada para o topo do secador. A tabela 6.11 apresenta os valores da temperatura final dos grânulos e o tempo de residência calculados nos três ensaios de temperatura.

Tabela 6.11: Dados da fase dispersa ao final do processo de secagem para os ensaios *ER*, *ET1* e *ET2*.

<i>Ensaio</i>	<i>Temperatura</i> (°C)	<i>Tempo de</i> <i>residência (s)</i>
<i>ET1</i> (130 °C)	111	0,14
<i>ET2</i> (180 °C)	138	0,44
<i>ER</i> (193 °C)	159	0,15

As isotermas do gás, antes e depois da injeção das gotas de suspensão dos ensaios *ET1* e *ET2* são as das figuras 6.43 e 6.44; a redução máxima de temperatura nesses ensaios é de 20 e 30 °C, respectivamente. Nos experimentos, para condições de operação semelhantes, o decréscimo na temperatura antes e depois da injeção, medida com um termopar na saída da câmara de secagem (ver esquema do equipamento no capítulo 4), está entre 11 e 14 °C. A região de maior decréscimo da temperatura é próxima ao ponto da troca de períodos de secagem, como se pode constatar por comparação entre as coordenadas *r* e *z* apresentadas na tabela 6.10 e as isotermas do gás.

Quando a temperatura inicial do gás é de 130 °C, a variação líquida da umidade absoluta do gás depois da injeção das gotas é aproximadamente 10,5% maior que nos outros dois casos, ensaios *EV2* e *ER*, como pode-se verificar pelas figuras 6.31, 6.45 e 6.46. Experimentalmente se verifica que a umidade absoluta líquida aumenta 14% no ensaio em que a temperatura foi alterada de 150 para 130 °C.

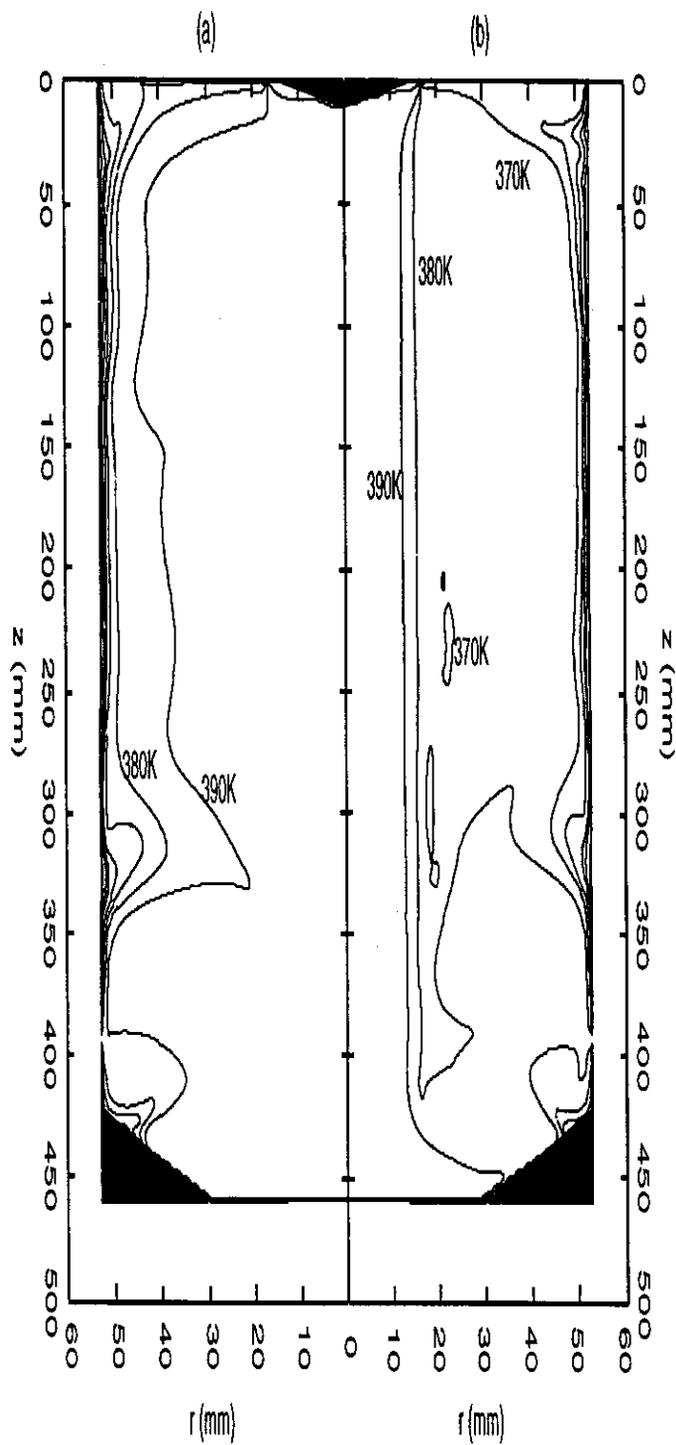


Figura 6.43: Ensaio *ET1* - 130 °C. Isotermas do gás (a) antes e (b) depois da injeção das gotas de suspensão de alumina. Linha mais interna de 390 K (117 °C), diminuindo em intervalos de 10 K.

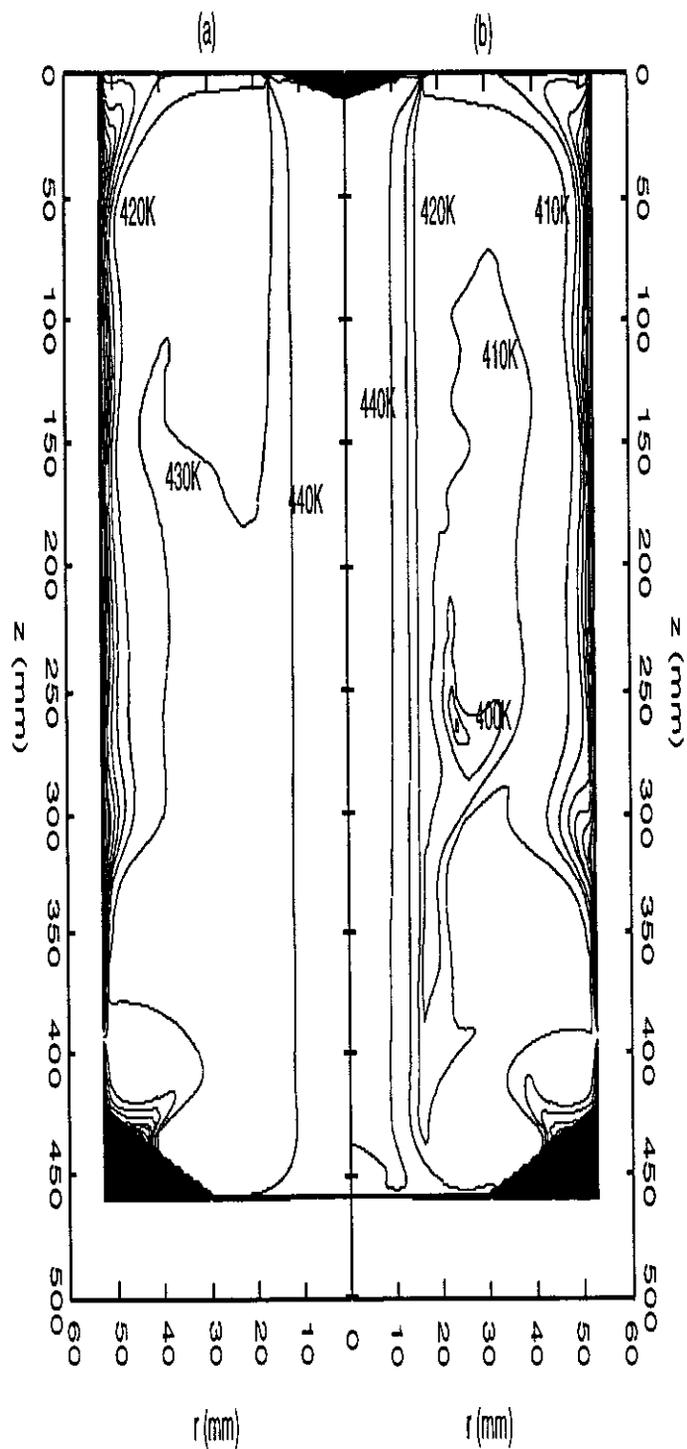


Figura 6.44: Ensaio *ET2* - 180 °C. Isotermas do gás (a) antes e (b) depois da injeção das gotas de suspensão de alumina. Linha mais interna de 440 K (167 °C), diminuindo em intervalos de 10 K.

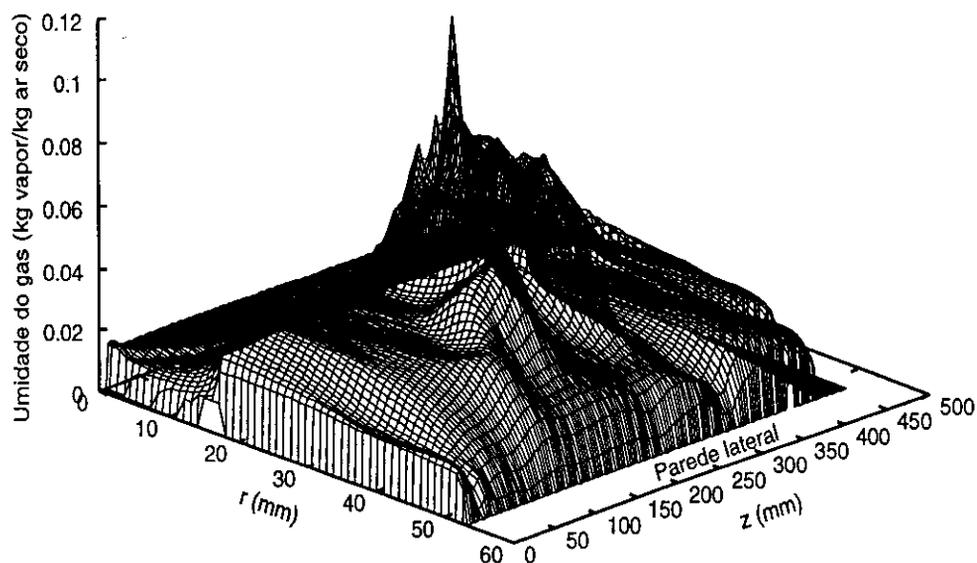


Figura 6.45: Distribuição da umidade do gás depois da secagem para o ensaio com temperatura inicial de 130 °C.

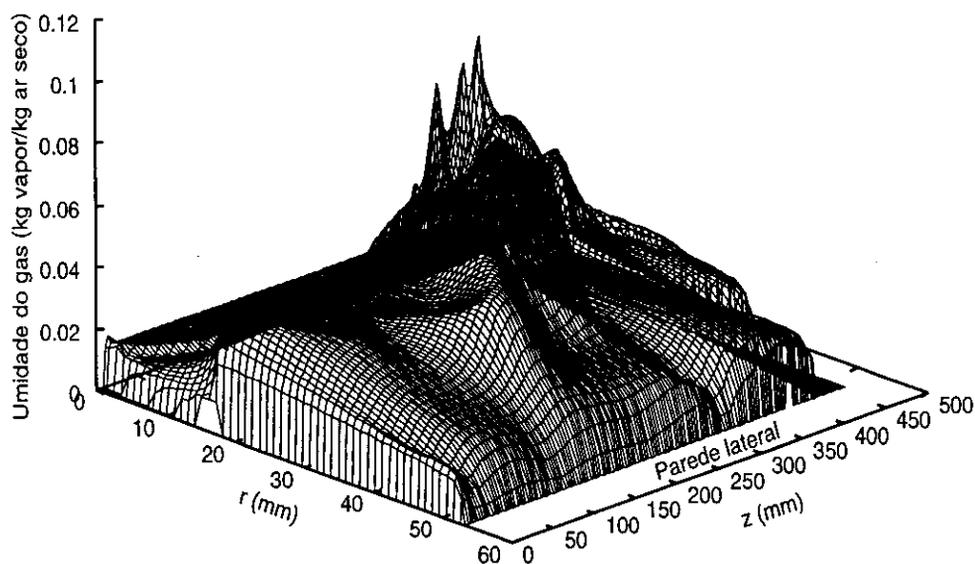


Figura 6.46: Distribuição da umidade do gás depois da secagem para o ensaio com temperatura inicial de 180 °C.

6.3.3 Taxa de alimentação da suspensão de alumina

A tabela 6.12 apresenta os valores da taxa de alimentação de suspensão usada nos ensaios numéricos, em m^3/h e na correspondente porcentagem da capacidade da bomba peristáltica do Büchi. Nos experimentos, a faixa operacional desse parâmetro variou entre 2 e 15% da bomba.

Tabela 6.12: Valores da taxa de alimentação.

<i>Parâmetro testado</i>	<i>EA1</i>	<i>EA2</i>	<i>ER</i>
Taxa de alimentação (m^3/h)	5×10^{-5}	$1,7 \times 10^{-4}$	$3,6 \times 10^{-4}$
Capacidade da bomba (%)	2	7	15

Devido ao acoplamento de todas as variáveis dependentes de ambas as fases, dispersa e gasosa, o processamento de quantidades diferentes de material altera de maneira singular os perfis de temperatura, velocidade e umidade que, por sua vez, modificam o histórico de temperatura, massa e tempo de residência das gotas/grânulos. A figura 6.47 mostra que as trajetórias das gotas de $50 \mu m$ de diâmetro inicial são eventualmente alteradas quando se faz uso de diferentes taxas de alimentação. Como para taxas de alimentação menores a temperatura do gás é maior, a evaporação da água contida no material é mais rápida que quando uma maior quantidade de material é processada, como mostra a figura 6.48; essa diferença no tempo chega a ser de 27% entre as taxas de 2 e 15%.

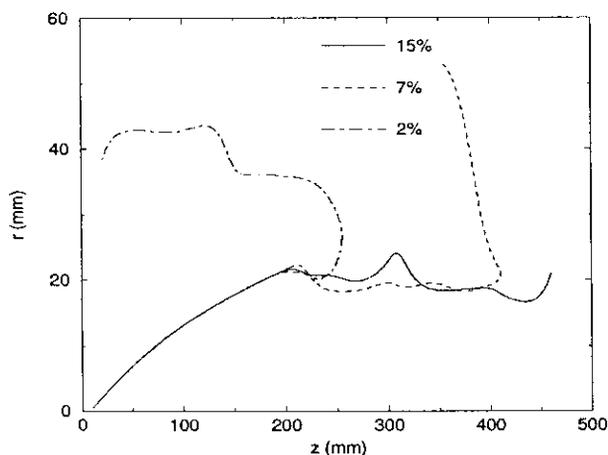


Figura 6.47: Trajetórias das gotas de diâmetro inicial de $50 \mu m$ para as taxas de fluxo de suspensão de 15, 7 e 2% da capacidade da bomba peristáltica do Büchi.

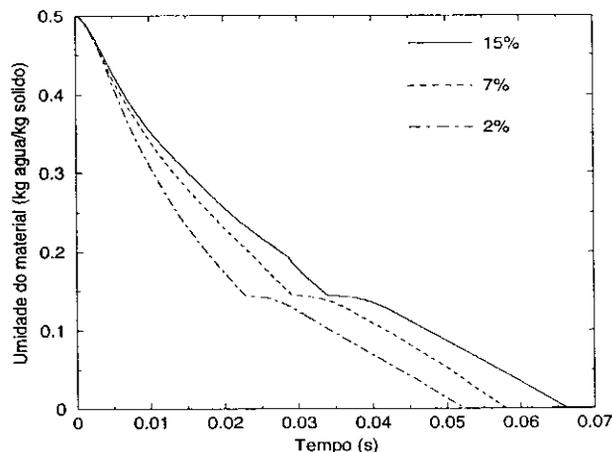


Figura 6.48: Umidade das gotas de diâmetro inicial de $50 \mu m$ para as taxas de fluxo de suspensão de 15, 7 e 2% da capacidade da bomba peristáltica do Büchi.

A temperatura do material, principalmente no segundo período de secagem, difere nos três casos, como mostra a figura 6.49, pois há mudanças no perfil de temperatura do gás; a diferença entre os casos com taxas de 2 e 15% da bomba é de 5% em $t = 0,08$ s.

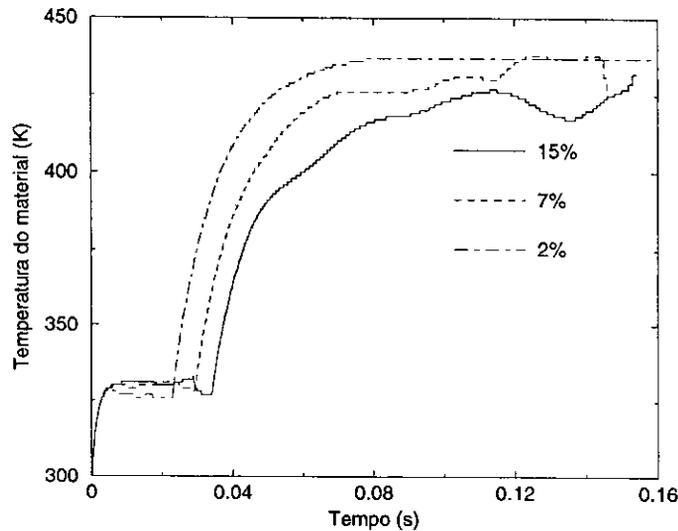


Figura 6.49: Temperatura das gotas, ou grânulos, em função do tempo para as taxas de fluxo de material de 15, 7 e 2% da capacidade da bomba peristáltica do Büchi.

Tabela 6.13: Dados da fase dispersa na troca do primeiro para o segundo período de secagem nos ensaios *ER*, *EA1* e *EA2*.

<i>Ensaio</i>	<i>Temperatura</i> (°C)	<i>Tempo</i> (s)	<i>r; z</i> (mm)
<i>EA1</i> (2%)	53	0,023	(22; 212)
<i>EA2</i> (7%)	55	0,029	(21; 217)
<i>ER</i> (15%)	54	0,035	(21; 228)

Um resumo da temperatura, do tempo e das coordenadas das gotas de $50 \mu\text{m}$ de diâmetro inicial na mudança do primeiro para o segundo período de secagem é apresentado na tabela 6.13. Na tabela 6.14 estão a temperatura e o tempo de residência ao final do processo de secagem. Para o ensaio com taxa de 2%, essa classe de tamanho de gotas teve sua trajetória desviada tornando, conseqüentemente, seu tempo de residência maior que as que atingiram a base da câmara sem qualquer desvio. As diferenças no tempo para troca de períodos é de 26% quando a taxa passa de 2 para 7%, e de 20% quando ela passa de 7 para 15%. A temperatura dos grânulos no final da secagem apresenta uma diferença

Tabela 6.14: Dados da fase dispersa ao final do processo de secagem para os ensaios *ER*, *EA1* e *EA2*.

<i>Ensaio</i>	<i>Temperatura</i> (°C)	<i>Tempo de</i> <i>residência (s)</i>
<i>EA1</i> (2%)	162	0,45
<i>EA2</i> (7%)	153	0,15
<i>ER</i> (15%)	159	0,15

de apenas 9 K pois a base da câmara não é muito modificada pela mudança na taxa de injeção de material.

As figuras 6.50 e 6.51 mostram a distribuição da umidade na câmara; entre as taxas de alimentação máxima e mínima, a variação líquida da umidade é de 2,5 a 3,7 vezes. Nos experimentos, quando a taxa aumenta de 3 para 15%, a variação líquida da umidade tem seu valor quadruplicado.

