

10. C.T. Crowe. *Modeling spray-air contact in spray-drying systems*, volume 1 of *Advances in drying*, chapter 3. Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
11. R.C. Bianchini. Modelagem e simulação de processos a plasma para o tratamento de orgão clorados. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, Instituto de Física, BR, 2000.
12. S.V. Patankar. *Numerical heat transfer and fluid flow*. McGraw Hill, 1980.

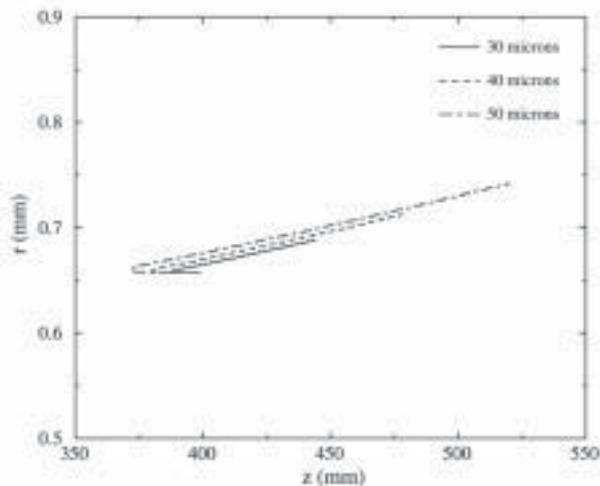


Figura 9. Trajetórias das gotas dentro do secador. Injeção paralela em relação ao eixo da câmara (fluxo contracorrente).

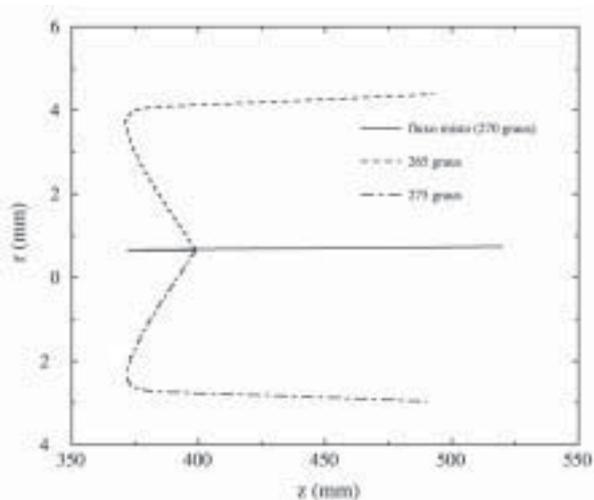


Figura 10. Comparação entre as trajetórias das gotas injetadas com ângulos de 270, 265 e 275°.

tórias das gotas injetadas contracorrente, também utilizando-se da mesma velocidade inicial utilizada na concorrente: 12 m/s. O desvio da posição inicial da injeção deve-se também à inclinação das linhas de fluxo que nessa região da câmara são maiores. Variando-se o ângulo de injeção em 5°, figura 10, constata-se um comportamento semelhante ao caso em que a injeção é concorrente: 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.

4 Conclusões

Através de modelos matemáticos, como o apresentado neste trabalho, torna-se possível o estudo de parâmetros importantes do processo de secagem de sus-

ensões por atomização, utilizado por diversos segmentos da indústria, inclusive pela de revestimento cerâmico, podendo ser considerada como uma ferramenta no auxílio à otimização do sistema e sendo tempo computacional seu único custo. No presente artigo, simulou-se, especificamente, a influência do ponto e do ângulo de injeção do material sobre a trajetória das partículas dentro da câmara; os resultados obtidos indicam forte influência de ambos tanto no caminho descrito pelas partículas como no tempo total de secagem. Tendo-se as trajetórias pode-se avaliar a possibilidade de impacto das partículas com as paredes da câmara bem como, por conseqüência, o molhamento e o acúmulo de material nestas paredes. O efeito da injeção do material no escoamento do gás de secagem foi também estudado: para partículas pequenas e taxa de injeção de material relativamente baixa (1,5% da taxa de gás de secagem), a influência no campo das velocidades (linhas de fluxo) não é elevada, porém, torna-se mais acentuada no campo de temperaturas. Este último fato sugere que a concentração de água nas gotas pode levar à operações ineficientes do secador, gerando, portanto, materiais de baixa ou indesejada qualidade.

Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq pelo auxílio financeiro através da bolsa de estudos concedida a R.C. Favalli.

Referências Bibliográficas

1. R.B. Key. *Theoretical foundations of drying technology*, volume 1 of *Advances in drying*, chapter 1. Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
2. C. Strumilo and T. Kudra. *Drying: principles, applications and design*, volume 3. Gordon and Breach Science Publishers, 1986.
3. K. Masters. Applying spray drying to ceramics. *American Ceramic Society Bulletin*, 73(1):63-72, 1994.
4. F.D. Shaw. Spray drying: A traditional process for advanced applications. *Journal of the American Ceramic Society Bulletin*, 69(9):1484-1489, 1990.
5. D.L. Houk. Spray drying in metal industries. *Journal of Metals*, 37:24-27, June 1985.
6. J.O.A. Paschoal. Projeto plataforma para a indústria de revestimento cerâmico. Relatório final, Centro Cerâmico do Brasil – CCB, São Paulo, July 1999.
7. A.P.F. Gorini and A.R. Correa. Cerâmica para revestimentos. *BNDES Setorial*, 10:201-251, September 1999.
8. R.C. Favalli. Simulação de tochas de plasma de arco não transferido. Dissertação de mestrado, Instituto de Física, Universidade de São Paulo, BR, 1997.
9. 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*, pages 325-332, June 1977.

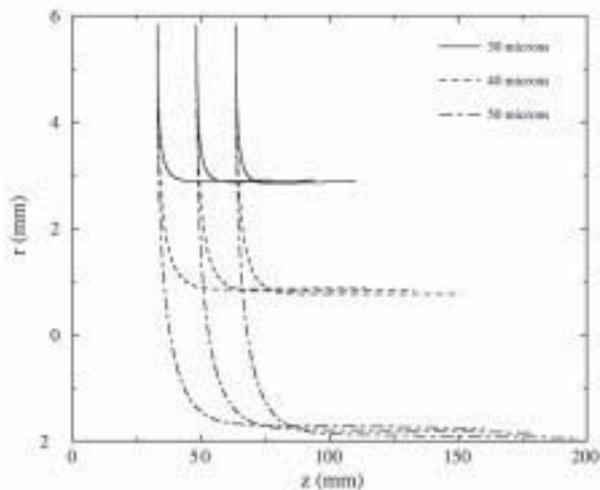


Figura 5. Trajetória das gotas dentro do secador. Injeção perpendicular em relação ao eixo da câmara.

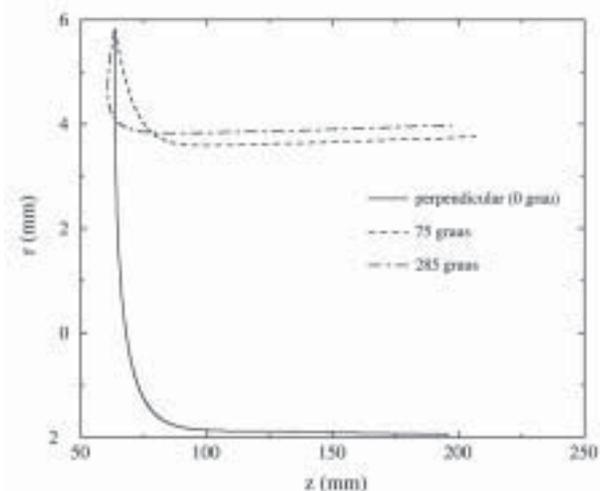


Figura 6. Comparação entre as trajetórias das gotas injetadas com ângulos de 0, 75 e 285°.

