

UM MODELO PARA TRANSMISSÃO DE DOENÇAS VIA BIOAEROSSÓIS**Raimundo Nonato Calazans Duarte**

Universidade Federal da Paraíba – Departamento de Engenharia Mecânica
58.109-970 – Campina Grande/PB
rduarte@nrva.ufsc.br

César José Deschamps

Universidade Federal de Santa Catarina – Departamento de Engenharia Mecânica
88.040-900 – Florianópolis/SC
deschamps@nrva.ufsc.br

Cezar Otaviano Ribeiro Negrão

Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná – Departamento Acadêmico de Mecânica
80.230-901 – Curitiba/PR
negrao@cefetpr.br

Resumo. *A análise da qualidade biológica do ar é uma condição para se compreender, prevenir e eliminar problemas provocados por microorganismos sobre a saúde humana. Este aspecto é particularmente importante em função do crescente tempo de permanência das pessoas em recintos condicionados. A transmissão de doenças respiratórias pela emissão de aerossol contaminado (via tosse, espirro, fala, etc) é um fenômeno de grande complexidade e pouco explorado do ponto de vista da engenharia. De fato, constata-se uma ausência quase que completa de estudos teóricos que possibilitem uma previsão do risco de contaminação, bem como a importância relativa de cada parâmetro do problema. O presente trabalho propõe um modelo matemático para a previsão da dispersão do bioaerossol respiratório, levando em consideração o transporte e a interação das gotículas contaminadas em contato com o ar, bem como a inalação e a deposição das mesmas no trato respiratório. O modelo foi ajustado para análise do risco de contaminação da tuberculose provocada pela *Mycobacterium tuberculosis*, mas pode ser estendido para outras doenças respiratórias provocadas por outros microorganismos. O conjunto de equações resultante pode ser resolvido computacionalmente, adotando-se metodologias tradicionais como a dos volumes finitos.*

Palavras chave: *qualidade biológica do ar, doença infecciosa, tuberculose, transmissão via aérea, dinâmica dos fluidos computacional*

1. Introdução

Até o início da década de 70, todos os setores de condicionamento de ar vinham se amplificando continuamente quando se depararam com a crise de energia de 1973. Novas regulamentações e recomendações foram feitas para a temperatura interna, que deveria ser reduzida de 20 para 18 °C no inverno e elevada de 25 para 27 °C no verão (Pauken, 1999), e a taxa de ventilação, simplesmente reduzida pela metade (Woods, 1979; Burton, 1990), de modo a economizar energia.

Após a segunda metade da década de 70, a redução do suprimento de ar externo, o aumento da recirculação e a construção de edificações mais estanques acabaram por revelar de forma bastante trágica o vínculo entre sistema de condicionamento, contaminação biológica do ar e transmissão de doenças. Trata-se de um surto de pneumonia ocorrido em 1976 durante uma convenção da Legião Americana em um hotel da cidade de Filadélfia, Estados Unidos, onde cerca de 182 pessoas foram infectadas por uma bactéria de ação bastante agressiva, a *Legionella pneumophillia*. Apesar de pouco comum, ela já havia sido identificada durante surto de pneumonia em 1957 (com setenta e oito infectados e dois óbitos), mas ainda não constava nas publicações da área médica daquela época (Top e Wehrle, 1976).

De gravidade inferior à doença dos Legionários, mas de igual ou maior importância por sua elevada prevalência, algumas manifestações de desconforto, mal estar e queixas relativas à saúde passaram a ser encaradas como advindas do sistema de condicionamento. Sintomas como irritação nas mucosas (olhos, nariz e garganta, principalmente), ressecamento excessivo da pele, cefaléia, náusea, vômito, fadiga, obstrução nasal, dentre outros, eram rotineiramente relatados por ocupantes de edificações condicionadas, em sua maioria comerciais (Skov, 1992). Em relatório de 1983, a Organização Mundial da Saúde (OMS) passou a chamar de síndrome dos edifícios doentes (ou *sick building syndrome*) às ocorrências onde se observa a continuidade destes sintomas em um percentual significativo (20%) de ocupantes (Sterling et al., 1991). Segundo Skov (1992), esta "síndrome" parece estar relacionada às edificações, pois os sintomas crescem ao longo da jornada diária e desaparecem ou diminuem se as pessoas deixam o ambiente de trabalho.

Além de ampliar a fronteira da qualidade do ar até então vinculada à poluição química, a doença dos legionários e a síndrome dos edifícios doentes também ressaltaram uma das mais antigas constatações da microbiologia: a relação entre

as doenças e os microorganismos no ar. Para os profissionais de condicionamento de ar, esta tomada de consciência ocorreu pelo reconhecimento de que os ambientes haviam-se convertido em verdadeiros locais de cultivo para alguns agentes patogênicos. Segundo Rose (1994), os três requisitos básicos para a produção de bioaerossóis, a saber um reservatório, condições adequadas para crescimento e um mecanismo de atomização, passaram a ser facilmente encontrados no próprio ambiente ou ao longo do sistema de condicionamento. O evento dos Legionários foi um alerta para que o sistema de condicionamento eliminasse ou pelo menos não promovesse culturas microbiológicas.