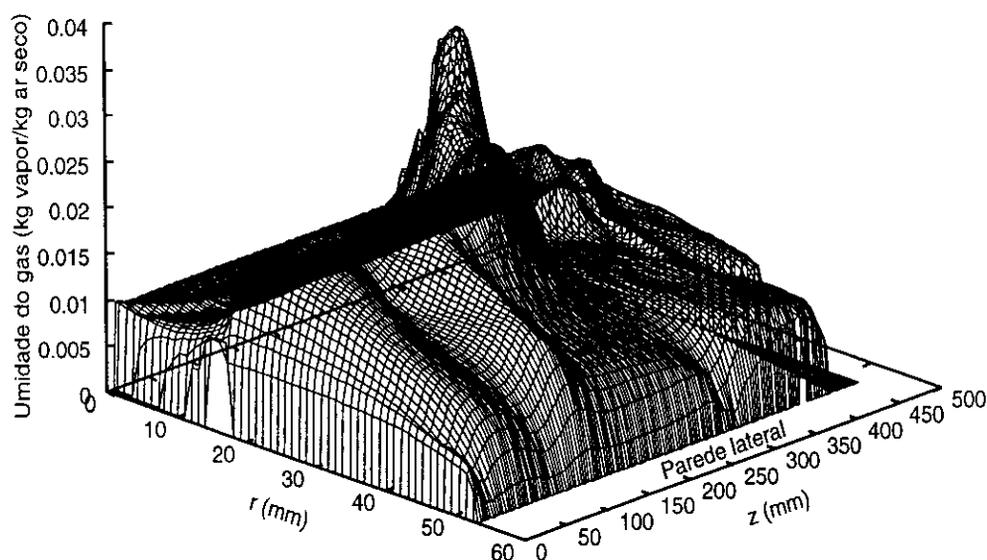


Figura 6.50: Distribuição da umidade do gás depois da secagem para a taxa de alimentação de 2% da capacidade da bomba peristáltica do Büchi.

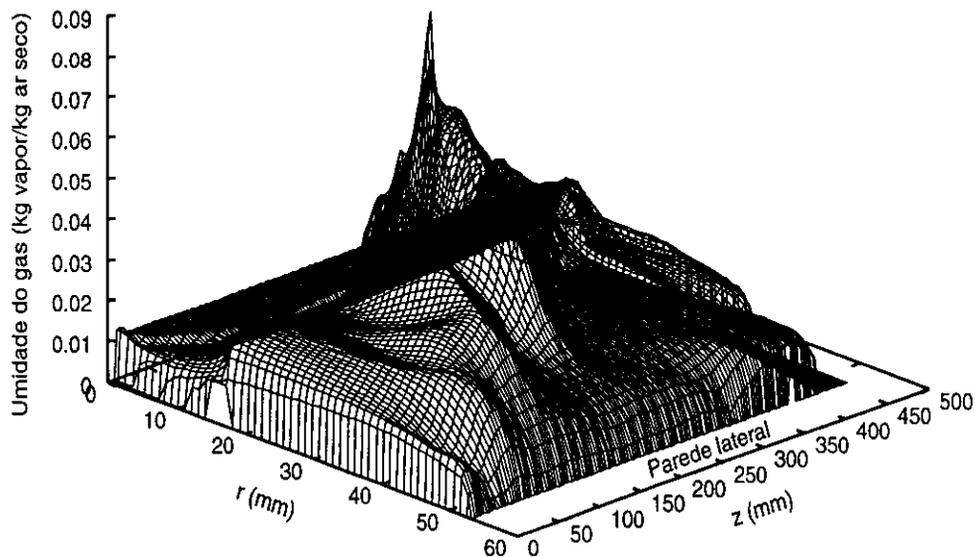


Figura 6.51: Distribuição da umidade do gás depois da secagem para a taxa de alimentação de 7% da capacidade da bomba peristáltica do Büchi.

Com o aumento na taxa de alimentação, a temperatura do gás diminui, como mostram as figuras 6.52 e 6.53, que comparam as isotermas do ensaio de referência com os ensaios de 2 e 7% de taxa de alimentação. A temperatura apresenta uma diferença de 30 K entre os ensaios *ER* e *EA1*; para os ensaios *EA2* e o de referência, a diferença é de 10 K.

As linhas de fluxo do escoamento do gás depois da injeção das gotas à taxa de 2 e 7%, figuras 6.54 e 6.55 respectivamente, evidenciam a presença de uma menor quantidade de massa de vapor d'água no gás com relação ao ensaio de referência, no qual esse parâmetro é de 15%.

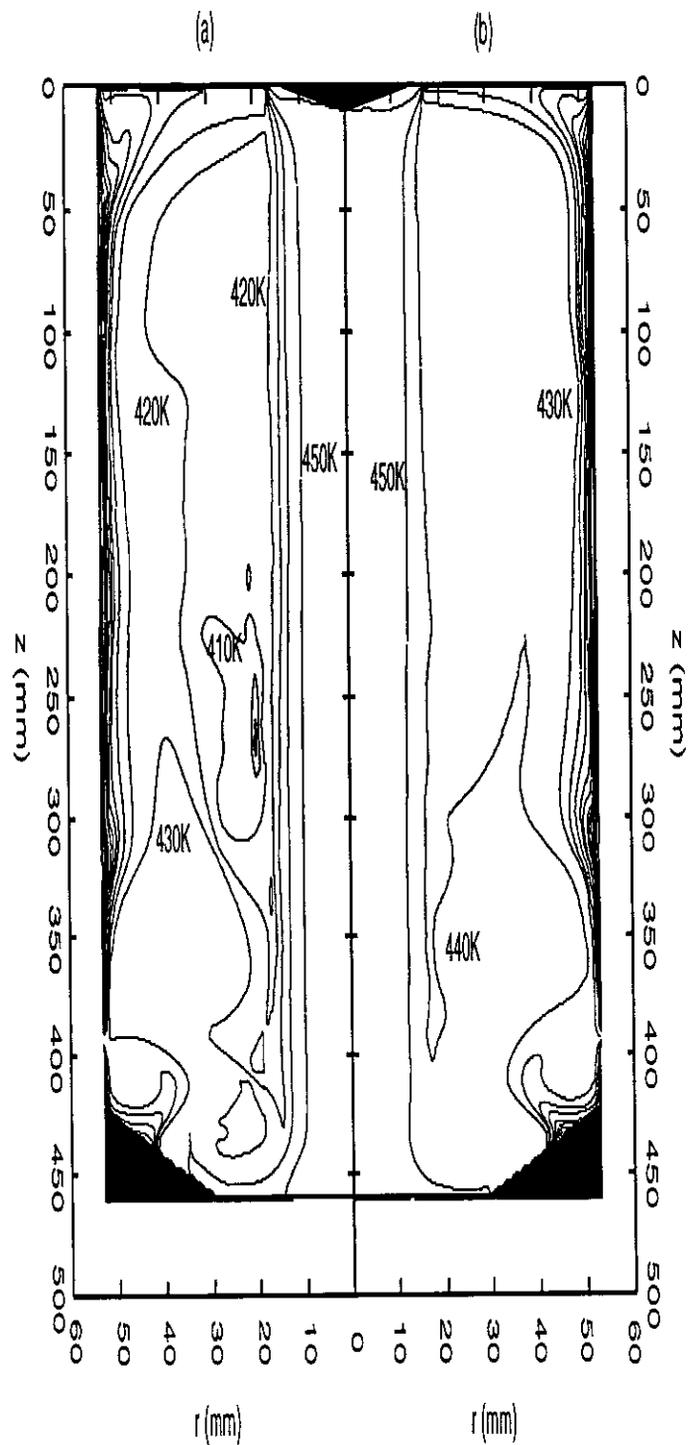


Figura 6.52: Ensaio *EA1* - 2%. Isotermas do gás depois da injeção para taxas de alimentação de (a) 15 e (b) 2% da capacidade da bomba peristáltica do Büchi. Linha mais interna de 450 K (177 °C), diminuindo em intervalos de 10 K.

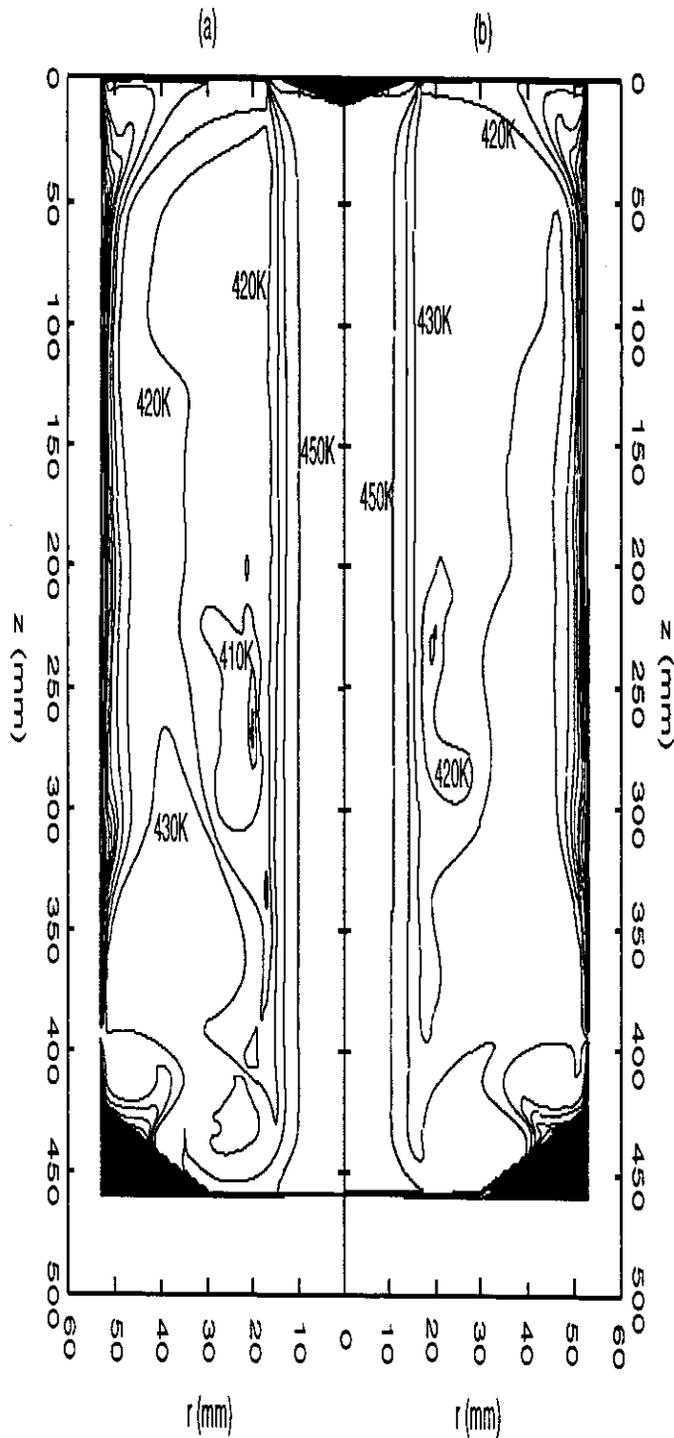


Figura 6.53: Ensaio *EA2* - 7%. Isotermas do gás depois da injeção para taxas de alimentação de (a) 15 e (b) 7% da capacidade da bomba peristáltica do Büchi. Linha mais interna de 450 K (177 °C), diminuindo em intervalos de 10 K.

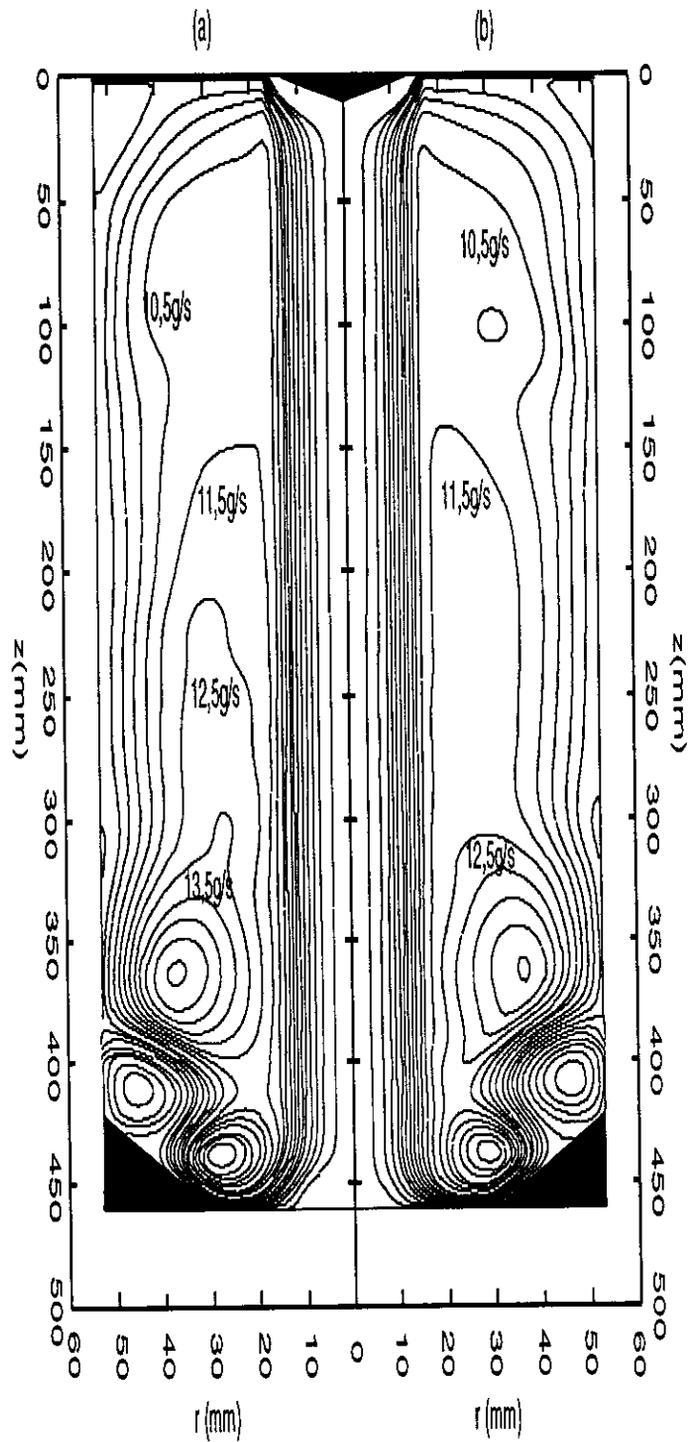


Figura 6.54: Ensaio *EA1* - 2%. Linhas de fluxo do gás depois da injeção para (a) 15 e (b) 2% da capacidade da bomba peristáltica do Büchi. Linha mais interna (próxima ao eixo de simetria) de 0,5 g/s, aumentando em intervalos de 1 g/s.

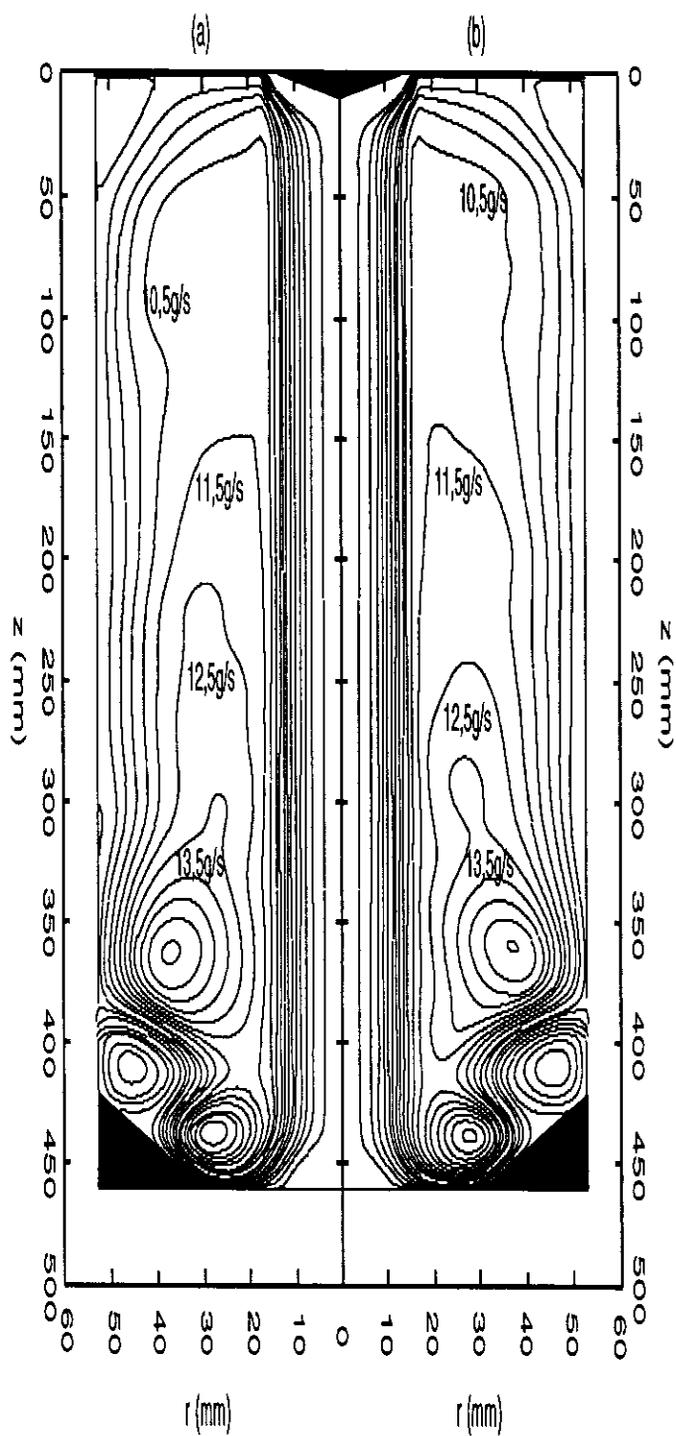


Figura 6.55: Ensaio *EA2* - 7%. Linhas de fluxo do gás depois da injeção para (a) 15 e (b) 2% da capacidade da bomba peristáltica do Büchi. Linha mais interna (próxima ao eixo de simetria) de 0,5 g/s, aumentando em intervalos de 1 g/s.

6.4 Outros resultados

Até o momento, todas as simulações apresentadas foram feitas considerando-se três classes de diâmetros iniciais de gotas. É interessante estudar os perfis das fases dispersa e gasosa considerando-se uma quantidade e uma distribuição de tamanhos maiores. Três casos diferentes foram então simulados: *i*) 5 classes de diâmetros, com tamanhos variando entre 10 e 70 μm ; *ii*) 4 classes de diâmetros, com tamanhos entre 10 e 25 μm ; *iii*) 4 classes de diâmetros, com tamanhos entre 50 e 100 μm . Os resultados obtidos são apresentados na seção 6.4.1.

A velocidade inicial das gotas é calculada em função da velocidade do gás de secagem e do gás de atomização, como descrito na seção 6.1, variando em apenas 1 m/s quando se aumenta a vazão do gás de atomização de 0,7 para 0,8 m^3/h . Por se tratar de uma hipótese, valores maiores para a velocidade de injeção das gotas na câmara de secagem foram estudados e os resultados obtidos são comparados, na seção 6.4.2, aos do ensaio de referência.