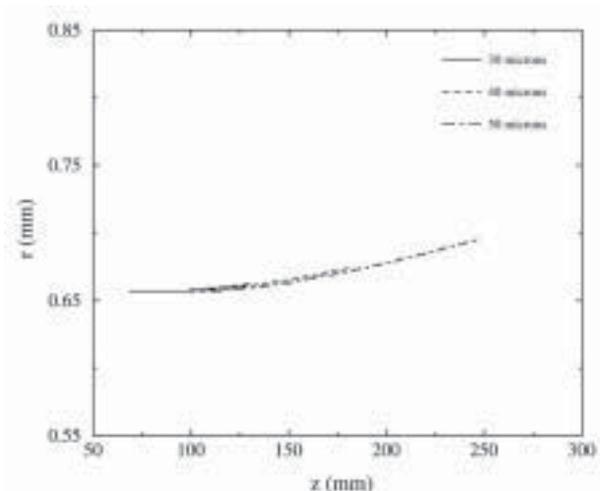


Figura 7. Trajetórias das gotas dentro do secador. Injeção paralela em relação ao eixo da câmara (fluxo concorrente).

entre as regiões próxima ao eixo de simetria e a de coordenada radial de aproximadamente 4 mm.

Diversas aplicações que se utilizam da secagem por atomização fazem-na em fluxo concorrente, isto é, gás e suspensão injetados na mesma direção e mesmo sentido, pois materiais sensíveis ao calor (termolábeis) estão protegidos pela água na sua superfície, que começa a evaporar em 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 para esse caso. Mudando-se algumas poucas variáveis no programa, facilmente simula-se essa situação. Para que fosse mais evidente a injeção paralela ao eixo, a velocidade inicial das gotas foi aumentada de 2 para 12 m/s; todos os outros parâmetros foram mantidos. A figura 7 mostra as trajetórias das gotas injetadas nas condições apenas descritas, para os diâmetros de 30, 40 e 50 μm . Nota-se que há pouco desvio da posição paralela assumida inicialmente e este deve-se às linhas de fluxo do gás de secagem (figura 4) que apresentam-se ligeiramente inclinadas devido à presença das paredes lateral e inferior da câmara. Entretanto, quando o ângulo de injeção é aumentado ou diminuído em apenas 5°, as trajetórias se alteram bastante, como mostra a figura 8; esta mudança nas trajetórias é diretamente proporcional à velocidade de injeção da gota; portanto, quanto maior a velocidade, mais para longe do eixo de simetria irá a gota.

A principal vantagem da secagem de fluxo contracorrente é que a altura do secador é menor que a de fluxo concorrente, pois o material é injetado na base da câmara, de baixo para cima, percorrendo uma certa distância e, posteriormente, por causa dos efeitos da gravidade, retornam secos para a base. O gás de secagem é, em geral, injetado no topo da câmara. A figura 9 apresenta as traje-

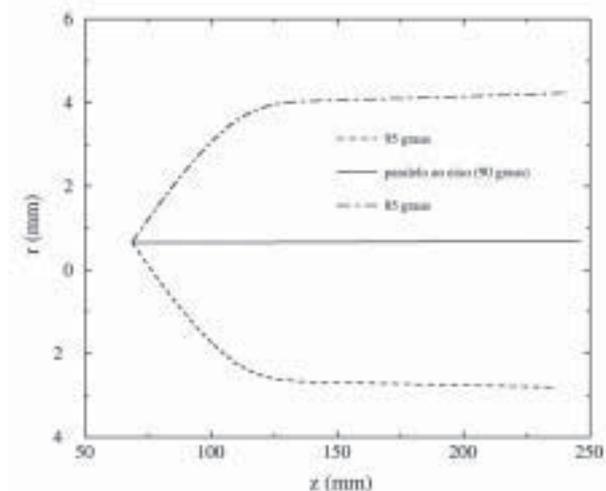


Figura 8. Comparação entre as trajetórias das gotas injetadas com ângulos de 90, 85 e 95°.

Em BC, saída da câmara, assumem-se condições de fluxo livre, então: $\partial h/\partial z = 0$, $\partial u/\partial z = 0$, $\partial v/\partial z = 0$, $\partial c_w/\partial z = 0$.

Nas paredes superior, lateral e inferior, ambas as componentes da velocidade e a umidade do ar são nulas. A temperatura assumida é a ambiente, exceto para a parede inferior, onde $\partial h/\partial z = 0$ prevalece.

O ponto de injeção, indicado pela letra I na figura 1, é posicionado, em princípio, perpendicularmente ao eixo de simetria, ou seja, possui ângulo de injeção de 0° . A velocidade de injeção das gotas é de 2 m/s, à uma taxa equivalente à 1,5% da taxa de fluxo do gás de secagem; a temperatura inicial das gotículas é a ambiente.