Um enorme esforço passou a ser dedicado a esta área e diversos pesquisadores motivaram-se a estudar, identificar, quantificar e analisar os efeitos de microorganismos em interiores. No início, as pesquisas tinham a poluição biológica como uma extensão da poluição química, como em Bayer e Black (1988). Apresentando uma análise mais consistente sobre o assunto, Morris (1986) descreveu com propriedade a relação entre dois tipos de sistema de condicionamento, suas variáveis de funcionamento (como razão de mistura e vazão de ventilação) e a poluição biológica onde os vírus e as bactérias se constituíram os principais elementos da contaminação biológica. Estes trabalhos apenas confirmaram a observação de que o homem moderno passa a maior parte da vida imerso em uma complexa mistura de materiais biológicos que formam um intrincado sistema ecológico.

É notória também a influência destes microorganismos sobre a saúde humana, provocando desde o resfriado comum, diversos tipos de pneumonia, sarampo, até a tuberculose. De acordo com dados de 1998, a pneumonia e a tuberculose com 2,25 e 1,5 milhões de óbitos, respectivamente, são de longe as doenças do aparelho respiratório com maior índice de mortalidade no mundo, seguidas pela asma com 144 mil vítimas fatais (WHO, 1999). Este mesmo relatório posiciona a tuberculose em primeiro lugar no ranking de mortalidade das doenças infecciosas e parasitárias. Das três moléstias citadas, a tuberculose é a única com transmissão majoritariamente aérea (Nardell, 1993). Além disto, a alta capacidade de sobrevivência de seu principal agente, o bacilo *Mycobacterium tuberculosis*, a dificuldade de diagnóstico e a longa permanência em suspensão das gotículas (1 a 5 µm) que o contém elevam seu risco de infecção.

A averiguação da qualidade biológica do ar, discutida em publicação anterior (Duarte, 2002), tem sido majoritariamente conduzida por meio de investigações experimentais, envolvendo sempre instrumentos ou métodos de medição. Como qualquer pesquisa com base experimental, tais técnicas não conseguem prever o comportamento da contaminação biológica de um determinado ambiente antes do mesmo existir e já constituir-se em um problema. Assim, a escolha de alternativas de projeto para a edificação ou para o sistema de condicionamento, a previsão da performance de soluções atualmente propostas, a análise de sensibilidade dos parâmetros do problema, entre outros, são difíceis de serem obtidas.

Em função do exposto, o presente trabalho propõe uma análise teórica como opção às metodologias experimentais para investigar a poluição biológica em interiores. A oferta de uma ferramenta mais adequada para o estudo e para a antecipação deste tipo de problema deverá ser alcançada pela modelação do fenômeno e pela simulação computacional. A conjugação desta técnica com a observação experimental poderá contribuir para uma compreensão mais detalhada do fenômeno, possibilitando a construção de ambientes mais saudáveis e seguros em relação à microbiota de interiores.

A montagem de um modelo para a contaminação biológica de ambientes ocupados constitui a motivação fundamental do presente trabalho. Como objetivo específico, pretende-se modelar o processo de transmissão aérea de doenças, sendo a tuberculose escolhida como doença-alvo, tendo em vista a sua capacidade infecciosa e mortalidade. Neste sentido, o assunto é abordado inicialmente de forma global, buscando estabelecer a dinâmica da transmissão de doenças através da emissão de bioaerossol respiratório contaminado e os parâmetros que a determinam. Em seguida, são apresentadas análises específicas de cada processo envolvido no trajeto do microorganismo entre o doente (ou emissor) e uma possível nova vítima da doença (denominado aqui como receptor). De forma simplificada, a transmissão foi subdividida nas seguintes etapas: (i) emissão; (ii) transporte de aerossol; (iii) interação partícula-ar; (iv) evolução da viabilidade; (v) inalação e deposição de partículas no trato respiratório. A modelação deste processo requer que cada uma destas fases seja entendida em profundidade, além da conexão que elas têm entre si. Assim, conhecimentos da fisiologia do sistema respiratório humano, da bioquímica do trato respiratório, da microbiologia, da dinâmica de aerossóis, do escoamento em ambientes condicionados, entre outros, formam a base da presente modelação.

2. Transmissão aérea de doenças

Diversas doenças podem ser transmitidas através do ar, sendo o aparelho respiratório, a pele e as mucosas suas principais vias de acesso ao corpo humano. A grande área superficial dos pulmões, a ineficiência de seus mecanismos de limpeza e defesa e a fina membrana que separa o ar dos capilares sanguíneos fazem com que estes órgãos sejam a porta de entrada primária de organismos nocivos à saúde.

Face aos objetivos do estudo, é interessante conhecer a dinâmica do sistema respiratório durante a tosse e o espirro, principais produtores de aerossol contaminado. Resultado de uma perturbação nas vias superiores, a tosse inicia-se pela inspiração rápida de cerca de 2,5 litros de ar que são aprisionados no interior dos pulmões pelo fechamento espontâneo da epiglote, pressionando as cordas vocais e bloqueando a traquéia. Em seguida, a musculatura abdominal se contrai forçando o diafragma a comprimir os pulmões, os brônquios se obstruem e a traquéia se constrixe, elevando a pressão manométrica nos pulmões para cerca de 13,33 kPa. Por fim, as cordas vocais e a epiglote abrem-se abruptamente, promovendo o rápido fluxo do ar. Esta corrente de ar tende a carregar consigo qualquer material estranho dos brônquios e da traquéia para o esôfago, por onde é eliminado para o sistema digestivo, ou para o ambiente externo juntamente com o jato de ar. O espirro é fundamentalmente semelhante à tosse, mas a úvula não se abre completamente promovendo um

rápido escoamento de ar através da boca e do nariz, conforme registrado pela foto da Fig. (1). Uma vez dispersas no ar, estas gotículas passam a interagir com o ambiente e são transportadas por diversos mecanismos



Figura 1. Fotografia a alta velocidade do spray emitido pelo espirro.