6.4.1 Diâmetro inicial das gotas

Os ensaios numéricos realizados com diferentes tamanhos de gotas e quantidades de classes são resumidos na tabela 6.15; a porcentagem que cada classe de gotas representa do total de massa injetada no sistema é também apresentada nessa tabela. O primeiro teste simula 5 classes diferentes, com diâmetros de 10, 20, 40, 60 e 70 μm . O segundo ensaio simula quatro classes de diâmetros relativamente pequenos: 10, 15, 20 e 25 μm . Por fim, é feito um teste com diâmetros maiores, também para quatro classes de tamanho: 50, 70, 90 e 100 μm .

Tabela 6.15: Distribuição de diâmetros iniciais e da porcentagem do total de massa injetada no sistema para cada classe de gotas.

<i>ED1</i>	<i>ED2</i>	<i>ED3</i>	<i>ER</i>
<i>Diâmetro; Massa</i>	<i>Diâmetro; Massa</i>	<i>Diâmetro; Massa</i>	<i>Diâmetro; Massa</i>
10 μm ; 20%	10 μm ; 10%	50 μm ; 40%	30 μm ; 30%
20 μm ; 30%	15 μm ; 20%	70 μm ; 30%	40 μm ; 40%
40 μm ; 20%	20 μm ; 40%	90 μm ; 20%	50 μm ; 30%
60 μm ; 20%	25 μm ; 30%	100 μm ; 10%	
70 μm ; 10%			

Para o primeiro caso estudado, ensaio *ED1*, as trajetórias das gotas são as da figura 6.56; as gotas mais leves permanecem na região central da câmara pois possuem menor inércia, enquanto as maiores vão mais para longe do eixo de simetria e, eventualmente, entram na região de recirculação do ar, tendo suas trajetórias desviadas. A umidade

para cada classe de diâmetro é apresentada na figura 6.57. O aumento no tempo total de secagem é exponencial: a gota de $70 \mu m$ demora 40 vezes mais para secar por completo que a de $10 \mu m$; a quantidade de água em cada uma dessas gotas e as diferentes regiões de temperatura da câmara experimentadas por elas são, por certo, os principais fatores responsáveis por essa diferença no tempo de secagem. Nas tabelas 6.16 e 6.17 são apresentados os dados das gotas na mudança do primeiro para o segundo período de secagem e ao final do processo para o ensaio *ED1*.

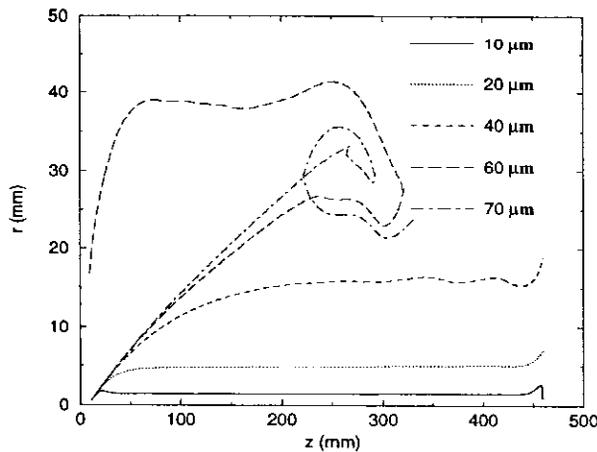


Figura 6.56: Trajetórias das gotas de diâmetros iniciais de 10, 20, 40, 60 e $70 \mu m$.

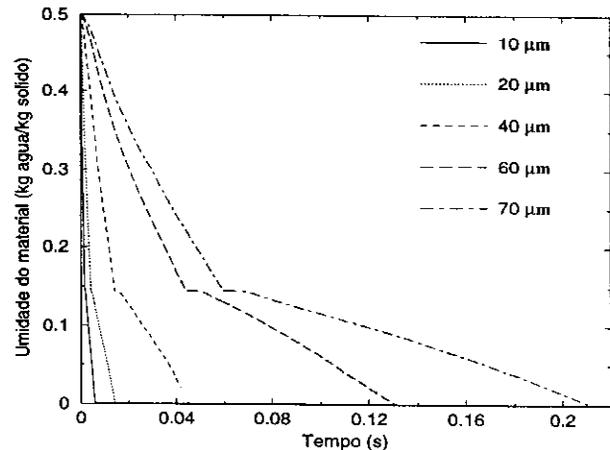


Figura 6.57: Umidade das gotas de diâmetros iniciais de 10, 20, 40, 60 e $70 \mu m$.

Tabela 6.16: Dados da fase dispersa na troca do primeiro para o segundo período de secagem no ensaio *ED1*.

Diâmetro (μm)	Tempo (s)	Umidade (kg água/kg sólido)	r; z (mm)
10	0,002	0,145	(1,5; 36)
20	0,004	0,143	(4,7; 97)
40	0,014	0,143	(16; 262)
60	0,044	0,144	(26; 267)
70	0,06	0,145	(33; 267)

O tempo para a troca de períodos aumenta também exponencialmente com o diâmetro, sendo 30 vezes maior para a gota de $70 \mu m$ em relação à de $10 \mu m$. Os gráficos do tempo de secagem em função do diâmetro da gota no momento da troca de períodos e ao final

Tabela 6.17: Dados da fase dispersa ao final do processo de secagem para o ensaio *ED1*.

<i>Diâmetro</i> (μm)	<i>Tempo de</i> <i>residência (s)</i>	<i>Umidade residual</i> (<i>kg água/kg sólido</i>)	<i>Diâmetro</i> <i>final (μm)</i>
10	0,45	—	9
20	0,02	—	18
40	0,04	$2,03 \times 10^{-2}$	36
60	0,42	—	54
70	0,45	—	63

do escoamento, figuras 6.58 e 6.59, respectivamente, evidenciam o comportamento exponencial do tempo com o aumento do diâmetro. O tempo de residência varia dependendo dos desvios sofridos pelas gotas durante seu trajeto dentro da câmara de secagem.

É interessante observar que, mesmo sem aparentemente ter sua trajetória alterada, a gota de $10 \mu m$ tem um tempo de residência comparável ao das gotas que sofrem desvios em seus trajetos pois essa classe de gotas entra numa região de recirculação de gás existente na base da câmara.

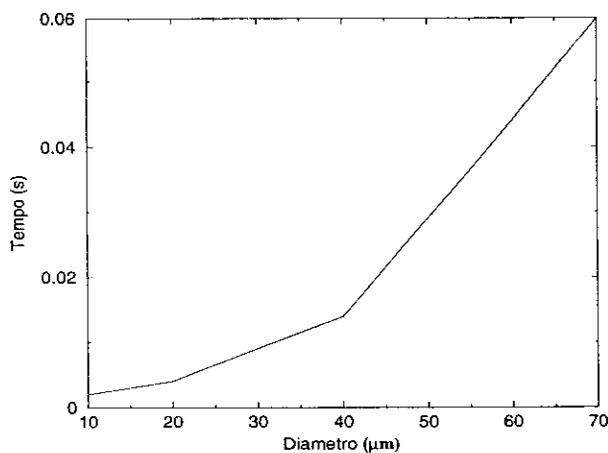


Figura 6.58: Tempo para troca de períodos em função do diâmetro inicial das gotas.

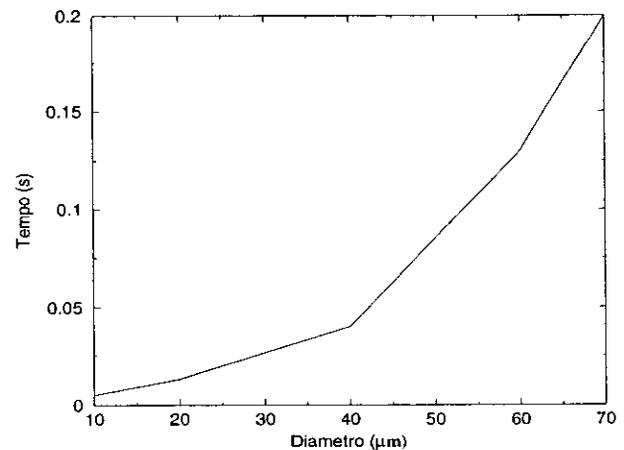


Figura 6.59: Tempo total para secagem em função do diâmetro inicial das gotas.

O perfil de umidade do gás depois da injeção das gotas para o ensaio com cinco classes de diâmetros apresenta duas regiões de máximo pois as gotas de $10 \mu m$ e $20 \mu m$, que representam metade do total de massa injetado no sistema, permanecem na região mais central da câmara durante todo o processo de secagem, enquanto as gotas de $40 \mu m$,

60 e 70 μm , que atingem valores maiores para r em suas trajetórias, determinam uma concentração de vapor em coordenadas radiais também maiores.

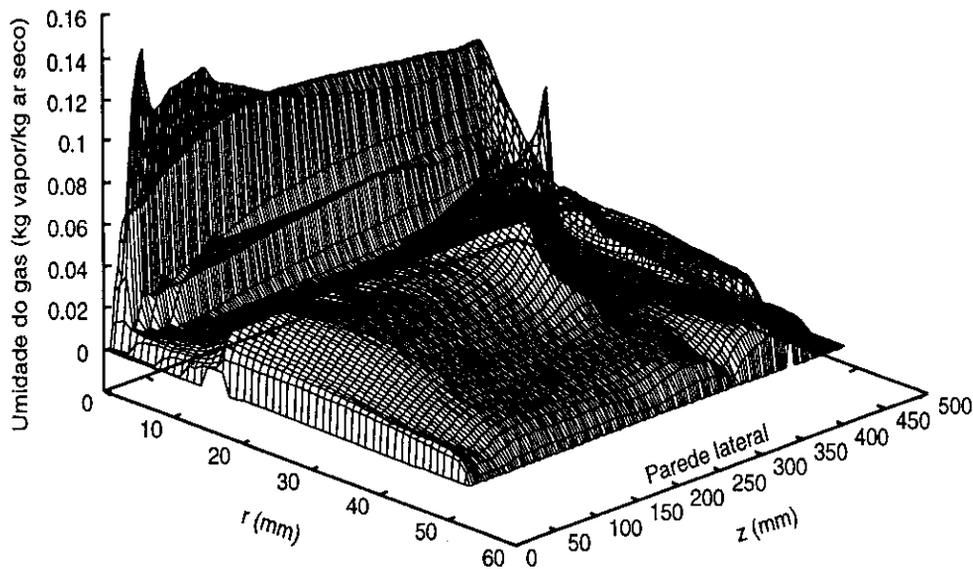


Figura 6.60: Distribuição da umidade do gás depois da injeção de 5 classes de diâmetros.

As isotermas do ar de secagem depois da injeção das gotas para esse ensaio são comparadas às do ensaio de referência na figura 6.61; a região central é agora mais modificada por causa das gotas de 10 e 20 μm ; porém, como há gotas maiores, a região de coordenada radial entre 20 e 30 mm apresenta também decréscimo de temperatura, como acontece para o ensaio de referência.

Para os ensaios de três e cinco classes de diâmetros iniciais, as linhas de fluxo do escoamento depois da injeção são as da figura 6.62. A distribuição da concentração de vapor é diferente nos dois casos pois no ensaio *ED1* há gotas menores que secam por completo mais rapidamente, causando, portanto, o aumento de massa numa região de coordenada axial menor em relação ao ensaio *ER*.

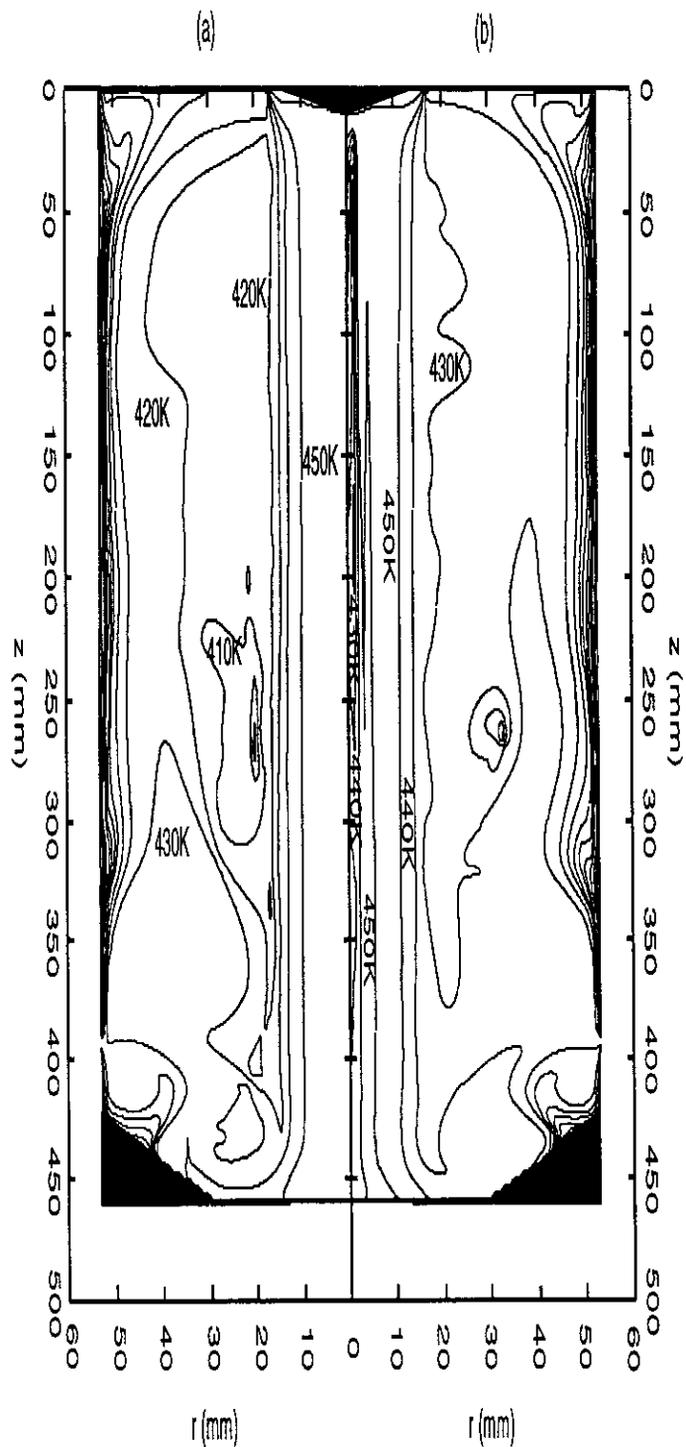


Figura 6.61: Ensaio *ED1* - cinco classes de diâmetros entre 10 e 70 μm . Isotermas do gás depois da injeção de (a) 3 e (b) 5 classes de diâmetros iniciais de gotas. Linha mais interna de 450 K (177 °C), diminuindo em intervalos de 10 K.

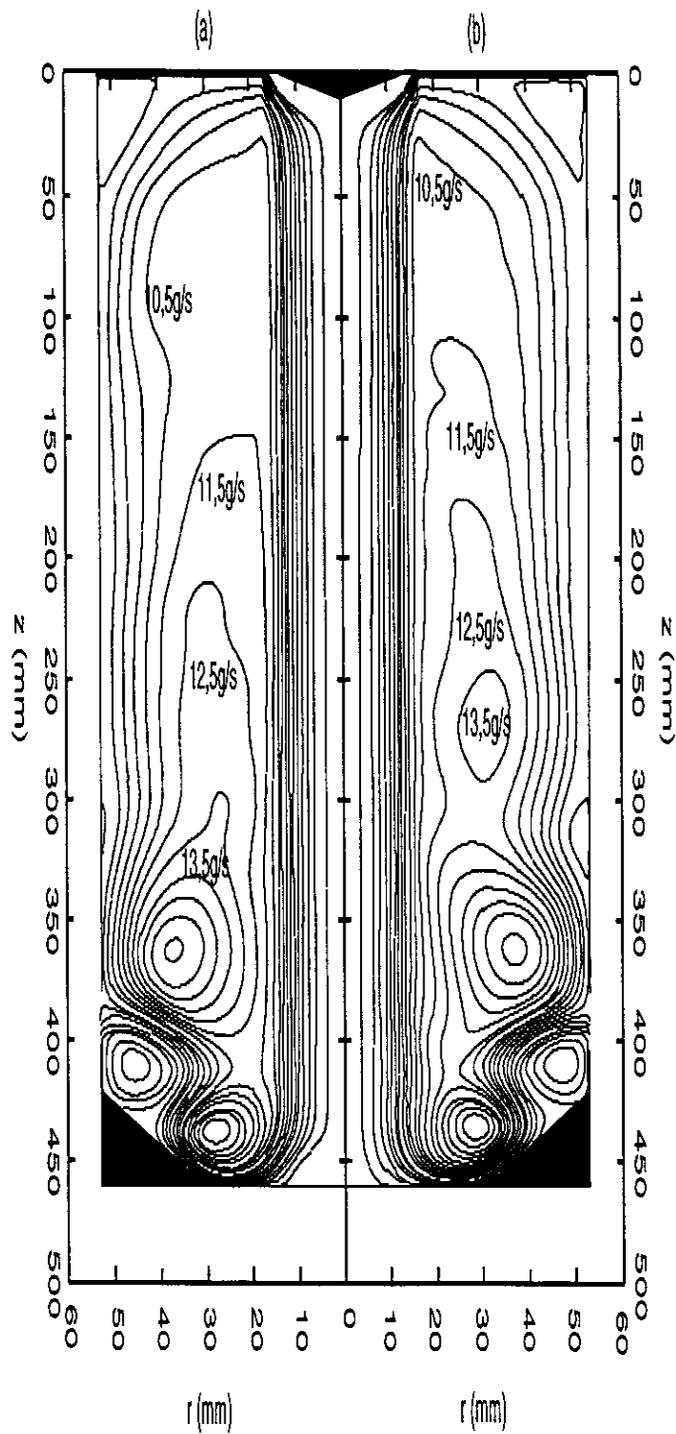


Figura 6.62: Ensaio *ED1* - cinco classes de diâmetros entre 10 e 70 μm . Linhas de fluxo do gás depois da injeção de (a) 3 e (b) 5 classes de diâmetros iniciais de gotas. Linha mais interna (próxima ao eixo de simetria) de 0,5 g/s, aumentando em intervalos de 1 g/s.

No ensaio *ED2*, no qual os tamanhos iniciais de gotas simulados são de 10, 15, 20 e 25 μm , todas as gotas descrevem suas trajetórias, figura 6.63, essencialmente na região central da câmara, sem penetrar mais que 10 mm em r . O tempo gasto para secar completamente as gotas aumenta com o diâmetro porque as gotas maiores contêm mais massa de água; porém o aumento no tempo total de secagem é mais lento que o apresentado no ensaio com cinco classes de tamanhos de gotas pois, neste caso, a diferença entre os diâmetros é menor e as condições de temperatura e velocidade do ar experimentadas pelas gotas diferem menos por causa de suas trajetórias. As tabelas 6.18 e 6.19 resumem os dados das gotas/grânulos na troca do primeiro para o segundo período de secagem e ao final do processo.