3 Resultados e discussões

Foi realizado um estudo da influência do ponto e ângulo de injeção sobre as trajetórias das partículas, assumindo-se regime permanente; os resultados das simulações são apresentados nesta seção. Na figura 3 vê-se as isotermas do gás dentro do secador geradas com as condições de operação apresentadas na seção anterior, antes (a) e depois (b) da injeção das gotículas d'água. Como a taxa de injeção de material é pequena, 1,5% da vazão de ar, a redução da temperatura do gás também o é, variando de 1 a 2% no eixo da câmara. A região central da câmara é a mais quente; se o material a ser seco não for termolábil, isto é, material não sensível ao calor, essa é a região mais propícia para injetá-lo, permitindo-se, dessa forma, que

uma taxa maior de material seja seco.

A influência nas linhas de fluxo pela injeção das partículas na câmara é menor do que no campo de temperaturas, como pode-se observar na figura 4 os perfis antes (a) e depois (b) da injeção do material. Devido às paredes (lateral, superior e inferior), cria-se uma região de recirculação de gás na qual, eventualmente, as gotas podem ficar presas, aumentando seu tempo de residência no secador. Aumenta também, caso a injeção das gotas seja efetuada nessa área, a probabilidade de colisão do material ainda úmido com a parede lateral.

Nestes testes foram ensaiadas partículas de três diâmetros (30, 40 e 50 μm), injetadas em três posições diferentes, decrescendo, portanto, nove trajetórias possíveis, como mostra a figura 5; as partículas maiores, e conseqüentemente com maior inércia, penetram mais profundamente na câmara, indo, inclusive, 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. A figura 6 faz uma comparação entre as trajetórias das gotas de 50 μm de diâmetro injetadas com ângulos diferentes: 75° e 295° . Nota-se que há uma forte redução na penetração dessa classe de partículas computacionais, mas a distância axial que elas percorrem para total evaporação não é muito alterada. Entretanto, as condições experimentadas em cada caso diferem bastante, pois, por exemplo, a diferença de temperatura é de 80 K

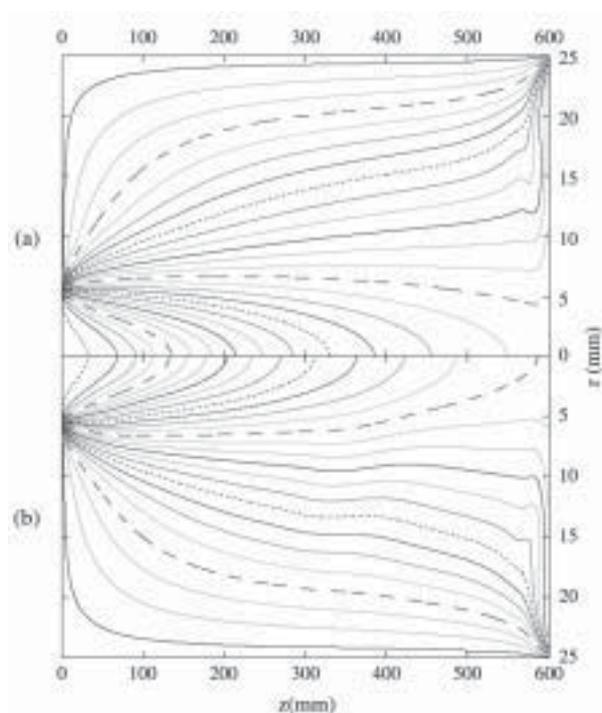


Figura 3. Isotermas (a) antes e (b) depois da injeção das gotas. Linha mais interna de 690K, diminuindo em intervalos de 10K.