Pelczar Jr. et al. (1993) destacam que este tipo de transmissão deve-se a três tipos de microorganismo: os vírus, os fungos e as bactérias. Entre as bacterianas, destacam-se as infecções provocadas pelo grupo *Streptococcus* (faringite, escalartina, pneumonia e psitacose) e pelas micobactérias (lepra e tuberculose). Em geral, a tuberculose humana pode atingir qualquer tecido do organismo, mas é mais comum nos sistemas linfático, ósseo, urogenital, nervoso e gastrointestinal, sendo os pulmões seu principal sítio de ocorrência (Top e Wehrle, 1976; Pelczar Jr. et al., 1981). Como doença bacteriana crônica de evolução lenta, a infecção primária pode passar despercebida ou ser confundida com outras doenças pulmonares até que um exame radiográfico revele as lesões que a caracterizam.

3. Problema objeto

Os componentes básicos da transmissão aérea de doenças são um hospedeiro que emite o aerossol contaminado, o ar através do qual as partículas viajam e um possível novo receptor. Com isto em mente e buscando reproduzir ambientes sob condicionamento ativo, o domínio computacional da Fig. (2) a seguir, com uma geometria bidimensional e entrada e saída forçadas de ar, será empregado no presente estudo.

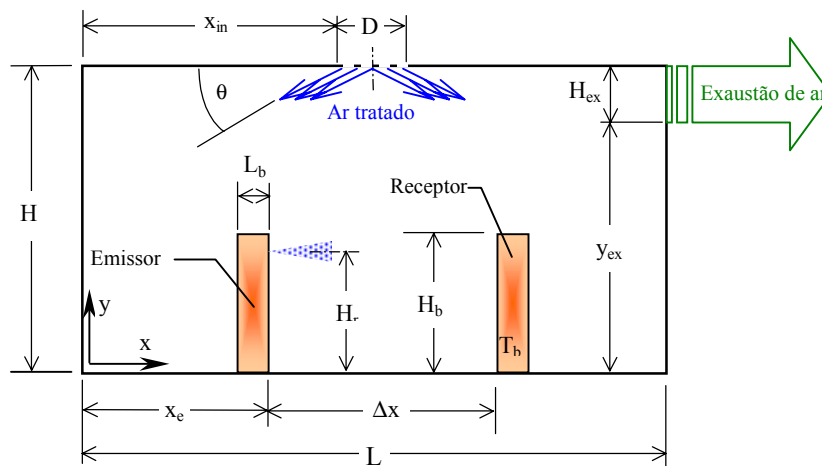


Figura 2. Geometria e domínio computacional do problema.

O ar tratado é insuflado através de uma seção com largura D (representando o difusor) localizada em $x = x_{in}$ e a exaustão é feita pela seção de altura H_{ex} localizada na parede direita a uma altura y_{ex} . Estas seções podem ser deslocadas e o jato de ar condicionado assumir várias direções θ para analisar alternativas de instalação. O doente emissor de aerossol e a possível nova vítima da doença (ou receptor) são representados de forma simplificada por regiões sólidas, impermeáveis e isotérmicas (referente à condição homeotérmica do corpo humano). Ambos são aproximados por blocos de dimensões (H_b e L_b) oriundas de dados antropométricos médios. A única fonte de aerossol localiza-se na altura H_r do bloco emissor posicionado segundo a coordenada x_e e o receptor funciona como um sumidouro quando as partículas depositam-se no trato respiratório. As fontes de calor no ambiente são os dois blocos isotérmicos aquecidos (T_b), que também liberam vapor d'água, e as paredes à temperatura T_w , sendo o teto e o assoalho admitidos adiabáticos.

4. Formulação do problema

4.1. Movimento e vaporização de partícula isolada

Dois parâmetros determinam a natureza como uma partícula se relaciona com o gás através do qual desloca-se: o número de Knudsen ($Kn = \delta / d_p$; $\delta =$ livre caminho médio das moléculas do gás e $d_p =$ diâmetro da partícula) e a fração de volume líquido (f_l) na mistura de fases. O primeiro estabelece o modo como o gás é percebido pelas partículas (contínuo ou molecular) e o segundo a interferência do aerossol sobre o escoamento gasoso e as perturbações entre partículas. Conforme detalhado em Duarte (2002), o aerossol respiratório apresenta tamanho de partícula mínimo ($d_p \geq 0,86 \mu m$, conforme Kowalski, Bahnfleth e Whitan, 1999) onde o gás pode ser tratado como contínuo. Tomando como referência os dados de Loudon e Roberts (1967; 1968), a fração líquida máxima observada no ponto de emissão é da ordem de $3,7 \times 10^{-5}$ para a tosse, $1,8 \times 10^{-6}$ para a fala e $1,14 \times 10^{-7}$ para o canto, admitindo que as gotículas foram produzidas durante 0,5; 90 e 100 segundos, respectivamente. De acordo com Faeth (1983) e Sirignano (1999), estes valores eliminam a necessidade de considerar a influência da partícula sobre o gás e entre partículas, simplificando bastante a análise.