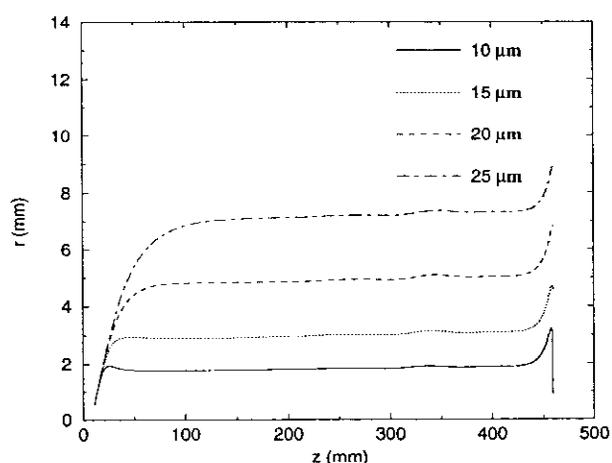


Figura 6.63: Trajetórias das gotas de diâmetros iniciais de 10, 15, 20 e 25 μm .

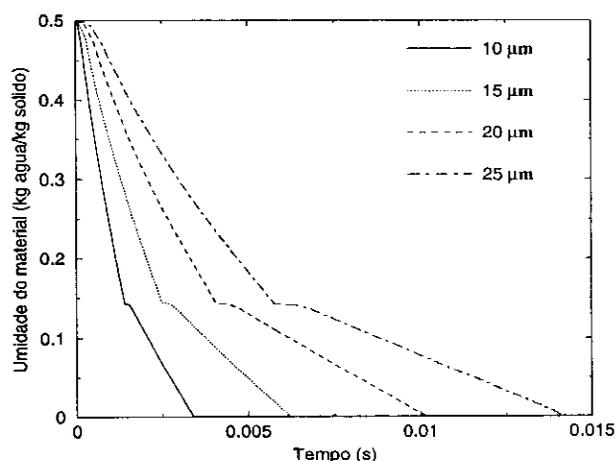


Figura 6.64: Umidade das gotas de diâmetros iniciais de 10, 15, 20 e 25 μm .

Tabela 6.18: Dados da fase dispersa na troca do primeiro para o segundo período de secagem no ensaio *ED2*.

Diâmetro (μm)	Tempo (s)	Umidade (kg água/kg sólido)	$r; z$ (mm)
10	0,002	0,143	(1,8; 37)
15	0,003	0,144	(2,9; 61)
20	0,004	0,143	(4,8; 98)
25	0,006	0,143	(7; 144)

Como as gotas são injetadas perto do eixo de simetria e se mantêm na região central ao longo de todo o escoamento, o perfil de umidade do gás depois da injeção, figura 6.65, é maior nessa região. Em conseqüência, a distribuição de temperatura, representada pelas isoterms da figura 6.66, apresenta decréscimos maiores também na região central da câmara.

Tabela 6.19: Dados da fase dispersa ao final do processo de secagem para o ensaio *ED2*.

<i>Diâmetro</i> (μm)	<i>Tempo de</i> <i>residência (s)</i>	<i>Diâmetro</i> <i>final (μm)</i>
10	0,37	9,96
15	0,02	13,5
20	0,02	18
25	0,02	22,6

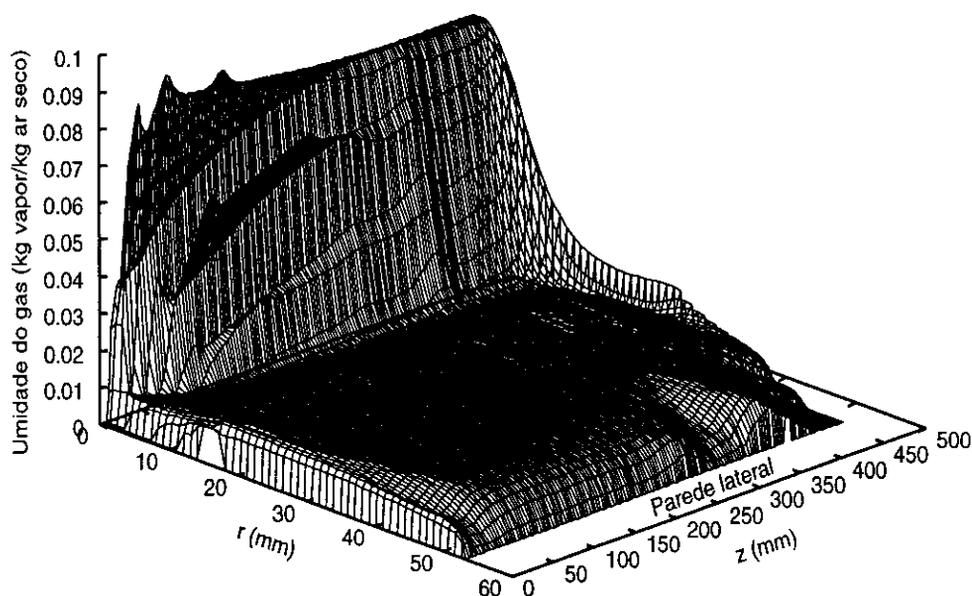


Figura 6.65: Distribuição da umidade do gás depois da injeção para 4 classes de diâmetros pequenos.

A velocidade do gás, figura 6.67, apresenta oscilações causadas pelos grânulos para z entre 250 e 450 mm e para r entre 0 e 10 mm , pois todos os grânulos concentram seus caminhos nessa região da câmara, o que não acontecia nos ensaios que simulavam a secagem de gotas de diâmetros maiores. O motivo dessas oscilações ocorrerem somente a partir da metade da câmara deve-se, decerto, à condição de velocidade zero imposta na parede inferior que torna essa região mais sensível a perturbações.

As linhas de fluxo do gás apresentam decréscimos de fluxo de massa na região de z entre 250 e 350 mm e r aproximadamente 20 mm com relação ao ensaio de referência, porém há um aumento nas linhas de fluxo na base da câmara.

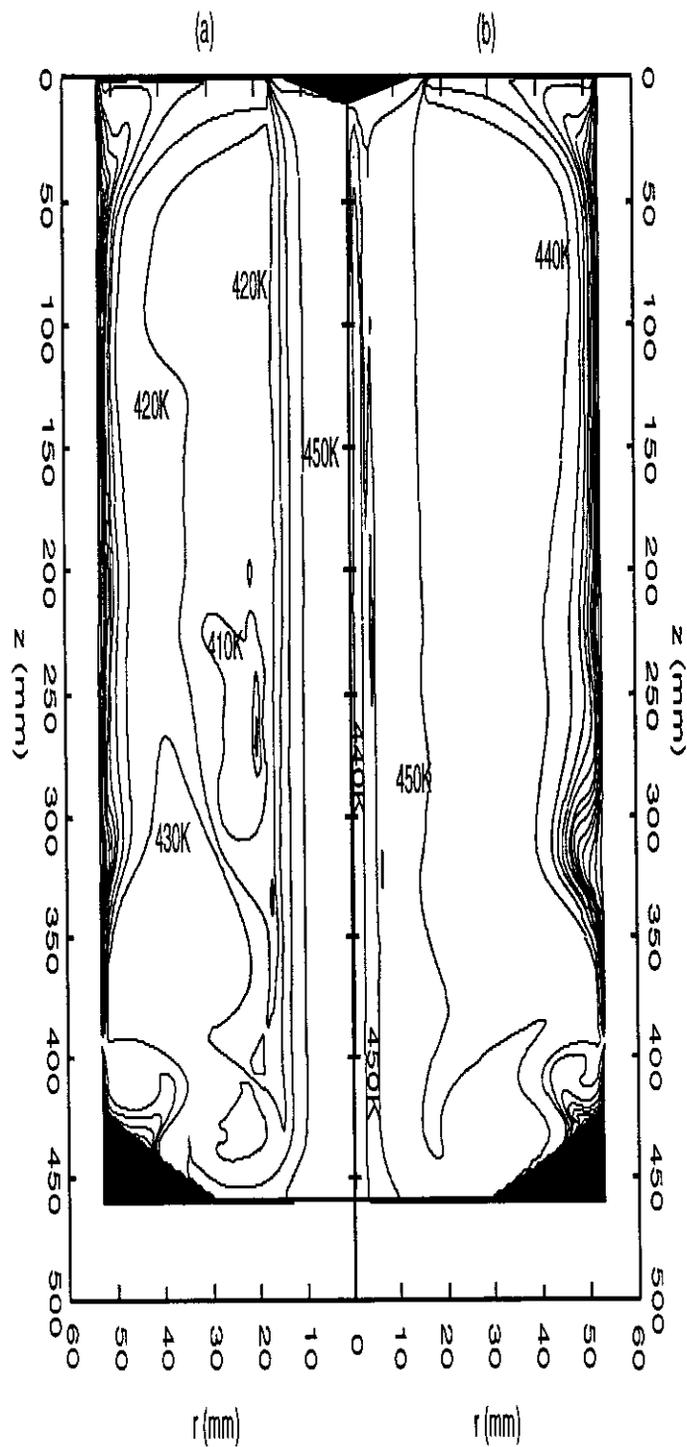


Figura 6.66: Ensaio *ED2* - quatro classes de diâmetros de 10 a 25 μm . Isothermas do gás depois da injeção de (a) 3 e (b) 4 classes de diâmetros iniciais de gotas. Linha mais interna de 450 K (177 °C), diminuindo em intervalos de 10 K.

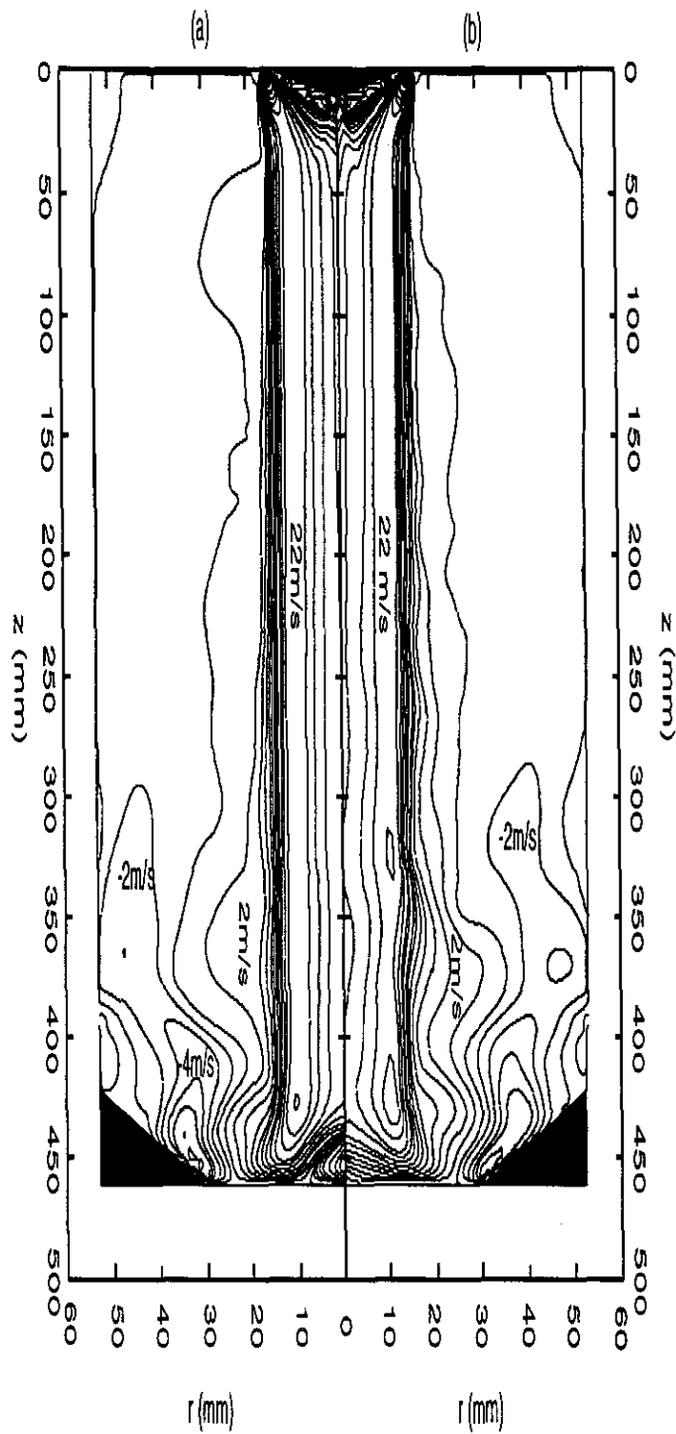


Figura 6.67: Ensaio *ED2* - quatro classes de diâmetros de 10 a 25 μm . Linhas de velocidade constante depois da injeção de (a) 3 e (b) 4 classes de diâmetros iniciais de gotas. Linha central de 22 m/s , variando em intervalos de 2 m/s .

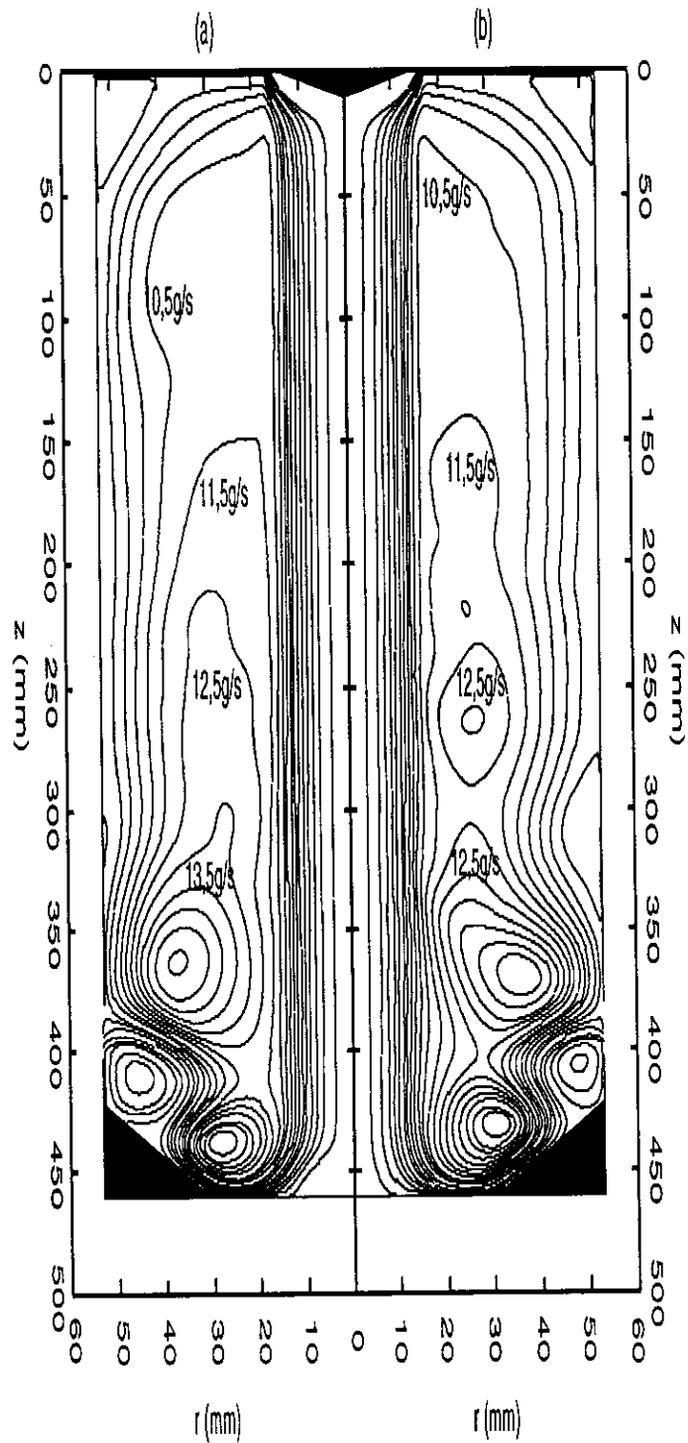


Figura 6.68: Ensaio *ED2* - quatro classes de diâmetros de 10 a 25 μm . Linhas de fluxo do gás depois da injeção de (a) 3 e (b) 4 classes de diâmetros iniciais de gotas. Linha mais interna (próxima ao eixo de simetria) de 0,5 g/s, aumentando em intervalos de 1 g/s.

Para o ensaio com gotas de diâmetro maiores, ensaio *ED3*, as trajetórias descritas são as da figura 6.69; a gota de $100\ \mu\text{m}$ atinge a parede da câmara completamente úmida, como pode-se verificar através do gráfico da umidade do material em função do tempo, figura 6.70. Como a inércia das gotas é maior, suas velocidades são relaxadas depois de entrarem na região de recirculação do gás. O tempo, a umidade crítica e as coordenadas das gotas na troca do primeiro para o segundo período de secagem para o ensaio *ED3* estão relacionados na tabela 6.20; na tabela 6.21, estão o tempo de residência, a umidade e o diâmetro dos grânulos ao final dos cálculos.

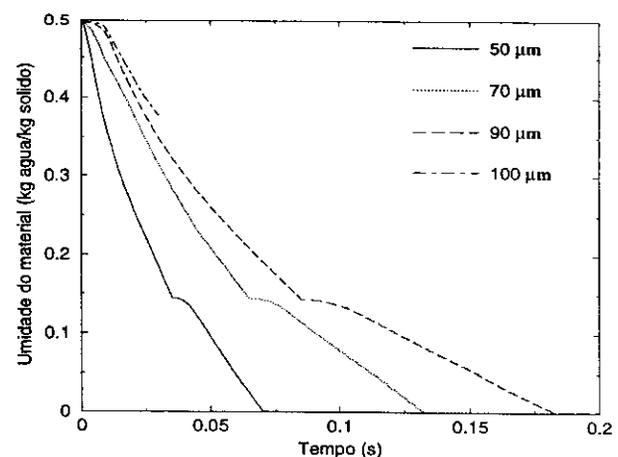
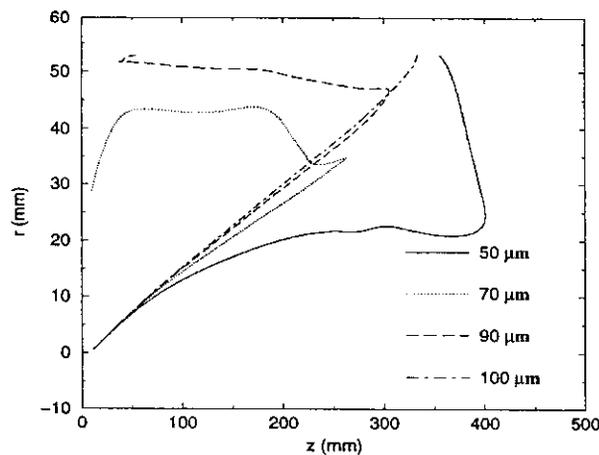


Figura 6.69: Trajetórias das gotas de diâmetros iniciais de 50, 70, 90 e $100\ \mu\text{m}$.

Figura 6.70: Umidade das gotas de diâmetros iniciais de 50, 70, 90 e $100\ \mu\text{m}$.

Tabela 6.20: Dados da fase dispersa na troca do primeiro para o segundo período de secagem no ensaio *ED3*.

Diâmetro (μm)	Tempo (s)	Umidade (kg água/kg sólido)	$r; z$ (mm)
50	0,035	0,144	(22; 256)
70	0,065	0,144	(33; 245)
90	0,085	0,144	(49; 217)
100	—	—	—

Como as gotas de 50, 70, 90 e $100\ \mu\text{m}$ passam por locais da câmara relativamente semelhantes às gotas do ensaio de referência, o perfil de umidade nesses dois ensaios, *ED3* e *ER*, tem as mesmas características e valor máximo, como pode-se ver pela comparação entre as figuras 6.31 e 6.71.

Tabela 6.21: Dados da fase dispersa ao final do processo de secagem para o ensaio *ED3*.