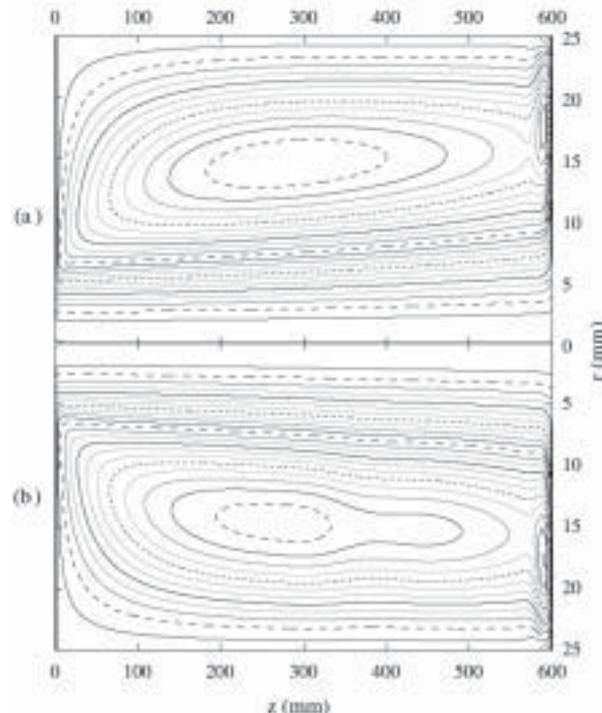


Figura 4. Linhas de fluxo (a) antes e (b) depois da injeção das gotas. Linha mais interna (próxima ao eixo de simetria) de $0,22 \text{ g/s}$, diminuindo em intervalos de $1 \times 10^{-2} \text{ g/s}$.

ção, os modelos matemáticos utilizados na simulação da secagem de gotículas injetadas num secador são brevemente descritos, juntamente com o domínio computacional do sistema. Os resultados simulados e as discussões destes são apresentados na seção 3. O item 4 apresenta a conclusão do trabalho.

2 Fluidodinâmica computacional

O uso de modelos físicos e matemáticos para simulação de sistemas e de processos na física, nas engenharias e até mesmo na biologia é, hoje em dia, bastante comum devido à rápida evolução da capacidade computacional de processamento e de armazenamento, as quais viabilizam o emprego de modelos cada vez mais sofisticados.

Para sistemas de secagem por atomização, os modelos matemáticos empregados são compostos por equações diferenciais parciais acopladas que descrevem o comportamento de ambas as fases (dispersa e gasosa). Tal sistema de equações não possui solução analítica e, portanto, deve ser resolvido numericamente. A fase gasosa é simulada através das equações de Navier-Stokes, continuidade, conservação de energia e conservação de vapor d'água, que fornecem, respectivamente, as componentes axial e radial da velocidade, massa, temperatura e umidade do ar utilizado na secagem⁸; utilizam-se, para a fase gasosa, coordenadas Eulerianas. A simulação da fase dispersa é efetuada através de uma distribuição discreta de diâmetros iniciais, onde tais classes de tamanho (designadas, em geral, de partículas computacionais) representam cada qual uma porcentagem da massa total injetada no sistema. Os perfis obtidos através de modelos de transferência de calor e massa entre o gás e cada uma das partículas computacionais são temperatura, velocidade (axial e radial), decréscimo de massa e de diâmetro, calculados ao longo de suas trajetórias⁹⁻¹¹. O equacionamento das gotículas e partículas emprega uma abordagem Lagrangeana. O procedimento numérico utilizado para resolução das equações diferenciais envolvidas é o método dos volumes de controle¹².

2.1 Domínio computacional

O domínio computacional esquematizado na figura 1 representa uma metade da câmara de secagem, figura 2. A entrada do ar utilizado na secagem é efetuada por AF; o gás flui através da câmara, arrastando as gotas d'água, 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 (quando não totalmente evaporado), é efetuada por BC, na base da câmara. A linha AB representa o eixo de simetria.

2.2 Condições iniciais e de contorno

Com base no domínio computacional descrito na se-



Figura 1. Domínio computacional do sistema de secagem por atomização.