Do ponto de vista termo-mássico, as biopartículas são sucessivamente expostas a variadas condições ambientais ao moverem-se em um recinto o que redundará em variadas taxas de transferência de calor e massa. Como estes processos são determinantes para a estabilidade da população microbiológica, a movimentação, a transferência de calor e a vaporização do líquido destas partículas estão intimamente relacionadas ao risco de infecção. Eles precisam ser adequadamente formulados para que o modelo possa apresentar resultados físicos e biologicamente consistentes.

4.1.1. Dinâmica das partículas

Mecanismos de diferentes naturezas atuam sobre uma partícula que se move em um meio fluido. Alguns deles originam-se pela presença de um campo atuando sobre a massa da partícula (gravitacional e eletromagnética, por exemplo), outros derivam de seu próprio movimento (arrasto, inércia do fluido deslocado, diferencial de pressão, entre outras) e há ainda as resultantes da interação com outras partículas (impactação, interceptação, repulsão e atração eletromagnéticas, etc). Efeitos de cunho estocástico como a termoforese, a fotoforese e a difusão Browniana (Fuchs, 1964; Davies, 1966) podem ser importantes na dispersão de partículas submicrométricas.

Propõe-se uma conservação da quantidade de movimento da partícula onde a inércia, o arrasto aerodinâmico e a gravidade são os agentes dinâmicos dominantes (Duarte, 2001). Assim, esta equação é escrita como

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \frac{3}{4} \frac{\rho}{d_p \rho_p} \frac{C_D}{C_n} \left\| \vec{U} - \vec{u}_p \right\| (\vec{U} - \vec{u}_p) + \vec{g} \quad (1)$$

onde u_p , U , ρ , ρ_p e g simbolizam a velocidade média da partícula, a velocidade média do escoamento turbulento, a massa específica do gás e da partícula e a aceleração da gravidade, respectivamente. Os parâmetros C_D e C_n são o coeficiente de arrasto sobre uma esfera e o fator de Cunningham respectivamente avaliados pelas expressões

$$C_D = 0,4 + \frac{24}{Re_p} + \frac{6}{1 + Re_p^{1/2}} \quad e \quad C_n = 1 + Kn \left[2,34 + 1,05 \exp\left(\frac{-0,39}{Kn}\right) \right] \quad (2)$$

com $Re_p = \rho u_r d_p / \mu$, μ representando a viscosidade do gás e u_r a magnitude da velocidade média relativa entre as fases.

4.1.2. Interação termo-mássica com o ar

Se comparado a situações onde ocorre combustão de gotas líquidas, o transporte de vapor e calor das gotículas respiratórias é um fenômeno bem mais simples de ser modelado. Aqui não estão presentes complicações como condições ambientes próximas ao ponto crítico do material atomizado, composição química complexa, altas taxas de transferência de calor e massa, grande concentração de partículas no ar, dentre outras. Esta condição simplifica bastante a tarefa de prever, por exemplo, o comportamento de gotículas de água dispersas no ar.

Depois de analisar os diversos tipos de modelo e estabelecer as simplificações e hipóteses adequadas aos objetivos do atual estudo (Duarte, 2002), foi formalizado um modelo para a interação entre as partículas e o ar úmido. Nele, admite-se que uma partícula esférica representa as gotículas em contato com o ar e que as transferências de calor e massa são simétricas em relação ao centro desta partícula. Na Fig. (3), T representa temperatura absoluta (K), Y a fração mássica do vapor d'água na mistura gasosa (kg_v/kg_{mist}) e os subíndices p , s e ∞ denotam propriedades da partícula como um todo, de sua superfície e do gás, respectivamente.

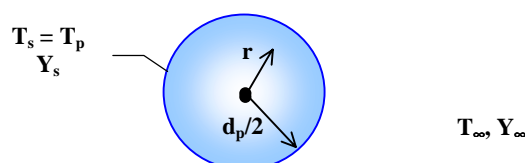


Figura 3. Partícula líquida interagindo com atmosfera gasosa.

Assumindo que as condições do ambiente são constantes nos intervalos de tempo do processo quase-estático de transporte de energia térmica e vapor, a taxa com que vapor é perdido ou ganho pela gotícula é calculada pela Eq. (3), onde D_v é a difusividade mássica do vapor no ar e $Sc = \mu/(\rho D_v)$.

$$\dot{m} = 2\pi d_p \rho D_v \left[1 + \frac{0,278 Re_p^{1/2} Sc^{1/3}}{[1 + 1,232(Re_p Sc)^{-4/3}]^{1/2}} \right] \ln \left(\frac{1 - Y_\infty}{1 - Y_s} \right) \quad (3)$$

O equilíbrio de fases na superfície da gotícula é formulado pela equação de Clausius-Clapeyron expressa por

$$X_s = \exp \left[\frac{H_l}{R} \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_s} \right) \right] / P \quad (4)$$

H_l representa o calor latente de vaporização da água, R , a constante universal dos gases, T_b , a temperatura de ebulição do líquido à pressão total do ambiente P . A fração mássica (Y) relaciona-se com a fração molar (X) do vapor de acordo com a expressão $Y = XW_v / (XW_v + X_aW_a)$, com $X_a = 1 - X$, W_v e W_a denotando os pesos moleculares da água e do ar seco, respectivamente.