<i>Diâmetro</i> (μm)	<i>Tempo de</i> <i>residência (s)</i>	<i>Umidade residual</i> (<i>kg água/kg sólido</i>)	<i>Diâmetro</i> <i>final (μm)</i>
50	0,13	—	45
70	0,3	—	63
90	0,45	—	81,5
100	0,03	0,38	97

O mesmo acontece com a temperatura do gás, que tem sua maior redução praticamente na mesma região que no ensaio tomado como referência, como pode-se constatar pela figura 6.72. As linhas de fluxo, figura 6.73, apresentam valores maiores que no ensaio *ER* em z entre 75 e 200 mm porque as gotas maiores, e de maior inércia, conseguem atingir posições radiais mais avançadas numa distância axial mais curta que gotas menores.

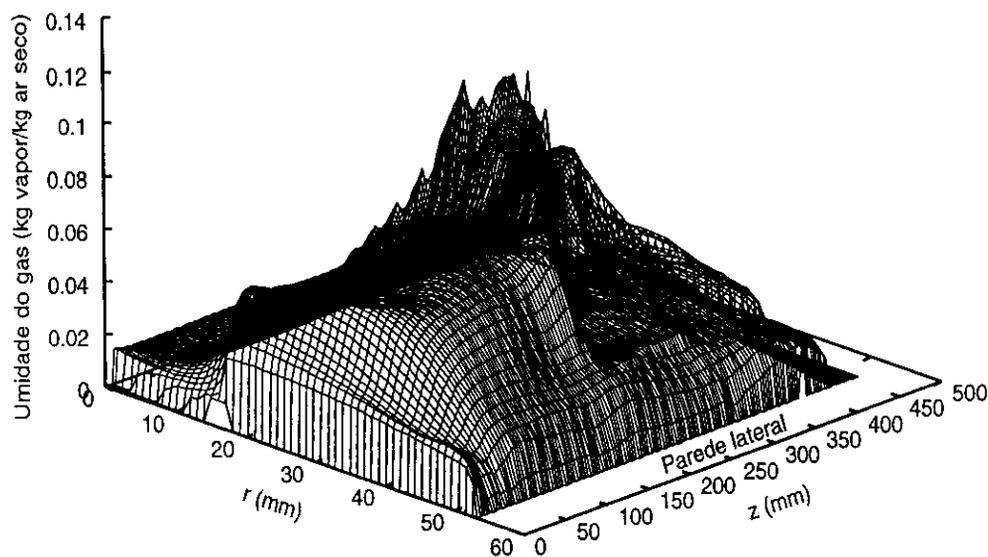


Figura 6.71: Distribuição da umidade do gás depois da injeção para 4 classes de diâmetros grandes.

Os testes numéricos ressaltam a importância de uma distribuição estreita de tamanhos de gotas em processos de secagem por atomização, pois as diferenças no tempo de secagem são mais amenas quando a diferença entre os diâmetros das gotas é menor, como mostram os resultados obtidos nas simulações dos ensaios *ED1*, *ED2* e *ED3*, figuras 6.57, 6.64 e 6.70, respectivamente.

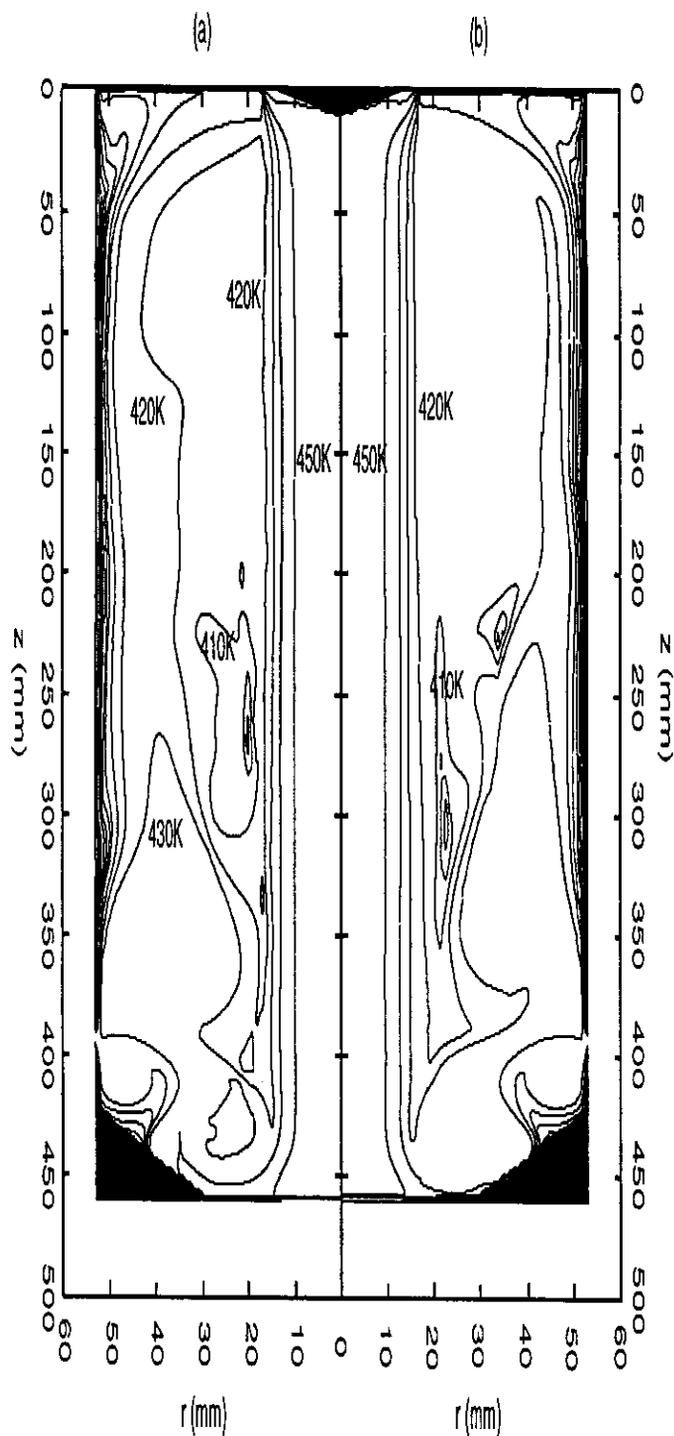


Figura 6.72: Ensaio *ED3* - quatro classes de diâmetros de 50 a 100 μm . Isotermas do gás depois da injeção de (a) 3 e (b) 4 classes de diâmetros iniciais de gotas. Linha mais interna de 450 K (177 °C), diminuindo em intervalos de 10 K.

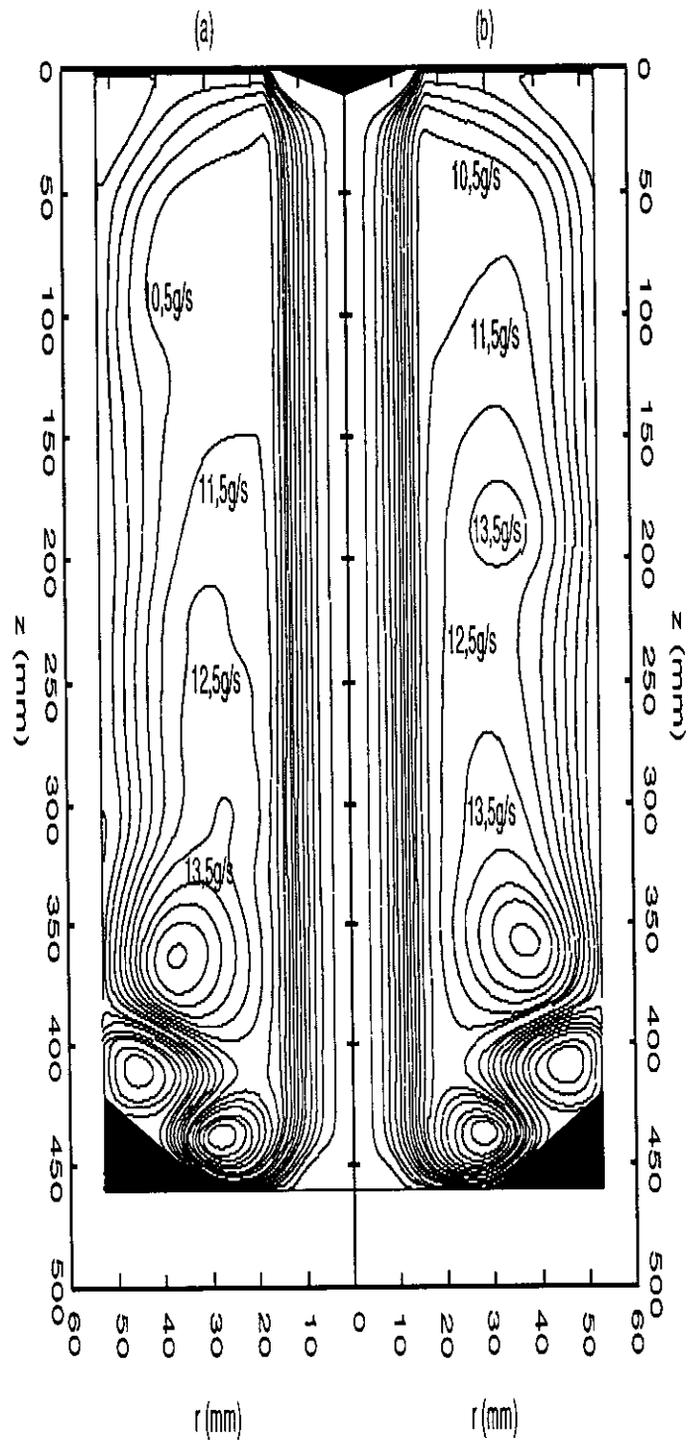


Figura 6.73: Ensaio *ED3* - quatro classes de diâmetros de 50 a 100 μm . Linhas de fluxo do gás depois da injeção de (a) 3 e (b) 4 classes de diâmetros iniciais de gotas. Linha mais interna (próxima ao eixo de simetria) de 0,5 g/s , aumentando em intervalos de 1 g/s .

6.4.2 Velocidade de injeção das gotas

Se a velocidade de injeção fosse calculada somente com base na velocidade do gás de atomização, ela variaria entre 50 e 100 m/s para a configuração interna do bico injetor, e entre 100 e 200 m/s para a configuração externa (para esquema das posições do bico injetor, ver capítulo 4). No entanto, uma parte dessa energia cinética é utilizada para transformar o jato de suspensão em gotículas. Infelizmente, não se encontraram referências que tratassem desse assunto e por isso optou-se pela hipótese proposta por Negiz [28]: $\vec{u}_{p0} = \vec{u} + 0,04\vec{u}_{atz}$. Porém, testes para velocidades de injeção maiores que as usadas até então são conduzidos de forma simples. Um ensaio com uma velocidade de injeção de 120 m/s é comparado com o de referência, que tem velocidade de injeção de 52 m/s .

As trajetórias das gotas de 50 μm de diâmetro inicial para os dois valores de velocidade de injeção são comparadas na figura 6.74. Devido à maior velocidade inicial, a gota injetada com 120 m/s tem quantidade de movimento suficiente para entrar na região de recirculação do ar de secagem enquanto que a injetada com 52 m/s é arrastada quando passa na região da entrada de gás, seguindo as linhas de fluxo do escoamento. A umidade do material injetado com uma velocidade maior decresce mais lentamente porque a temperatura do gás em regiões de coordenada radial maiores é menor; de qualquer maneira, a diferença no tempo total para a secagem é de 5%, que se comparada, por exemplo, às diferenças obtidas no tempo de secagem do ensaio *ED1*, que é 40 vezes maior para a gota de diâmetro inicial de 70 μm em relação à de 10 μm , pode ser desprezada.

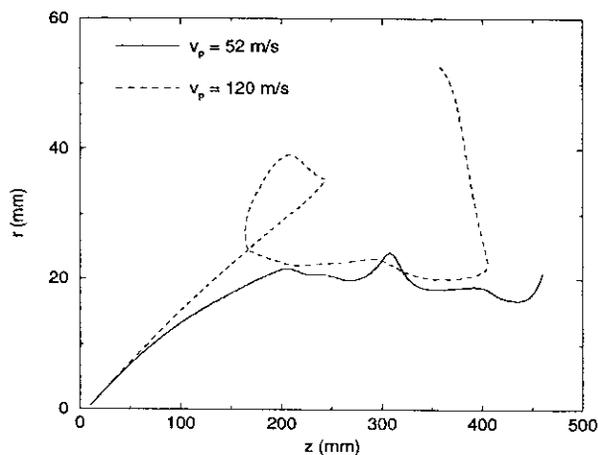


Figura 6.74: Trajetórias das gotas de diâmetros iniciais de 50 μm injetadas com 52 e 120 m/s .

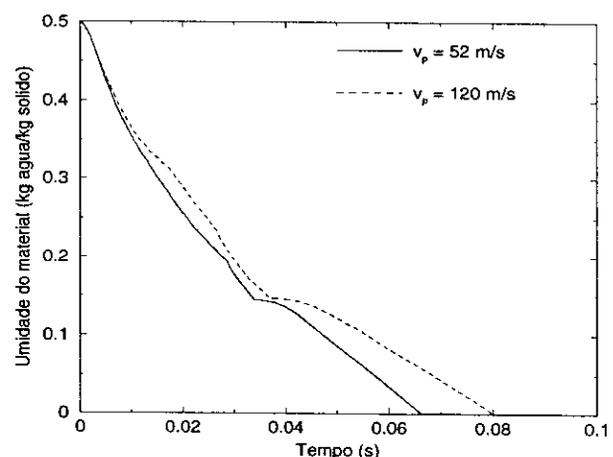


Figura 6.75: Umidade das gotas de diâmetros iniciais de 50 μm injetadas com 52 e 120 m/s .

Comparando-se a distribuição da umidade do gás dentro da câmara de secagem para os ensaios em que as partículas são injetadas com 120 m/s , figura 6.76, com a obtida no ensaio de referência, figura 6.31, o valor máximo da variação líquida da umidade é 30% maior. Nos experimentos, quando se eleva a vazão do ar de atomização de 0,6 para 0,7 m^3/h há um aumento de 22% nesse perfil. Esse resultado confirma a consistência e

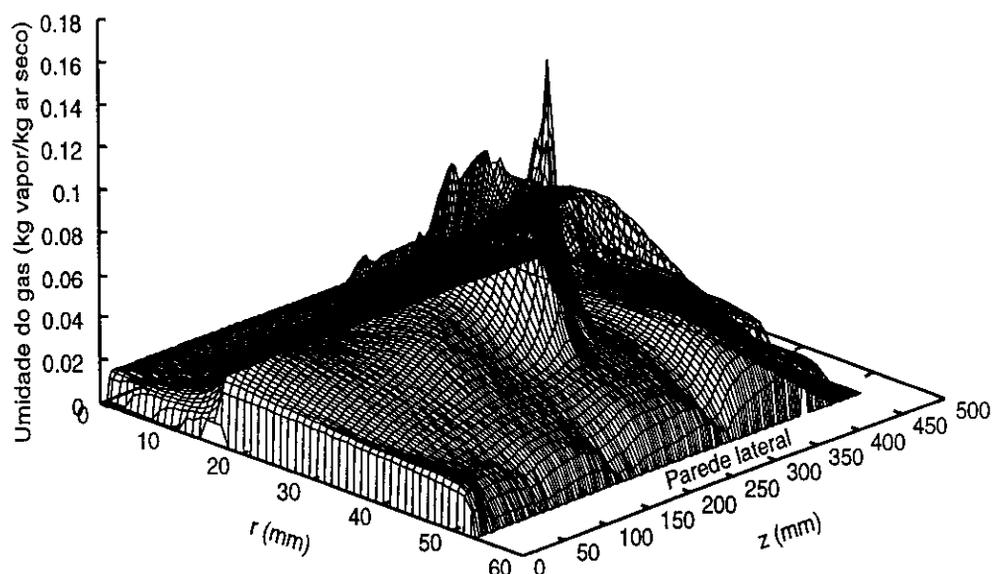


Figura 6.76: Distribuição da umidade do gás depois da secagem quando a velocidade de injeção das gotas é 120 m/s .

qualidade do simulador.

As isothermas, as linhas de velocidade constante e as linhas de fluxo do escoamento do gás simuladas para o caso em que as gotas são injetadas com 120 m/s são comparadas com os perfis calculados no ensaio de referência nas figuras 6.77, 6.78 e 6.79, respectivamente. As maiores reduções na temperatura são em regiões de r entre 30 e 40 mm para o ensaio com velocidade inicial da gota de 120 m/s ; para o ensaio de referência, devido ao menor distanciamento do eixo de simetria das gotas/grânulos, a região de maior redução está em r entre 20 e 30 mm . O perfil de velocidades do gás aumenta em módulo nas regiões de raio maior que 20 mm em relação ao caso em que as gotas foram injetadas com 52 m/s , pois há uma transferência de movimento das gotas para o gás. Como as gotas alcançam raios maiores numa distância axial mais curta, o fluxo de ar aumenta nessas regiões com relação ao ensaio *ER*.

Com os resultados obtidos neste capítulo, demonstra-se que o programa desenvolvido e os modelos matemáticos empregados são consistentes e versáteis. Trabalhos dessa natureza, apesar de simularem um secador em escala de laboratório, podem auxiliar de maneira efetiva na compreensão de fenômenos físicos e na otimização de sistemas de secagem em escala industrial, pois é uma ferramenta robusta, além de ser de baixo custo operacional.

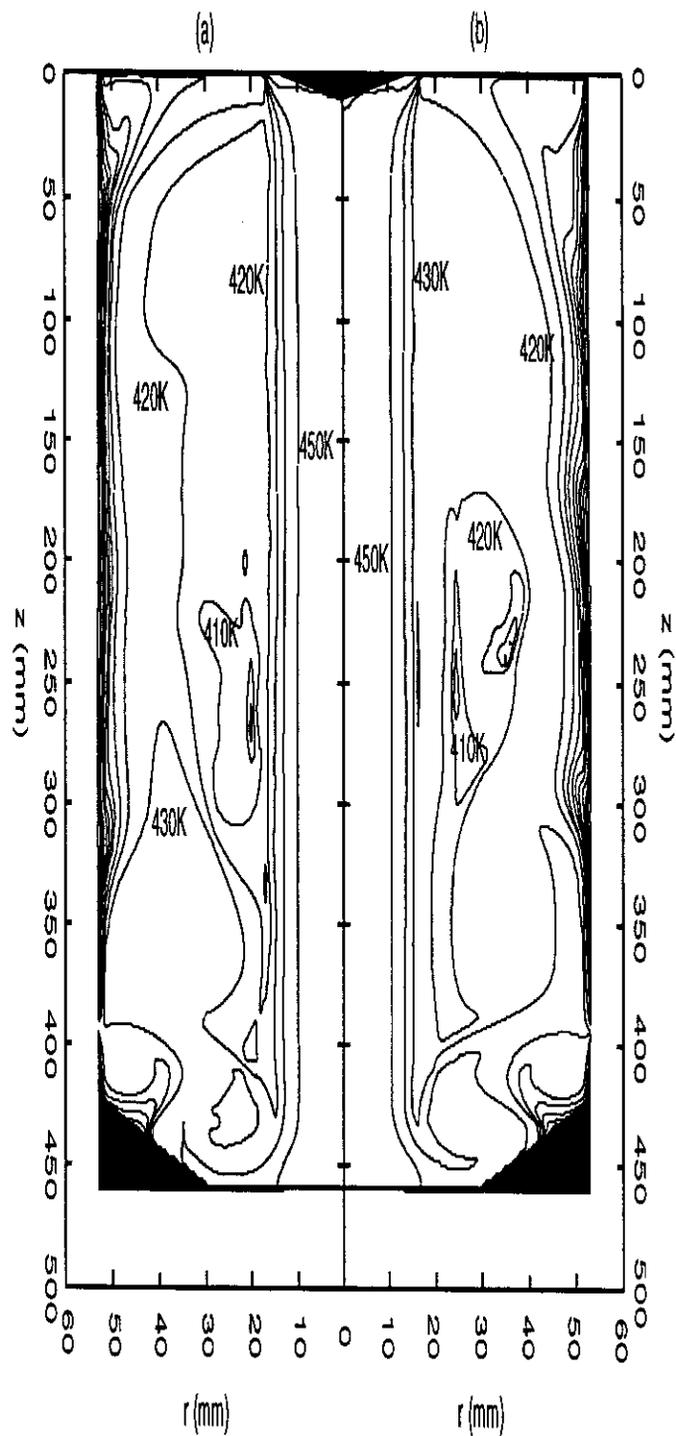


Figura 6.77: Isotermas do gás para velocidades iniciais das gotas de (a) 52 e (b) 120 m/s . Linha mais interna de 450 K (177 °C), diminuindo em intervalos de 10 K.