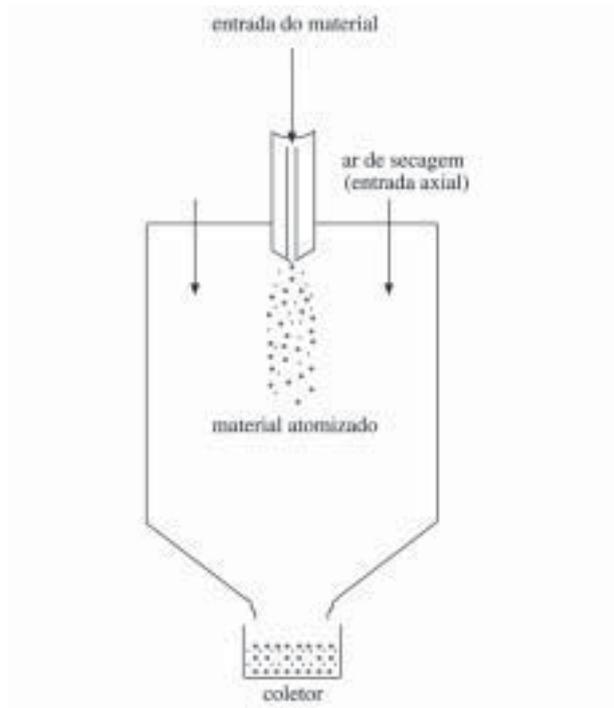


Figura 2. Esquema de um secador de fluxo concorrente.

ção anterior, são estabelecidas as condições iniciais e de contorno.

Na entrada da câmara, AF, a temperatura inicial do gás é de 410 °C e sua velocidade axial de 2 m/s; a componente radial da velocidade é, assumidamente, nula. A umidade inicial do ar é considerada zero, porém pode ser alterada de acordo com dados ambientais. Os valores iniciais utilizados nesse trabalho foram escolhidos com base nos assumidos por Crowe¹⁰. Entretanto, a alteração destes é efetuada de forma simples e direta.

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 $\partial cw/\partial r = 0$.

Modelagem Matemática da Secagem por Atomização: Trajetória das Gotículas dentro do Secador

R.C. Favalli¹, M.M. Pimenta² e J.O.A. Paschoal¹

¹ *Ipen - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares*

Instituto de Física da Universidade de São Paulo

² *Escola de Engenharia Mecânica da Universidade de São Paulo*

e-mail: rfavalli@fap01.if.usp.br

Resumo: Nos dias atuais, a secagem de soluções por atomização, nos diversos setores industriais, é amplamente empregada. Entretanto, a otimização do processo, em sua grande maioria, é realizada de modo empírico e implica em um certo custo às empresas, além do tempo despendido com testes experimentais. A modelagem e simulação de tais processos de secagem surge como ferramenta no auxílio à otimização, permitindo que diversos parâmetros sejam estudados e variados e, portanto, que a influência de cada um desses parâmetros no sistema seja estimada. Nesse artigo, foi realizado um estudo da influência do ponto e do ângulo de injeção da suspensão, que são dois parâmetros operacionais importantes no processo, sobre a trajetória das partículas dentro da câmara de secagem. Ambos, ponto e ângulo de injeção, mostraram exercer forte influência no caminho descrito pelas partículas e, possivelmente, são responsáveis por parte das colisões das partículas ainda úmidas com as paredes da câmara.

Palavras-chaves: *atomização, processo, modelagem matemática*

1 Introdução

O processo de secagem de soluções por atomização é, atualmente, empregado por diversos segmentos industriais, dentre os quais destacam-se os das indústrias química, farmacêutica, alimentícia e cerâmica¹⁻⁵. O foco principal do presente trabalho é no auxílio à 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 à vários outros processos de escoamento bifásico, como por exemplo, ao de deposição de materiais sobre superfícies por jateamento ou à introdução de combustíveis dos modernos sistemas de injeção eletrônica dos automóveis atuais.

Na indústria de revestimento cerâmico, a secagem por atomização atua na remoção da água adicionada no processo de moagem das argilas^{6,7}, elevando acentuadamente os custos energéticos. No entanto, esse processo de produção, conhecido como via úmida, é preferido em relação ao

via seca (que não utiliza água na moagem dos materiais) pela maioria das empresas (~60%)⁶, pois as características do produto final são melhores.

As simulações de secadores eram feitas de forma integral de modo que a influência de diversos 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 simulação do processo de secagem por atomização, possibilitando a previsão dos perfis do ar (fase contínua) dentro do secador, bem como do material (fase dispersa) a ser seco no sistema, além da análise da influência de cada parâmetro na qualidade do produto seco. A simulação do processo pode ser, então, utilizada como uma ferramenta em sua otimização, sendo tempo computacional seu único custo.

Neste artigo, a influência das condições de operação do sistema, principalmente a do ângulo de injeção, na trajetória que as gotículas d'água descrevem dentro do secador são analisadas de modo qualitativo. Na próxima se-