A formulação simétrica de partícula quase-estática também foi utilizada na avaliação do fluxo convectivo total de calor entre a partícula e o ar úmido, produzindo a expressão

$$\dot{q} = \left[1 + \frac{0,278 Re_p^{1/2} Pr^{1/3}}{[1 + 1,232(Re_p Pr)^{-4/3}]^{1/2}} \right] \left[\exp \left(\frac{\dot{m} c_g}{2\pi d_p \lambda} \right) - 1 \right]^{-1} \left(\frac{\dot{m} c_g}{\pi d_p^2} \right) (T_\infty - T_p) \quad (5)$$

Restam ainda duas equações para complementar a formulação da gotícula: uma para a temperatura e outra para o diâmetro. Um balanço de energia na superfície da gota, onde o calor total trocado com o ar é responsável tanto pelo aquecimento (ou resfriamento) sensível da partícula como pela mudança de fase, produz a seguinte relação para T_p :

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{6}{\rho_p c_g} \left(\frac{\dot{q}_p}{d_p} - \frac{1}{\pi} \frac{\dot{m} H_l}{d_p^3} \right) \quad (6)$$

Como $m_p = \rho_p \pi d_p^3 / 6$ e admitindo ρ_p constante, o fechamento do modelo da gotícula isolada é conseguido derivando-se ambos os membros em relação ao tempo e desenvolvendo-se a expressão até obter a igualdade

$$\frac{d(d_p)}{dt} = \frac{2}{\pi} \frac{\dot{m}}{\rho_p d_p^2} \quad (7)$$

A Eq. (7) prevê a evolução do tamanho da partícula até que toda a umidade se exaure, quando a partícula passa a ser denominada de núcleo de gotícula. Para formular o tamanho final da partícula (d_{ng}), considerou-se que seu volume inicial é composto de água, material sólido dissolvido (cerca de 6% no fluido respiratório) e microorganismos. O volume microbiológico é várias ordens de grandeza menor que o dos outros materiais da gotícula e, desta forma, pode ser desconsiderado na análise que, após alguns desenvolvimentos, produz a expressão:

$$\frac{d_{ng}}{d_{p0}} = \left(\frac{Z_{s0}}{Z_{s0} + (\rho_s / \rho_w) Z_{w0}} \right)^{1/3} \quad (8)$$

com Z denotando a fração mássica na gotícula, ρ a massa específica e os subíndices 0, s e w parâmetros relativos ao início da interação da gotícula com o ar, ao material sólido e à água contidos na partícula, respectivamente.

Alcançado este limite, a partícula não mais altera seu tamanho e a única modificação que sofre está relacionada à quantidade de micróbios viáveis, conforme descrição posterior. Nenhum núcleo de gotícula poderá ser menor que o diâmetro equivalente de um microorganismo, ou seja, $d_{ng} \geq 0,86 \mu\text{m}$ (Kowalski et al., 1999).

4.2. Convecção em ambientes ocupados

As características mais proeminentes do escoamento em interiores são a ocorrência de jatos tridimensionais turbulentos (próximos aos terminais de descarga de ar); os diferentes regimes de escoamento; a existência de barreiras, partições e outros anteparos sólidos internos; as regiões de forte recirculação; e as correntes de convecção natural. De uma forma geral, a estrutura do movimento turbulento favorece o transporte das quantidades escalares e vetoriais, justificando a necessidade de se conhecer em detalhe esta estrutura.

Na análise de problemas que envolvem a qualidade do ar e mais particularmente com o transporte de aerossóis, a temperatura, a umidade relativa, a velocidade e nível de turbulência do ar são variáveis importantes na determinação do nível de contaminação do ambiente. O escoamento exerce forte influência sobre estes parâmetros e, desta forma,

deve ser formulado o mais adequadamente possível, buscando reproduzir localmente todos os fenômenos do ambiente real. Pode-se afirmar que o escoamento é o alicerce para se conhecer a dinâmica das gotículas.

Com esta preocupação em mente, uma extensa bibliografia sobre a fenomenologia e a modelação de escoamentos em interiores foi estudada envolvendo desde a modelação da turbulência até as características que um código de análise computacional deve apresentar para reproduzir esta categoria de escoamento. Os resultados desta análise foram recentemente apresentados (Duarte, 2002) e sua conclusão mais importante indica que o modelo $k-\epsilon$ de grupos renormalizados é o mais adequado para o escoamento em ambientes internos.

4.3. Modelo $k-\epsilon$ de grupos renormalizados (RNG $k-\epsilon$)

O modelo $k-\epsilon$ de renormalização produz equações de transporte para a energia cinética turbulenta (k) e para sua dissipação (ϵ) e deduz matematicamente o valor de constantes empregadas pelo modelo. De acordo com testes realizados (Fluent, 1995), é aplicável a escoamentos onde ocorrem separação e recirculação; geometrias curvas e efeitos relacionados a altos gradientes de velocidade do escoamento médio; transferência de calor em fluidos com baixo número de Prandtl; escoamentos a baixo número de Reynolds e transicionais; escoamentos secundário e rotacional e domínios onde coexistem escoamentos laminar e turbulento, característica do escoamento em interiores.