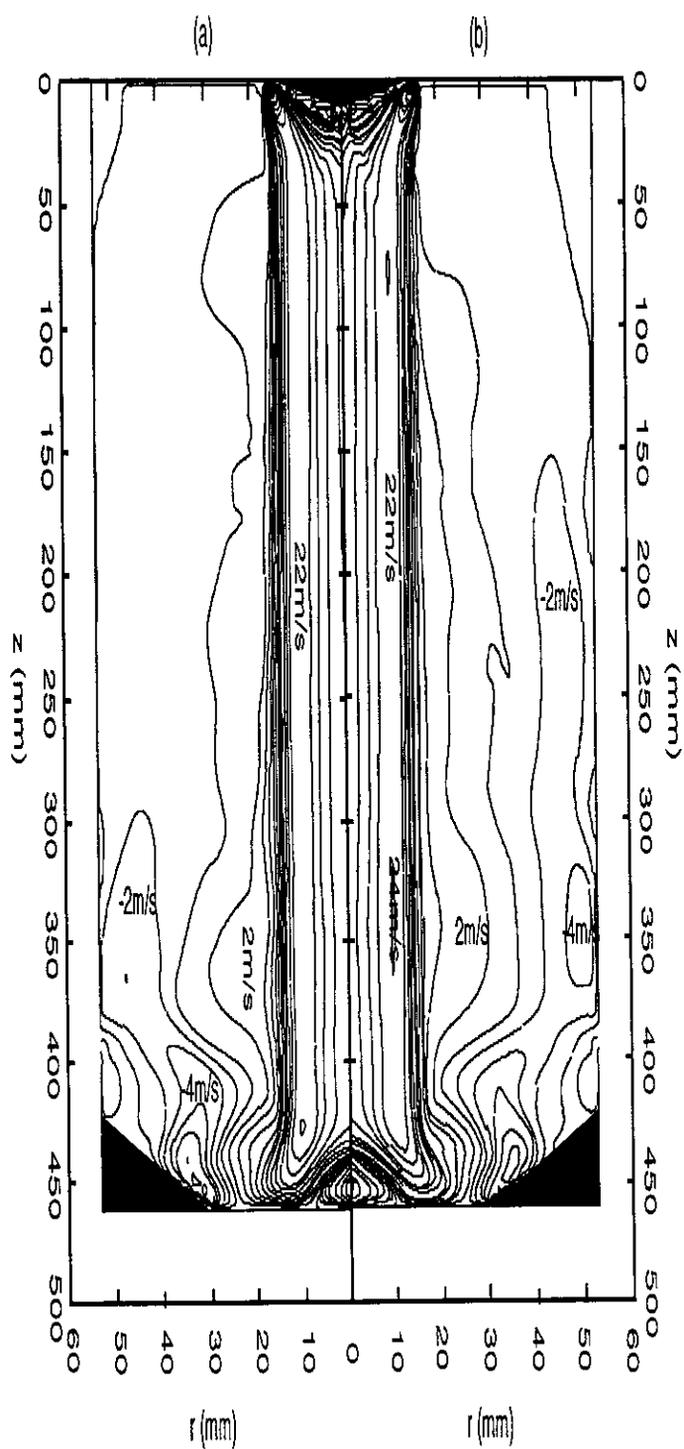


Figura 6.78: Linhas de velocidade constante para velocidades iniciais das gotas de (a) 52 e (b) 120 m/s . Linha central de 22 m/s , variando em intervalos de 2 m/s .

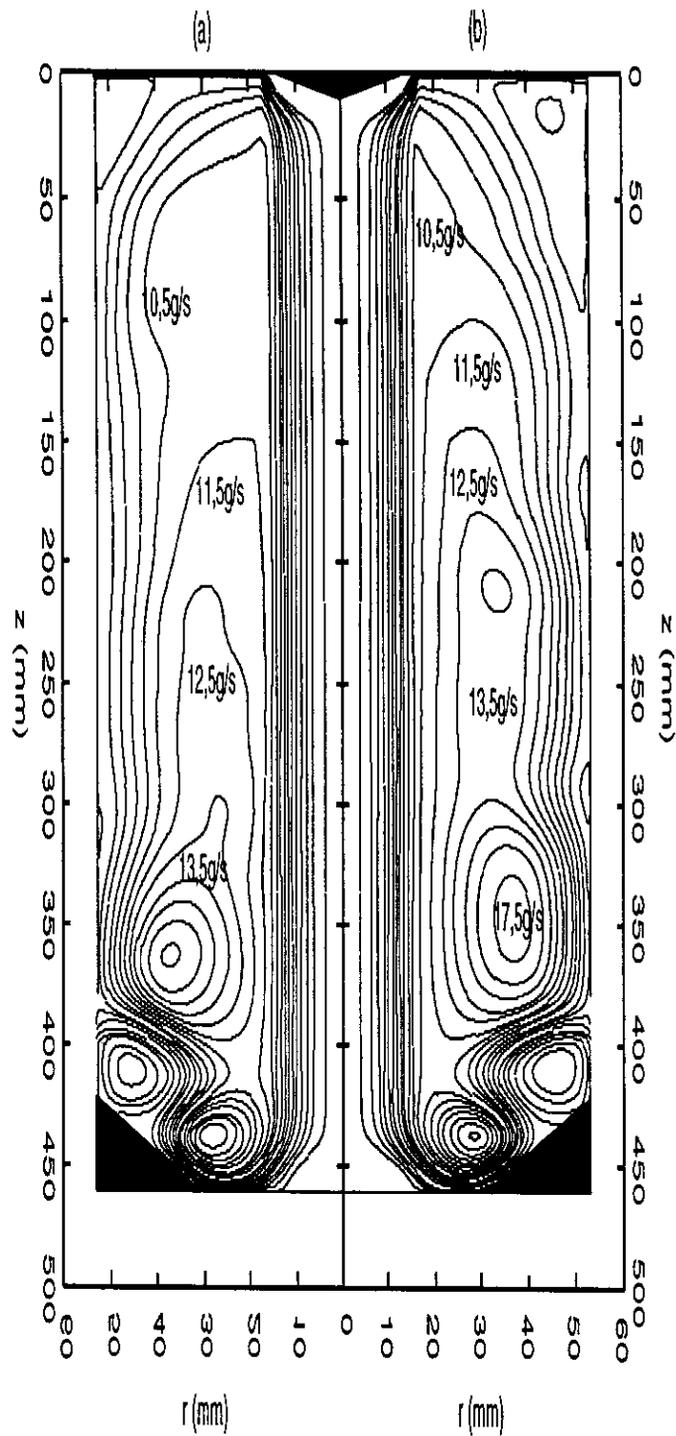


Figura 6.79: Linhas de fluxo do gás para velocidades iniciais das gotas de (a) 52 e (b) 120 m/s . Linha mais interna (próxima ao eixo de simetria) de 0,5 g/s , aumentando em intervalos de 1 g/s .

Capítulo 7

Conclusões

Os modelos existentes para secagem de materiais por atomização podem ser divididos em duas principais vertentes: *i*) modelos unidimensionais que simulam os dois períodos de secagem e *ii*) modelos bidimensionais que simulam a secagem de substâncias líquidas. Neste trabalho, desenvolveu-se um modelo matemático bidimensional para simular a secagem de gotas de suspensões cerâmicas atomizadas. Este modelo é a principal contribuição do trabalho à ciência e à tecnologia.

Foram realizados diversos e variados ensaios experimentais num mini-secador existente no laboratório de Insumos do IPEN, nos quais se variaram a temperatura inicial e a vazão do gás de secagem, taxa de alimentação do material a ser atomizado e a configuração do atomizador, entre outros parâmetros. Numa parte desses ensaios, foram feitas medições da temperatura de bulbo úmido e seco pois, através dessas temperaturas e de cartas psicrométricas, pode-se determinar a umidade do ar de secagem e a taxa de água evaporada durante o processo de secagem. A pressão dinâmica do escoamento do ar de secagem foi também inferida para que se pudesse determinar quantitativamente a vazão de gás, pois no painel do secador esse parâmetro é dado como porcentagem da capacidade total da bomba de aspiração.

Amostras do material utilizado para fabricação da base cerâmica na indústria de revestimento e dos materiais mais significativos produzidos no IPEN foram submetidas a análises de: *i*) microscopia eletrônica de varredura; *ii*) porosimetria de mercúrio; *iii*) termogravimetria e *iv*) granulometria dos grânulos e das partículas. Através das análises no microscópio eletrônico pode-se verificar que os grânulos da massa cerâmica industrial, os de alumina e de porcelanato produzidos no IPEN são, de modo geral, esféricos. O diâmetro dos grânulos produzidos na indústria varia de 200 a 500 μm , enquanto que os produzidos no laboratório estão entre 5 e 50 μm . As medidas de porosidade do grânulo realizadas no IPEN apresentaram valores entre 25 e 38%, enquanto que as análises feitas na Escola Politécnica indicaram uma porosidade de 70%. Como o valor fornecido pelo equipamento para a porosidade corresponde à quantidade de mercúrio que saiu do reservatório e entrou no cadinho com os grânulos, uma parte desse mercúrio preenche poros intergranulares e outra parte os poros intragranulares. Para se determinar a quantidade de poros intergranulares, fez-se uma analogia com estruturas cúbicas de corpo centrado;

essas estruturas apresentam 32% de espaços vazios entre as esferas. Portanto, pode-se concluir que o valor aproximado da porosidade dos grânulos é de 38%. A umidade residual dos grânulos de massa cerâmica, de alumina e de porcelanato foi determinada e é de respectivos 5,75, 0,3 e 3,75%. As análises de granulometria determinaram a distribuição de tamanho dos grânulos e das partículas. O tamanho médio das partículas da massa cerâmica industrial é de 12 μm e dos grânulos é de 355 μm . Para o material produzido no IPEN, o tamanho de partículas é de 0,5 μm para a alumina A16 e de 2,7 μm para a tabular; a distribuição dos grânulos apresentou três padrões diferentes, o primeiro com tamanho médio de 10 μm , o segundo de 16 μm e o último com 52 e 75 μm .

Os ensaios experimentais e as análises do material produzido no IPEN e do fornecido pela indústria alimentaram e validaram a consistência dos resultados numéricos obtidos com o simulador.

Os primeiros resultados obtidos com as simulações foram os da evaporação de gotículas de água dentro de uma câmara com fluxo de ar quente. Em seguida, a água é substituída pela suspensão de alumina e os perfis de velocidade, temperatura e umidade do ar de secagem e o histórico de temperatura e massa das gotas de suspensão são determinados. Em ambos os casos, os perfis de temperatura e de velocidade do gás são determinados primeiro; as gotas de água ou de suspensão de alumina injetadas no sistema descrevem uma trajetória dentro do secador e, ao longo desse caminho, as trocas de calor e de massa entre as fases são calculadas. No primeiro período, no qual a taxa de secagem é constante, a temperatura das gotas atomizadas não ultrapassam a de bulbo úmido, pois há água suficiente na superfície da partícula para que todo o calor fornecido pelo gás seja usado para evaporar essa água, evitando o aquecimento do material. Para o segundo período de secagem, o filme de água que envolve a gota não mais existe, fazendo com que a taxa de secagem decresça rapidamente; a temperatura da gota entra, após um certo período, em equilíbrio com a do meio de secagem. Para o caso da injeção de água pura, esse segundo período não se aplica, e a gota permanece à temperatura de bulbo úmido até sua completa evaporação. De modo qualitativo, estes resultados condizem com a teoria. Quando o ângulo de injeção das partículas computacionais é variado, há uma mudança significativa em suas trajetórias, e que se acentua a medida que a velocidade de injeção das gotas aumenta; em alguns experimentos, notou-se que a formação de depósitos numa determinada região da parede do secador aconteciam devido à pequena descentralização do bico injetor, corroborando os resultados numéricos obtidos.

Por fim, o equipamento utilizado nos ensaios experimentais foi simulado para verificar a consistência do modelo empregado para o sistema de secagem de suspensões cerâmicas por atomização. Simularam-se alguns experimentos realizados no Büchi. A diferença entre os valores da taxa de água evaporada calculada no programa e da taxa de água evaporada obtida através das medidas de temperatura de bulbo úmido e seco é de 10%, aproximadamente. Esse resultado confirma a consistência do código computacional e do modelo matemático.

A partir de um ensaio numérico de referência, foi conduzido um estudo da influência dos parâmetros de operação nos perfis de temperatura, velocidade e umidade do gás de secagem e no histórico de temperatura e massa do material atomizado. Os parâmetros

simulados foram: *i*) vazão do ar de secagem; *ii*) temperatura inicial do ar de secagem; *iii*) taxa de alimentação da suspensão; *iv*) número e tamanho inicial diferentes para as gotas e *v*) velocidade de injeção das gotas. Os ensaios com variação da vazão mostram que há uma diferença de aproximadamente 45% no tempo total de secagem entre 21 e 45 m^3/h . Para o material produzido no Büchi, esse retardo no tempo pode não ser significativo, porém, em escalas industriais pode alterar a umidade final dos grânulos. A umidade do gás depois da injeção para a vazão máxima é 2,5 vezes maior que para a vazão mínima; nos experimentos, observa-se uma diferença de 110%. Quando o parâmetro estudado é a temperatura inicial do gás, tem-se que o tempo para a mudança de períodos e o tempo total para a secagem reduzem-se em 75 e 57%, respectivamente. Um decréscimo na temperatura inicial do gás implica num aumento da variação líquida da umidade; os valores calculados apresentam uma diferença de 10,5% quando a temperatura passa de 130 para 180 °C. Nos ensaios realizados no Büchi, quando se alterou a temperatura de 150 para 130 °C, houve um aumento de 14% na variação líquida da umidade absoluta do gás depois da secagem. No caso dos ensaios para várias taxas de secagem, à medida em que se aumenta o fluxo de material injetado na câmara a temperatura do gás sofre maiores decréscimos, e a variação líquida da umidade do gás é 3,7 vezes maior. Para experimentos semelhantes, o valor da umidade é quadruplicado. Quando se simularam diâmetros iniciais para as gotas variando entre 10 e 70 μm , obteve-se um aumento exponencial no tempo para troca de períodos e para o tempo total de secagem. Para diâmetros relativamente pequenos, entre 10 e 25 μm , o aumento nesses tempos é mais lento pois, nesse caso, a diferença entre os diâmetros é menor e as condições de temperatura e velocidade do ar experimentadas pelas gotas diferem menos porque as trajetórias dessas partículas se concentram na região central da câmara. No caso do Büchi, se gotas da ordem 100 μm são formadas, há grande probabilidade de elas atingirem a parede completamente úmidas, como mostrou o ensaio para gotas de diâmetros relativamente grandes. Por fim, quando se aumenta a velocidade inicial da gota na injeção de 52 para 120 m/s , a diferença no tempo de secagem é de 5% e na umidade líquida é de 20%. Nos experimentos, quando se aumenta a vazão do ar de atomização de 0,6 para 0,7 m^3/h , a diferença na umidade líquida é de 22%. A comparação entre os resultados do estudo paramétrico e os resultados experimentais também confirma a consistência do modelo, além de demonstrar a versatilidade do código computacional desenvolvido.

Apêndice A

Método numérico

O conteúdo desse apêndice foi totalmente retirado do capítulo 3 da dissertação de mestrado da autora [43].

O método do volume de controle é uma versão do método dos resíduos formulado em conjunto com o método das diferenças finitas. Esse método possibilita que decisões que antes eram governadas somente por considerações matemáticas possam ser agora por razões físicas. A primeira versão do método é de 1970 [45], e sofreu algumas alterações de caráter complementar ou aprimorativo [36], [46], [47].

A idéia básica deste método consiste em dividir o domínio de cálculo em um número de volumes de controle finitos não sobrepostos de tal forma que cada volume contenha um nó, e integrar a equação diferencial sobre cada volume de controle, usando perfis segmentados para exprimir a variação da variável dependente entre os nós da malha. A equação discreta obtida com esse método expressa o princípio de conservação dessa variável da mesma maneira que a equação diferencial expressa este princípio para um volume de controle infinitesimal. A grande vantagem desta formulação é que quantidades como massa, momento e energia, são conservadas sobre cada volume de controle e, conseqüentemente, sobre todo o domínio de cálculo, mesmo quando a malha empregada for constituída por poucos nós.

A.1 Metodologia matemática

As equações de transporte que expressam o princípio de conservação das variáveis dependentes de um problema de escoamento de gás, tais como energia e quantidade de movimento, possuem a mesma forma, facilitando a resolução de problemas nos quais estas equações estão acopladas. Denotando ξ como variável dependente, tem-se, em coordenadas cartesianas e notação tensorial:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \xi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial \xi}{\partial x_i} \right) + S, \quad (\text{A.1})$$

onde u_i é a componente da velocidade na direção x_i e ρ é a densidade. O lado esquerdo da equação é a parte convectiva e o lado direito são a parte difusiva e a fonte. O coeficiente de difusão, Γ , representa as propriedades do fluido, tais como viscosidade e condutividade térmica. A fonte, S , pode ser formada por termos de produção ou de dissipação da variável dependente, ou ainda por termos sobressalentes da adaptação da equação diferencial à equação genérica.

A.2 Procedimento numérico

A obtenção da equação discreta, ou algébrica, através do método do volume de controle é efetuada integrando-se a equação diferencial sobre cada volume pertencente ao domínio de cálculo. A figura A.1 ilustra o conceito de volumes de controle. Nessa figura é também esquematizada a trajetória de partículas (fase dispersa) injetadas no sistema.

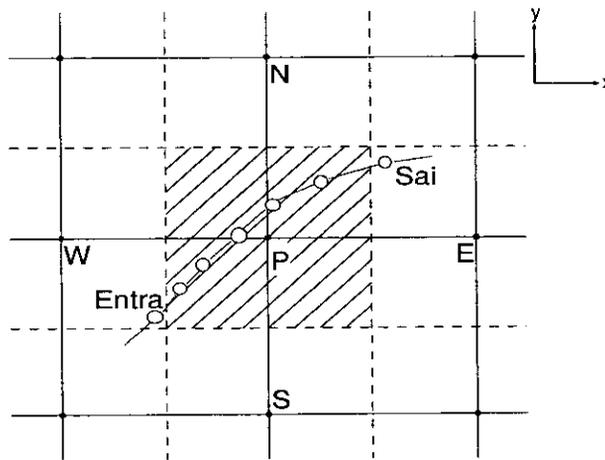


Figura A.1: Malha e volume de controle para um domínio de cálculo qualquer.