Designando a equação de transporte para uma propriedade genérica ϕ por

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi \quad (9)$$

o modelo RNG $k-\epsilon$ e o conjunto de equações do escoamento médio do gás (continuidade e quantidade de movimento), da energia e da concentração de vapor d'água são resumidas na Tab. (1).

Tabela 1. Especificação de parâmetros da equação genérica para o modelo RNG $k-\epsilon$.

Item	Conservação	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
1	Massa da Mistura	1	0	0
2	Quantidade de Movimento	U_i	μ_{ef}	$-\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_{ef} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_i$
3	Massa de Vapor D'água	Y	$\alpha_Y \mu_{ef}$	0
4	Energia	T	$\alpha_T c_g \mu_{ef}$	0
5	Energia Cinética Turbulenta	k	$\alpha_k \mu_{ef}$	$\mu_t S^2 - \rho \epsilon + G_b^k$
6	Dissipação Turbulenta	ϵ	$\alpha_\epsilon \mu_{ef}$	$C_{\epsilon 1} \epsilon \mu_t S^2 / k - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon^2 / k - R + G_b^\epsilon$

A viscosidade efetiva (μ_{ef}) é calculada com base na equação

$$\mu_{ef} = \mu \left[1 + \sqrt{\frac{C_\mu}{\mu}} \frac{k}{\sqrt{\epsilon}} \right]^2 \quad (10)$$

onde $\mu_{ef} = \mu + \mu_t$, sendo μ a viscosidade molecular, μ_t a viscosidade turbulenta e as constantes $C_\mu (= 0,0845)$, $C_{\epsilon 1} (= 1,42)$ e $C_{\epsilon 2} (= 1,68)$ derivadas matematicamente.

O inverso dos números de Prandtl turbulento (α) mássico, térmico, para k e para ϵ nos itens 3, 4, 5 e 6 da Tab. (1), respectivamente, são determinados localmente a partir da Eq. (11) também de origem matemática, onde $\alpha_0 = 1,0$ para k e ϵ , $1/Pr = \mu c_g / \lambda$ para T, com λ denotando a condutividade térmica do gás, e $1/Sc = \mu / \rho D_v$ para Y.

$$\left| \frac{\alpha - 1,3929}{\alpha_0 - 1,3929} \right|^{0,6321} \left| \frac{\alpha + 2,3929}{\alpha_0 + 2,3929} \right|^{0,3679} = \frac{\mu}{\mu_{ef}} \quad (11)$$

O termo S^2 é o quadrado do módulo do tensor taxa de deformação do escoamento médio, enquanto que R constitui a principal diferença em relação ao modelo $k-\epsilon$ padrão. Com $\eta \equiv Sk/\epsilon$, $\eta_0 \equiv 4,38$ e $\beta' = 0,012$, estas parcelas são computadas de acordo das seguintes expressões:

$$S^2 = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right]^2 \quad e \quad R = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \epsilon^2}{1 + \beta' \eta^3} \frac{1}{k} \quad (12)$$

Se a flutuação térmica for considerada, termos adicionais (G_b^k e G_b^ϵ) são acrescentados ao segundo membro das equa-

ções de k e ε com o intuito de capturar seu efeito sobre a turbulência. Denotando o coeficiente de dilatação térmica do ar por β , estes termos são escritos na forma:

$$G_b^k = \beta g_j \alpha_T \mu_t \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad e \quad G_b^\varepsilon = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (1 - C_{\varepsilon 3}) G_b^k \quad (13)$$

onde $C_{\varepsilon 3}$ tem valor padrão igual a 0,2.

5. Características do aerossol respiratório

5.1. Composição e principais propriedades

Para avaliar a disseminação do bioaerossol no ambiente, é preciso conhecer o material que constitui as gotículas, bem como qualificar o ar expulso com as mesmas. A saliva e o muco traqueobrônquico são sem dúvida os dois grandes meios utilizados pelos microorganismos respiratórios para completar o ciclo de transmissão de doenças por via aérea. Conforme revisão realizada em Duarte (2002), a composição do material respiratório é extremamente variável e depende, dentre outros parâmetros, de sua origem no interior do aparelho respiratório e da rota que segue até sair do corpo. Se a corrente de ar for liberada pela boca, por exemplo, a saliva provavelmente estará mais presente nas gotículas do que quando a descarga ocorrer pelas vias nasais. Zeterberg (1973) confirma esta impressão ao relatar que as partículas produzidas por um espirro são constituídas em sua maior parte de saliva, enquanto as da tosse provêm de pontos mais profundos da árvore traqueobrônquica e são geralmente mais infectivas.

Como o muco traqueobrônquico (constituído basicamente de água, macromoléculas e íons de potássio e cálcio) e a saliva (mistura de água, aminoácidos, proteínas, lipídios, carboidratos e compostos inorgânicos) apresentam composições distintas, a definição da composição do aerossol torna-se ainda mais difícil. Como estimativa inicial, admitir-se-á os dados de Cole e Eastoe (1989) como representativos das partículas do aerossol infectado. Desta forma, para uma temperatura corpórea de 37 °C, a densidade relativa ($\rho_p/\rho_{\text{água}}$) deste fluido vale entre 1,002 e 1,008, a viscosidade relativa ($\mu_p/\mu_{\text{água}}$) varia de 1,3 a 11,0 e a fração mássica de água do fluido respiratório é igual a 0,96.

Em relação ao ar expirado, sua composição química e propriedades são um reflexo do ar que é inalado e das alterações que sofre no sistema respiratório. Diversos gases (N_2 , He, etc) praticamente não têm participação nas reações e trocas gasosas que ocorrem durante a respiração e suas concentrações mantêm-se aproximadamente constantes durante este processo (Zin e Rocco, 1999; Kroemer et al., 1997). Segundo estes autores, as principais modificações na composição padrão são a redução na quantidade de oxigênio, o aumento do teor de dióxido de carbono e de vapor d'água a cada ciclo respiratório. Para uma temperatura corpórea normal (37 °C), o ar atinge a saturação ainda na região nasofaríngea ($P_v = 6,266$ kPa), pois $P_{\text{sat}}(37 \text{ °C}) = 6,28$ kPa (ASHRAE, 1997).

5.2. Condição inicial

Além da composição e do estado termodinâmico, é preciso especificar outras características do aerossol no ato da emissão, dentre as quais as variáveis dinâmicas, a distribuição de tamanho e a população microbiológica iniciais são as mais importantes. No primeiro grupo, a velocidade do ar e das partículas, a orientação do jato, a altura de descarga e a fração de líquido são necessárias para a modelação e servirão como condição de contorno futuramente.

Em trabalho recente, Qian et al. (1997) testaram a capacidade de retenção de partículas biológicas (*Bacillus subtilis*, com características semelhantes ao bacilo tuberculoso) e não biológicas (Cloreto de sódio e látex de poliestireno) em respiradores com alta performance de filtragem. Avaliando a reatomização de partículas já coletadas pelo respirador, o elemento filtrante previamente carregado com material particulado de diversos tamanhos ($< 1 \mu\text{m}$) foi submetido a escoamentos de ar em direção oposta ao de carga. Para simular o escoamento correspondente a um espirro ou tosse violentas, foi admitida uma velocidade média de descarga através da boca de 3,0 m/s. De fato, este dado de velocidade é o mais confiável entre todas as referências e será admitido no presente trabalho.

No que se refere à velocidade da partícula e não da corrente de ar, apenas Li et al. (1998) avaliaram este aspecto ao avaliar computacionalmente a deposição de partículas no interior da árvore respiratória. Seus resultados mostram que a velocidade das partículas na expiração depende entre outros fatores da taxa ventilatória pulmonar, do tamanho da partícula e da velocidade da corrente de ar. Face a estes resultados e como o aerossol respiratório apresenta larga faixa de tamanho de partícula, preferiu-se admitir que partículas e ar são emitidas em equilíbrio mecânico, ou seja, a uma mesma velocidade, sendo os dados de Qian et al. (1997) empregados com este fim.

De forma geral, a orientação do jato de partículas contaminadas depende fundamentalmente da anatomia do emissor e do cuidado que este venha a ter em desviar ou minimizar esta emissão. Para o presente propósito, considerar-se-á a situação mais crítica quando nenhum cuidado é observado e a descarga se procede como na Fig. (1). Assim, admite-se que o jato ocorre em uma direção ortogonal ao eixo do corpo identificado pela coluna vertebral. O ponto de emissão (identificado pela altura da boca ou do nariz), por sua vez, é definido a partir de dados antropométricos obtidos em literatura especializada (Kroemer et al., 1997)

A fração de líquido (f_l) do bioaerossol na mistura ar-aerossol foi estimada considerando-se o volume de ar expelido pelos pulmões e o volume total de líquido estimado em função das distribuições de tamanho das partículas descritas em Loudon e Roberts (1967) para tosse e fala e em Loudon e Roberts (1968) para o canto. Ilustradas na Fig. (4), estas distribuições também possibilitam uma avaliação da fração de líquido (f_l^k), bem como da vazão mássica de líquido asso-

ciada a cada classe de tamanho k do aerossol.

A estimativa da quantidade de microorganismos viáveis contidos em cada partícula do aerossol é tarefa complexa que envolve característica do doente emissor e do próprio microorganismo. Se a doença ainda não se encontra em estado avançado, por exemplo, a população microbiológica que habita as vias aéreas ainda é pequena o que implica em uma baixa concentração de microorganismos no muco e em menor população por gotícula. Do lado microbiológico, o tamanho do microorganismo é fundamental para se definir a população contida em uma gotícula de um determinado volume. A informação mais contundente sobre a quantidade de bacilos tuberculosos contida nas gotículas emitidas por indivíduo doente foi apresentada por Schafer et al. (1998). Com base em vasta revisão bibliográfica, eles afirmam categoricamente desconhecer qualquer trabalho que tenha feito medições diretas da concentração de bacilos da tuberculose em aerossóis.