As linhas tracejadas indicam as faces do volume de controle que cercam o ponto P . A localização dos nós dentro do volume finito pode se dar de duas maneiras: *i*) as faces estão centradas entre os nós vizinhos a P (Prática A), ou *ii*) os nós são definidos no centro geométrico do volume (Prática B).

Definindo J_i como a soma dos termos de convecção e difusão da equação A.1 na direção x_i , pode-se reescrevê-la, como segue:

$$\frac{\partial J_i}{\partial x_i} = S. \quad (\text{A.2})$$

Para que a equação A.2 possa ser integrada, é necessário que se construa um volume de controle genérico em torno de um nó, como mostra o esquema da figura A.2. O ponto P possui quatro nós vizinhos: E , W , N e S , que são as iniciais, em inglês, dos pontos cardeais, e é cercado pelas faces e , w , n e s , respectivamente.

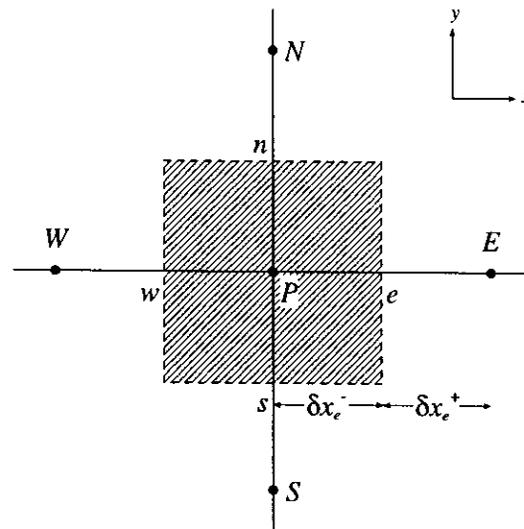


Figura A.2: Volume de controle para um problema bidimensional.

A equação discreta obtida da integração da equação A.2 sobre o volume de controle é dada por

$$J_w A_w - J_e A_e + J_s A_s - J_n A_n + \bar{S} \Delta V = 0, \quad (\text{A.3})$$

na qual J_i , com $i = w, e, s, n$, representa o fluxo total nas faces do volume de controle, A_i os coeficientes da equação algébrica, \bar{S} a fonte média e ΔV o volume do volume de controle.

A variação de ξ num problema de convecção e difusão entre os nós da malha tem como solução exata um perfil exponencial [48], [49]. O elevado tempo de computação dessa solução motivou o desenvolvimento de aproximações para a expressão do fluxo, tais como os esquemas *up-wind*, híbrido e lei da potência [36]. O último esquema é a melhor aproximação à solução exata e é dado, para um problema unidimensional resolvido entre os nós P e E da figura A.2, por [47]:

$$J_e = F_e \xi_P + \{D_e A(|P_e|) + \|\ -F_e, 0 \|\} (\xi_P - \xi_E), \quad (\text{A.4})$$

com

$$A(|P|) = \|\ 0, (1 - 0,1 |P|)^5 \|\ .$$

$F_e \equiv (\rho u)_e$ é a taxa de fluxo na face e , $D_e \equiv \Gamma / \delta x_e$ é a condutância de difusão e P_e é o número de Peclet, definido como a razão entre F_e e D_e . O símbolo $\|\ a, b \|\$ denota a maior entre as duas quantidades.

O termo fonte da equação é linearizado da seguinte forma:

$$\bar{S} = S_C + S_P \xi_P. \quad (\text{A.5})$$

S_C é a parte da fonte que não depende explicitamente de ξ , e S_P é o coeficiente de ξ_P . Uma linearização incorreta do termo fonte leva, em problemas mais complexos, à divergência do processo. Outro cuidado a ser tomado é com respeito ao sinal de S_P , que dever ser, em qualquer situação, sempre negativo. A única restrição ao sinal de S_C é que esse deverá ser obrigatoriamente positivo quando ξ não puder ser, em nenhuma hipótese, negativa.

Usando-se as definições e relações descritas acima, pode-se escrever a equação discreta em duas dimensões gerada por esse método:

$$a_P \xi_P = a_E \xi_E + a_W \xi_W + a_N \xi_N + a_S \xi_S + b, \quad (\text{A.6})$$

onde

$$\begin{aligned} a_E &= D_e A(|P_e|) + \|\ -F_e, 0 \ \| \\ a_W &= D_w A(|P_w|) + \|\ F_w, 0 \ \| \\ a_N &= D_n A(|P_n|) + \|\ -F_n, 0 \ \| \\ a_S &= D_s A(|P_s|) + \|\ F_s, 0 \ \| \\ b &= S_C \Delta V \\ a_P &= a_E + a_W + a_N + a_S - S_P \Delta V, \end{aligned}$$

ou em sua fórmula generalizada:

$$a_P \xi_P = \sum a_n b \xi_n b + b. \quad (\text{A.7})$$

O subscrito nb indica os nós vizinhos a P . A equação A.6 é resolvida por um processo iterativo por causa da não linearidade e do acoplamento das equações governantes. Tal processo as vezes não é suficiente para garantir a convergência, exigindo que as trocas de valores da variável dependente sejam mais lentas. Surge dessa necessidade, uma técnica chamada sub-relaxação, que diminui a velocidade das trocas em ξ usando-se do valor da variável dependente na última iteração, ξ^* , pela introdução do fator de relaxação α ($0 < \alpha < 1$). A medida que α se aproxima de zero, as trocas em ξ vão se tornando cada vez mais lentas. Os valores sugeridos para α são de 0,5 para as equações do momento e de 0,8 para o campo de pressões [36].

O método de resolução iterativo sugerido por Patankar [36, 47] divide-se em duas partes: *i*) técnica linha por linha e *ii*) procedimento de correção em blocos. A técnica linha por linha é uma combinação do método TDMA (*TriDiagonal Matrix Algorithm*), usado na resolução de problemas unidimensionais, com o método de Gauss-Siedel, usado para resolver problemas bi e tridimensionais. O método consiste em escolher uma linha da malha discreta, assumir que os valores de ξ ao longo das linhas vizinhas sejam conhecidos

e, finalmente, resolver ξ na linha escolhida. Este procedimento é feito para todas as linhas do domínio computacional e repetido nas outras direções. O procedimento de correção em blocos acelera a convergência da técnica de resolução linha por linha. A idéia da correção em blocos é a de adicionar correções uniformes ao campo ξ^* obtido de iterações anteriores em toda a linha escolhida, de forma que esta soma satisfaça a integral de conservação sobre os volumes de controle do bloco, repetindo, posteriormente, a mesma seqüência para as outras direções.

Na resolução das equações algébricas para um fluido, o campo de pressões não é expresso através da velocidade ou de qualquer outra variável dependente, mas apenas através da equação da continuidade e de modo indireto, não conveniente em termos computacionais. Uma maneira de resolver diretamente o campo de pressões é transformar a equação de conservação de massa numa equação para a correção da pressão de modo que o campo de velocidades satisfaça a equação de continuidade. Para se obter essa equação de correção de pressão, é necessário, a fim de evitar soluções fisicamente inconsistentes, que as velocidades não sejam calculadas nos mesmos nós que a pressão. A figura A.3 apresenta a malha computacional que deve ser usada nos cálculos para fluidos.

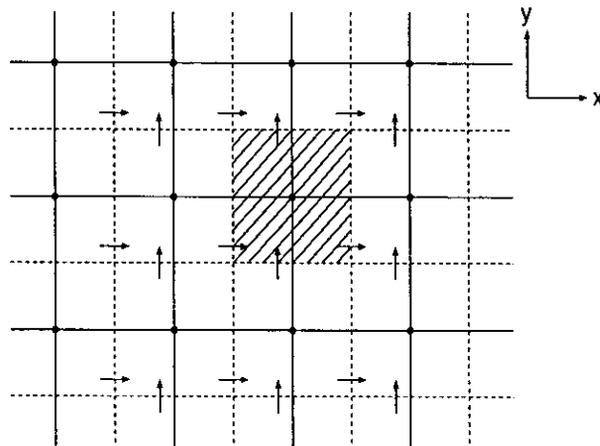


Figura A.3: Malha computacional deslocada para cálculo do fluxo de fluidos.

As velocidades são calculadas nas faces normais do volume de controle (linhas tracejadas) e a pressão, bem como todas as outras variáveis dependentes, nos nós principais (pontos). Os volumes de controle usados para se obter as equações do momento discretizadas são os da figura A.4.

Integrando a equação do momento na direção x entre os nós E e P para um campo estimado de pressão, p^* , no volume de controle para u da figura A.4, obtém-se:

$$a_e u_e^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + b + A_e (p_P^* - p_E^*), \quad (\text{A.8})$$

com A_e sendo a área sobre a qual a pressão atua. Esta equação é obtida da mesma maneira para as outras equações do momento.

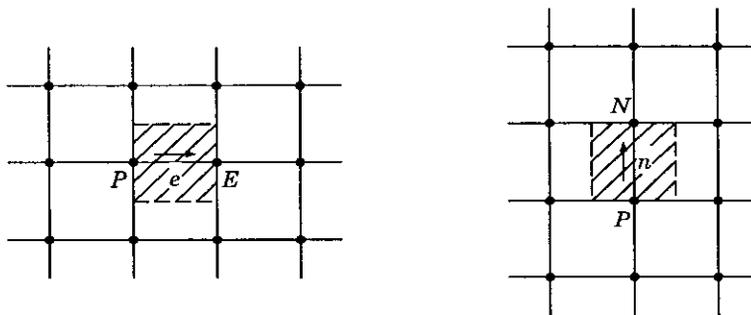


Figura A.4: Volume de controle para u (esquerda) e v (direita) das equações do momento.

As velocidades u^* e v^* não satisfazem a equação da continuidade e devem, por esse motivo, ser corrigidas pela pressão de correção p' aplicada à pressão estimada p^* resultando, após algumas manipulações algébricas, na fórmula para a correção da velocidade:

$$u_e = u_e^* + d_e(p'_P - p'_E), \quad (\text{A.9})$$

com $d_e = A_e/a_e$. Integrando-se a equação da continuidade sobre o volume de controle da figura A.2 e expressando as velocidades na forma da equação A.9, obtém-se a equação discreta para a correção de pressão:

$$a_P p'_P = a_E p'_E + a_W p'_W + a_N p'_N + a_S p'_S + b, \quad (\text{A.10})$$

onde

$$\begin{aligned} a_E &= (\rho dA)_e; \\ a_W &= (\rho dA)_w; \\ a_N &= (\rho dA)_n; \\ a_S &= (\rho dA)_s; \\ a_P &= a_E + a_W + a_N + a_S; \\ b &= (\rho u^* A)_w - (\rho u^* A)_e + (\rho v^* A)_s - (\rho v^* A)_n. \end{aligned}$$

O papel da correção de pressão é eliminar a fonte de massa que aparece como b na equação A.10.

O procedimento SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*) utilizado para cálculo do fluxo de fluidos utilizado é o seguinte:

1. estimar o campo de pressão p^* ;
2. resolver as equações do momento para obtenção de u^* e v^* ;
3. obter a fonte de massa e resolver a equação de correção de pressão;
4. corrigir os campos de pressão e velocidade;

-
5. resolver as equações discretas para as outras variáveis dependentes que influenciam o escoamento;
 6. tomar a pressão corrigida p como p^* , voltar ao passo 2 e repetir o processo até que se atinja convergência.

Apêndice B

Dados técnicos do Büchi

Os dados técnicos do mini-secador Büchi utilizado nos ensaios experimentais do trabalho é apresentado na tabela B.1.

Tabela B.1: Dados técnicos do mini-secador Büchi.

Modelo	B-190
Consumo de potência	2900 Watt
Consumo de corrente	14 A
Temperatura máxima	220 °C
Taxa de fluxo de gás	20 a 45 m ³ /h
Taxa de alimentação da suspensão	4,8×10 ⁻⁵ a 3,6×10 ⁻⁴ m ³ /h
Capacidade máxima de secagem	1,5 Kg água/h
Consumo máximo de ar comprimido	800-900 l/h
Dimensões (l×h×d)	500×1000×600 mm
Peso	57 Kg
Mostradores	Temperatura na entrada (°C) Temperatura na saída (°C) Aspiração do gás de secagem (%) Bomba peristáltica (%)
Pressão de operação	Manômetro (mbar) Atmosférica

Apêndice C

Medidas de vazão

O aparato experimental utilizado para medição da pressão dinâmica é esquematizado na figura C.1.

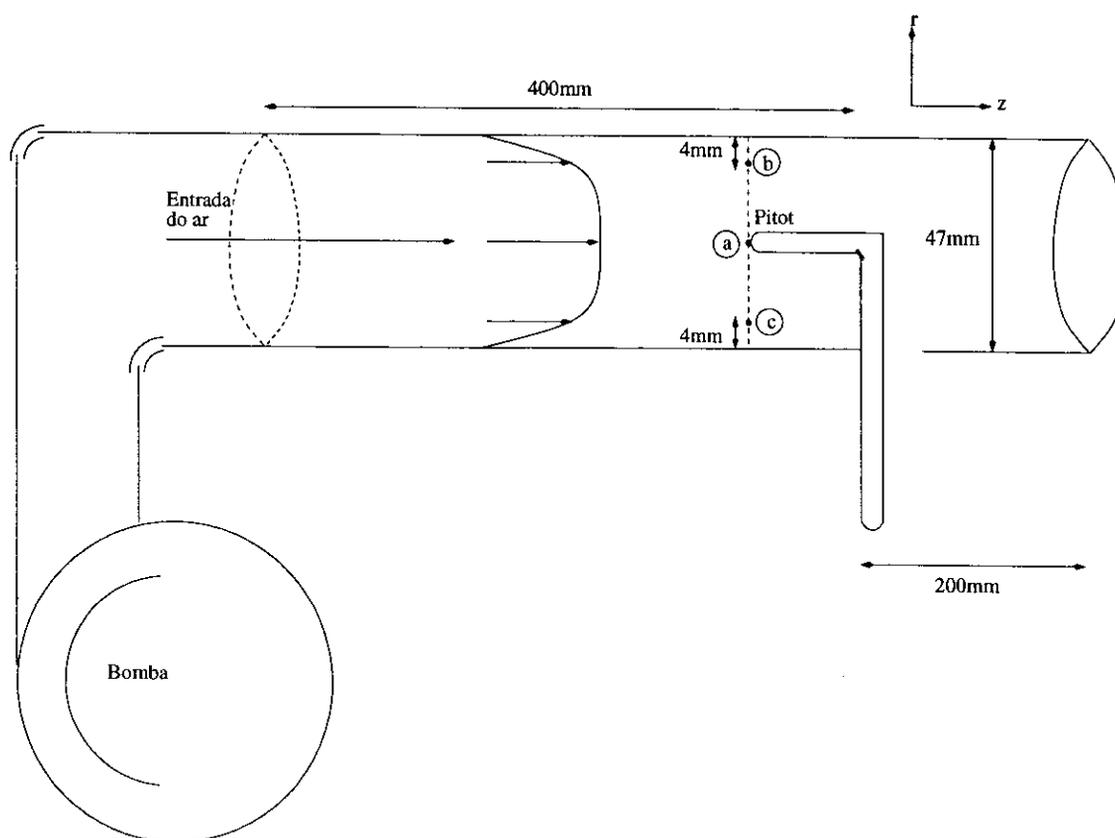


Figura C.1: Esquema do aparato experimental utilizado para medições da pressão dinâmica do secador Büchi.

Os pontos em cima da linha tracejada denotam os três pontos onde foram feitas as medidas: no centro (a) e perto das paredes superior(b) e inferior (c) do tubo. A incer-

teza nas medidas é de $0,05 \text{ mmH}_2\text{O}$. A tabela C.1 apresenta os valores medidos para a pressão dinâmica para 50, 75 e 100% da bomba de aspiração, os valores calculados para a velocidade através da expressão $P_d = \rho u^2 / 2$ e da vazão turbulenta.

Tabela C.1: Valores da pressão, velocidade e vazão do secador Büchi determinados através das medições de pressão dinâmica.

<i>Vazão da bomba</i>	<i>Pressão</i> <i>(mmH₂O)</i>	<i>Velocidade</i> <i>(m/s)</i>	<i>Vazão</i> <i>(m³/h)</i>
(a)	0,5	3,15	
50% - (b)	0,6	3,45	20
(c)	0,5	3,15	
(a)	1,3	5,1	
75% - (b)	1,5	5,5	33
(c)	1,3	5,1	
(a)	2,2	6,7	
100% - (b)	2,7	7,4	45
(c)	2	6,4	

Apêndice D

Medidas de temperatura de bulbo úmido e seco

Um esquema do aparato experimental utilizado para as medições das temperaturas de bulbo úmido e seco é apresentado na figura D.1.

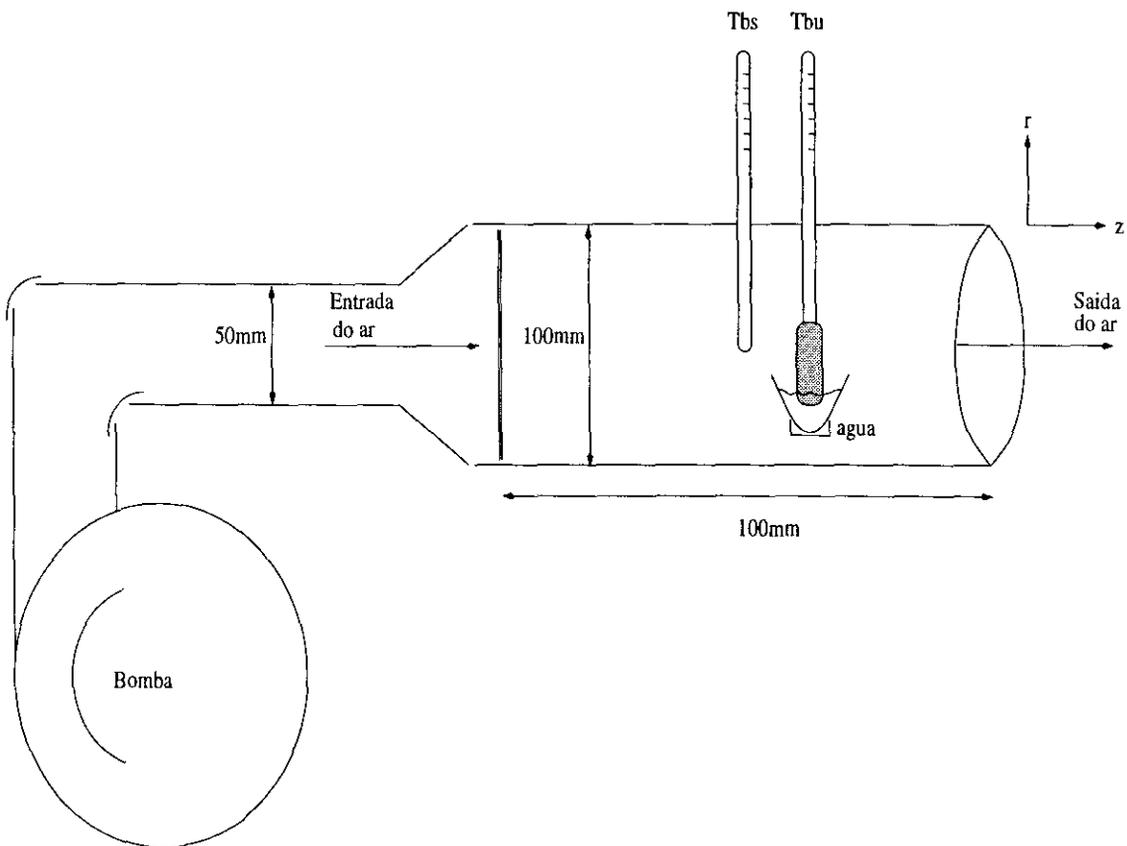


Figura D.1: Esquema do aparato experimental utilizado para as medições das temperaturas de bulbo úmido e seco.

As medidas das temperaturas foram realizadas antes e depois da injeção da suspensão na câmara de secagem para os ensaios do grupo II de experimentos. A incerteza nas medidas é de 0,5 °C. A tabela D.1 apresenta os valores medidos para as temperaturas de bulbo úmido e seco e os valores calculados, com base nessas temperaturas, para umidade absoluta e taxa de água evaporada.

Tabela D.1: Valores das temperaturas de bulbo úmido e seco medidas, da umidade absoluta e da taxa de água evaporada calculadas para os ensaios *E1* a *E13* do grupo II.

<i>Ensaio</i>	T_{bs} (°C)	T_{bu} (°C)	<i>Umidade absoluta</i> (kg vapor/kg ar)	<i>Taxa de água eva-</i> <i>porada (kg/s)</i>
<i>E1</i> antes	52	25	1×10^{-2}	
depois	52	29,5	$1,9 \times 10^{-2}$	$8,5 \times 10^{-5}$
<i>E2</i> antes	54	27	$1,3 \times 10^{-2}$	
depois	54	30,5	2×10^{-2}	7×10^{-5}
<i>E3</i> antes	47	22	$7,4 \times 10^{-3}$	
depois	48	26	$1,4 \times 10^{-2}$	$6,2 \times 10^{-5}$
<i>E4</i> antes	43	21	$7,6 \times 10^{-3}$	
depois	42,5	28	2×10^{-2}	$7,8 \times 10^{-5}$
<i>E5</i> antes	52	23	$6,9 \times 10^{-3}$	
depois	51	28	$1,6 \times 10^{-2}$	$9,2 \times 10^{-5}$
<i>E6</i> antes	51	22	$5,7 \times 10^{-3}$	
depois	51	26,5	$1,3 \times 10^{-2}$	$7,5 \times 10^{-5}$
<i>E7</i> antes	54	28	$1,5 \times 10^{-2}$	
depois	51,5	32	$2,5 \times 10^{-2}$	$9,7 \times 10^{-5}$
<i>E8</i> antes	56	25	$8,5 \times 10^{-3}$	
depois	55	28	$1,5 \times 10^{-2}$	$8,1 \times 10^{-5}$
<i>E9</i> antes	47	22,5	$8,2 \times 10^{-3}$	
depois	47	24	$1,1 \times 10^{-2}$	$2,4 \times 10^{-5}$
<i>E10</i> antes	47,5	23,5	$9,6 \times 10^{-3}$	
depois	48	25,5	$1,3 \times 10^{-2}$	$3,2 \times 10^{-5}$
<i>E11</i> antes	52	25	1×10^{-2}	
depois	52	29,5	$1,9 \times 10^{-2}$	$8,5 \times 10^{-5}$
<i>E12</i> antes	49	25	$1,2 \times 10^{-2}$	
depois	51	27	$1,4 \times 10^{-2}$	$1,8 \times 10^{-5}$
<i>E13</i> antes	49	25	$1,2 \times 10^{-2}$	
depois	52	30,5	$2,1 \times 10^{-2}$	$9,4 \times 10^{-5}$

Apêndice E

Ensaaios experimentais

As tabelas E.1 a E.7 a apresentam os parâmetros de operação dos ensaios do grupo I e do grupo II de experimentos.

E.1 Grupo I - Alumina A16

Nesse grupo de ensaios, o filtro manga ainda não havia sido limpo e, portanto, a vazão do gás de secagem representada aqui na porcentagem da bomba de aspiração não corresponde aos valores em m^3/h calculados através das medidas de pressão dinâmica.

Tabela E.1: Parâmetros de operação dos ensaios do grupo I: *E1* a *E5*.

<i>Parâmetros de operação</i>	<i>E1</i>	<i>E2</i>	<i>E3</i>	<i>E4</i>	<i>E5</i>
Temperatura inicial do ar ($^{\circ}\text{C}$)	200	200	200	200	200
Vazão do ar (% bomba)	85	85	85	85	85
Taxa de alimentação ($10^{-4} \text{ m}^3/\text{h}$)	3,12	1,2	2,6	3,12	3,6
Vazão do ar de atomização (m^3/h)	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7

Tabela E.2: Parâmetros de operação dos ensaios do grupo I: E6 a E10.

<i>Parâmetros de operação</i>	<i>E6</i>	<i>E7</i>	<i>E8</i>	<i>E9</i>	<i>E10</i>
Temperatura inicial do ar (°C)	200	200	200	200	200
Vazão do ar (m ³ /h)	85	85	85	85	85
Taxa de alimentação (10 ⁻⁴ m ³ /h)	3,12	3,12	3,12	1,7	0,96
Vazão do ar de atomização (m ³ /h)	0,6	0,5	0,4	0,6	0,6

Tabela E.3: Parâmetros de operação dos ensaios do grupo I: E11 a E15.

<i>Parâmetros de operação</i>	<i>E11</i>	<i>E12</i>	<i>E13</i>	<i>E14</i>	<i>E15</i>
Temperatura inicial do ar (°C)	130	180	160	140	200
Vazão do ar (m ³ /h)	85	85	85	85	85
Taxa de alimentação (10 ⁻⁴ m ³ /h)	0,72	3,12	3,12	3,12	3,12
Vazão do ar de atomização (m ³ /h)	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8

Tabela E.4: Parâmetros de operação dos ensaios do grupo I: E16 a E20.

<i>Parâmetros de operação</i>	<i>E16</i>	<i>E17</i>	<i>E18</i>	<i>E19</i>	<i>E20</i>
Temperatura inicial do ar (°C)	200	200	140	220	190
Vazão do ar (m ³ /h)	85	85	85	85	85
Taxa de alimentação (10 ⁻⁴ m ³ /h)	3,12	3,12	1,7	1,7	1,7
Vazão do ar de atomização (m ³ /h)	0,6	0,7	0,8	0,7	0,7

E.2 Grupo II - Alumina tabular

Tabela E.5: Parâmetros de operação dos ensaios do grupo II: *E1* a *E5*.

<i>Parâmetros de operação</i>	<i>E1</i>	<i>E2</i>	<i>E3</i>	<i>E4</i>	<i>E5</i>
Temperatura inicial do ar (°C)	140	140	120	130	140
Vazão do ar (m ³ /h)	33	33	33	21	33
Taxa de alimentação (10 ⁻⁴ m ³ /h)	3,6	3,6	2,4	3,6	3,6
Vazão do ar de atomização (m ³ /h)	0,7	0,6	0,8	0,8	0,8

Tabela E.6: Parâmetros de operação dos ensaios do grupo II: *E6* a *E10*.

<i>Parâmetros de operação</i>	<i>E6</i>	<i>E7</i>	<i>E8</i>	<i>E9</i>	<i>E10</i>
Temperatura inicial do ar (°C)	130	130	130	130	130
Vazão do ar (m ³ /h)	33	33	45	33	33
Taxa de alimentação (10 ⁻⁴ m ³ /h)	2,4	3,6	3,6	0,72	1,2
Vazão do ar de atomização (m ³ /h)	0,7	0,8	0,8	0,8	0,7

Tabela E.7: Parâmetros de operação dos ensaios do grupo II: *E11* a *E15*.

<i>Parâmetros de operação</i>	<i>E11</i>	<i>E12</i>	<i>E13</i>	<i>E14</i>	<i>E15</i>
Temperatura inicial do ar (°C)	150	180	130	160	200
Vazão do ar (m ³ /h)	33	21	33	33	33
Taxa de alimentação (10 ⁻⁴ m ³ /h)	3,6	0,48	3,6	3,6	3,6
Vazão do ar de atomização (m ³ /h)	0,8	0,9	0,8	0,8	0,8

Bibliografia

- [1] J. O. A. Paschoal. Projeto plataforma para a indústria de revestimento cerâmico. Relatório final, Centro Cerâmico do Brasil - CCB, São Paulo, julho 1999.
- [2] A. P. F. Gorini and A. R. Correa. Cerâmica para resvestimentos. *BNDES Setorial*, 10:201–251, setembro 1999.
- [3] R. B. Keey. *Drying principles and practice*. Pergamon Press, 1972.
- [4] R. B. Keey. *Theoretical foundations of drying technology*, volume 1 of *Advances in drying*, chapter 1. Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- [5] F. D. Shaw. Fresh options in drying. *Niro Feature Articles*, 1999. www.niro.com/article.html.
- [6] G. Ondrey. Models demystify spray drying. *Chemical Engineering*, 102:30–31, dezembro 1995.
- [7] N. Dombrowski, E. A. Foumeny, and A. Riza. Know the cfd codes. *Chemical Engineering Progress*, 89(9):46–48, setembro 1993.
- [8] E. A. Foumeny and F. Benyahia. Can cfd improve the handling of air, gas and gas-liquid mixtures? *Chemical Engineering Progress*, 89(2):21–26, fevereiro 1993.
- [9] C. Strumillo and T. Kudra. *Drying: principles, applications and design*, volume 3. Gordon and Breach Science Publishers, 1986.
- [10] K. Masters. Applying spray drying to ceramics. *American Ceramic Society Bulletin*, 73(1):63–72, 1994.
- [11] F. D. Shaw. Spray drying: A traditional process for advanced applications. *Journal of the American Ceramic Society Bulletin*, 69(9):1484–1489, 1990.
- [12] D. L. Houk. Spray drying in metal industries. *Journal of Metals*, 37:24–27, junho 1985.
- [13] D. E. Oakley. Produce uniforme particles by spray drying. *Chemical Engineering Progress*, 93:48–54, outubro 1997.

- [14] F. D. Shaw. Drying technology: the versatility of continuous gas suspension dryers. *Niro Feature Article*, 1999. www.niro.com/article.html.
- [15] K. Masters. *Spray drying*, volume 1 of *Advances in drying*, chapter 8. Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- [16] W. S. Yeung. Dynamics of gas-liquid spray systems. In *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, volume 3, chapter 12, pages 281–300. Nicholas P. Cheremisinoff, 1983.
- [17] S. J. Lukasiewicz. Spray-drying ceramic powders. *Journal of the American Ceramic Society*, 72(4):617–624, 1989.
- [18] E. S. Oran and J. P. Boris. *Numerical simulation of reactive flow*. Elsevier, 1987.
- [19] J. K. Dukowicz. A particle-fluid numerical model for liquid sprays. *Journal of Computational Physics*, 35:229–253, 1980.
- [20] A. A. Mostafa and H. C. Mongia. On the modeling of turbulent evaporating sprays: eulerian versus lagrangian approach. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 30(12):2583–2593, 1987.
- [21] B. Abramzon and W. A. Sirignano. Droplet vaporization model for spray combustion calculations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 32(9):1605–1618, 1989.
- [22] A. Adeniji-Fashola and C. P. Chen. Modeling of confined turbulent fluid-particle flows using eulerian and lagrangian schemes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 33(4):691–701, 1990.
- [23] A. Berlemont, M. Grancher, and G. Gouesbet. On the lagrangian simulation of turbulence influence on droplet evaporation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 34(11):2805–2812, 1991.
- [24] C. H. Chiang and W. A. Sirignano. Interacting, convecting, vaporizing fuel droplets with variable properties. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 36(4):875–886, 1993.
- [25] X. Q. Chen and J. C. F. Pereira. Computation of turbulent evaporating sprays with well-specified measurements: a sensitivity study on droplet properties. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39(3):441–454, 1995.
- [26] M Parti and B. Paláncz. Mathematical model for spray drying. *Chemical Engineering Science*, 29:335–362, 1974.
- [27] W. J. C. Teves. Modelagem matemática e simulação de secador spray. Relatório, Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

- [28] A. Negiz, E. S. Lagergren, and A. Çinar. Mathematical models of cocurrent spray drying. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 34:3289–3302, 1995.
- [29] C. T. Crowe, M. P. Sharma, and D. E. Stock. The particle-source-in-cell (psi-cell) model for gas-droplet flows. *Journal of Fluids Engineering*, 99(2):325–332, junho 1977.
- [30] F. Boysan and H. Binark. Predictions of induced air flows in hollow sprays. *Journal of Fluids Engineering*, 101:312–318, setembro 1979.
- [31] Y. C. Lee. *Modeling work in thermal plasma processing*. PhD thesis, University of Minnesota, 1984.
- [32] P. Proulx, J. Mostaghimi, and M. I. Boulos. Plasma-particle interaction effects in induction plasma modeling under dense loading conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 28(7):1327–1336, 1985.
- [33] S. E. Papadakis and C. J. King. Air temperature and humidity profiles in spray drying. 1. features predicted by the particle source in cell model. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 27:2111–2116, 1988.
- [34] D. E. Oakley and R. E. Bahu. Computational modelling of spray dryers. *Computers and Chemical Engineering*, 17:S493–S498, 1993. Supplement.
- [35] C. T. Crowe. *Modeling spray-air contact in spray-drying systems*, volume 1 of *Advances in drying*, chapter 3. Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- [36] S. V. Patankar. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. McGraw Hill, New York, USA, 1980.
- [37] R. B. Bird, W. E. Stewart, and E. N. Lightfoot. *Transport Phenomena*. John Wiley & Sons, 1960.
- [38] Büchi Labortechnik AG. *Training papers spray drying*, 1997,1998.
- [39] R. H. Sabersky and A. J. Acosta. *Fluid Flow, A First Course in Fluid Mechanics*. Macmillan Company, 1966.
- [40] F. M. White. *Viscous Fluid Flow*. McGraw-Hill Company, 1974.
- [41] A. P. M. Menegazzo. *Estudo da Correlação entre Microestrutura e Propriedades Finais de Revestimentos Cerâmicos do Tipo Grês Porcelanato*. PhD thesis, IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, BR, dezembro 2001.
- [42] S. V. Patankar. A general propose computer program for two-dimensional elliptic flow, 1990. private communication.

- [43] R. C. Favalli. Simulação de tochas de plasma de arco não transferido. Master's thesis, Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, BR, 1997.
- [44] R. C. Bianchini. Modelagem e simulação de processos a plasma para tratamento de organo-clorados. Master's thesis, Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, BR, 2000.
- [45] S. V. Patankar and D. B. Spalding. *Heat and mass transfer in boundary layers*. Intertext Books, London, UK, 1970.
- [46] S. V. Patankar. A numerical method for conduction in composite materials, flow in irregular geometries and conjugate heat transfer. In *Proceedings of the 6th International Heat Transfer Conference*, volume 3, page 287, Toronto, CA, 1978.
- [47] S. V. Patankar. A calculation procedure for two-dimensional elliptic situations. *Journal of numerical heat transfer*, 4:409, 1981.
- [48] D. B. Spalding. A novel finite-difference formulation for differential expressions involving both first and second derivatives. *International Journal of Numerical Methods and Engineering*, 4:551, 1972.
- [49] G. D. Raithby and K. E. Torrance. Upstream-weighted differencing schemes and their application to elliptic problems involving fluid flow. *Computational Fluids*, 2:191, 1974.
- [50] A. Frydman, J. Vasseur, F. Ducept, M. Sionneau, and J. Moureh. Simulation of spray drying in superheated steam using computational fluid dynamics. *Drying Technology*, 17(7/8):1313–1326, 1999.
- [51] Review Numerical Models fo dilute gas-particle flows. C. t. crowe. *Journal of fluids engineering*, 104:297–303, setembro 1982.
- [52] G. S. R. Narasimhamurty, A. Purushothaman, and K. Sivaji. Hydrodynamics of liquid drops in air. In Nicholas P. Cheremisinoff, editor, *Encyclopedia of fluid mechanics*, volume 3, chapter 11, pages 250–279. 1983.
- [53] H. E. A. van den Akker. Momentum equations in dispersed two-phase flows. In Nicholas P. Cheremisinoff, editor, *Encyclopedia of fluid mechanics*, volume 3, chapter 15, pages 371–400. 1983.
- [54] I. Zbicinski, S. Grabowski, C. Strumillo, L. Kiraly, and W. Krzanowski. Mathematical modelling of spray drying. *Computation and Chemical Engineering*, 12(2/3):209–214, 1988.
- [55] J. R. Grace and T. Wairegi. Properties and characteristics of drops and bubbles. In Nicholas P. Cheremisinoff, editor, *Encyclopedia of fluid mechanics*, volume 3, chapter 3, pages 43–57. 1983.

- [56] M. L. Mokeba, D. W. Salt, B. E. Lee, and M. G. Ford. Simulating the dynamics of spray droplets in the atmosphere using ballistic and random-walk models combined. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67/68:923–933, 1997.
- [57] M. Sommerfeld. Analysis of isothermal and evaporating turbulent sprays by phase-doppler anemometry and numerical calculations. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 19:173–186, 1998.
- [58] N. P. Cheremisinoff. Hydrodynamic mixing of dispersed and atomized flows. In Nicholas P. Cheremisinoff, editor, *Encyclopedia of fluid mechanics*, volume 3, chapter 13, pages 301–364. 1983.
- [59] R. Clift, J. R. Grace, and M. E. Weber. *Bubbles, drops and particles*. Academic Press, INC, 1978.
- [60] R. D. Reitz and F. V. Bracco. Mechanisms of breakup of round liquid jets. In Nicholas P. Cheremisinoff, editor, *Encyclopedia of fluid mechanics*, volume 3, chapter 10, pages 233–249. 1983.
- [61] T Çakaloz, H. Akbaba, E. T. Yesügey, and A. Periz. Drying model for α -amylase in a horizontal spray dryer. *Journal of Food Engineering*, 31:499–510, 1997.
- [62] T. Jinxin, W. Zonglian, and H. Lixin. Recent progress of spray drying in china. *Drying Technology*, 17(9):1747–1757, 1999.
- [63] W. H. Gauvin, S. Katta, and F. H. Knelman. Drop trajectory predictions and their importance in the design of spray dryers. *International Journal of Multiphase Flow*, 1:793–816, 1975.
- [64] W. J. Walker Jr. and J. S. Reed. Influence of slurry parameters on the characteristics of spray-dried granules. *Journal of the American Ceramic Society*, 82(7):1711–1719, 1999.
- [65] W. O’Keefe. Energy efficiency is criterion for kaolin spray dryer. *Power*, 128:100, maio 1984.
- [66] G. J. Van Wylen. *Fundamentos da termodinâmica clássica*. Editora Edgard Blücher Ltda., 1965.



M22563



Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Diretoria de Ensino & Informação Científica e Tecnológica
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3816 - 9148
SÃO PAULO - São Paulo - Brasil
[http: //www.ipen.br](http://www.ipen.br)

O Ipen é uma autarquia vinculada à Secretaria de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento Econômico do Estado de São Paulo, gerida técnica, administrativa e financeiramente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência e Tecnologia, e associada à Universidade de São Paulo.