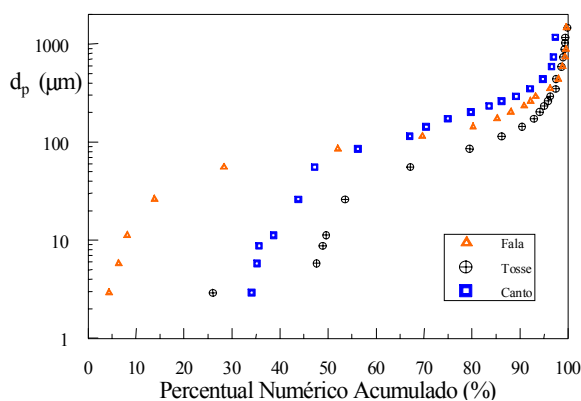


Figura 4. Distribuição cumulativa de tamanho de partículas emitidas pela fala, tosse e canto.

Sabe-se, no entanto, que a quantidade de microorganismos por gotícula ($N_{0,p}$) é diretamente proporcional à concentração média de microorganismos (\bar{c}_r em número por volume) no fluido que origina o aerossol e ao volume da partícula que os contém (V_p). Lighthart e Kim (1989) propuseram que $N_{0,p}$ fosse estimada de forma bastante simples através da igualdade

$$N_{0,p} = V_p \cdot \bar{c}_r \tag{14}$$

Das poucas obras encontradas sobre a concentração média \bar{c}_r , Sepkowitz (1996) apresenta alguns valores para a tuberculose pulmonar devida à *M. tuberculosis*, onde a concentração de microorganismos foi relacionada ao resultado do exame microscópico de lâmina com escarro. Pelo trabalho, exames com resultado positivo implicam em cerca de 10^6 a 10^7 bacilos por mililitro de escarro, enquanto que uma concentração menor que 10^3 bacilos por mililitro de escarro é associada ao muco com resultado negativo.

6. Aspectos da *Mycobacterium tuberculosis*

6.1. Geometria

De acordo com Kowalski et al. (1999), a maioria dos micróbios apresenta formato ovóide e pode ser aproximada por esferas descritas dimensionalmente apenas por seu diâmetro. Há, no entanto, aqueles que se apresentam com formato de bastonete ou haste com grande razão de aspecto ($\ell_m/d_m \sim 10:1$). As micobactérias, dentre elas a *M. tuberculosis* exibida na Fig. (5), estão incluídas nesta categoria dos bastonetes e um diâmetro representativo de seu tamanho deve levar em conta este formato. De uma forma geral, elas se apresentam sob a forma de cilindros finos, retos ou ligeiramente encurvados, com diâmetro (d_m) que varia entre 0,3 a 0,6 μm e comprimento (ℓ_m) entre 0,5 e 4,0 μm , podendo ocorrer em grupo ou isoladamente e exibir ramificações e formas filamentosas (Pelczar Jr. et al., 1981).

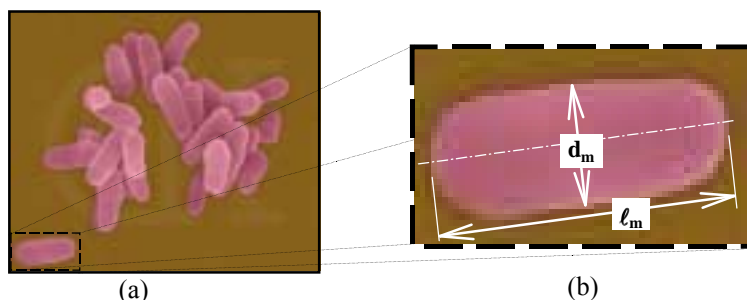


Figura 5. (a) Bacilos da *M. tuberculosis* vistos em microscópio eletrônico (4000x) e (b) suas principais dimensões.

6.2. Sensibilidade a fatores ambientais

Na microbiologia, um organismo viável é aquele capaz de viver, crescer e se desenvolver, ou seja, de formar colônia (Pelczar Jr. et al., 1993). Cole e Cook (1998) observam que um microorganismo pode ser considerado inviável se não conseguir se reproduzir, mesmo se individualmente ainda estiver vivo.

Mohr (1991) apresenta uma revisão bastante interessante sobre os fatores que influenciam esta propriedade dos microorganismos na forma de aerossol. O autor argumenta que a viabilidade dos microorganismos pode ser afetada pelos seguintes fatores: (i) Propriedades físicas e limitações do aerossol; (ii) Condições ambientais às quais o aerossol é exposto; e (iii) Constituição biológica do microorganismo. Em relação a este último, o autor observa que os vírus com alto conteúdo de lipídios apresentam maior resistência a baixas umidades relativas e descreve em detalhes a bioquímica do processo de perda de viabilidade da *Escherichia coli* cuja composição se assemelha a da *M. tuberculosis*. Dentre as variáveis ambientais, a temperatura, a umidade relativa e as radiações eletromagnéticas são citadas como mais importantes no decaimento da população viável. São lembrados ainda o pH, a presença de oxigênio e seus radicais livres e a renovação com ar externo ao ambiente. Na atual análise, somente a temperatura e a umidade relativa foram consideradas que juntamente à idade do aerossol determinam o percentual viável do total emitido.

Ao deixar o corpo humano onde encontra boas condições para manter-se viável, a *M. tuberculosis* tende a perder viabilidade já na geração do aerossol e, uma vez disperso no ar, esta perda cresce à medida que o tempo passa (Cole e Cook, 1998). Dependendo principalmente da composição do ar, da umidade relativa, da temperatura e da presença de radiação ultravioleta germicida, a taxa de mortalidade pode ser tão alta que o problema praticamente deixa de existir em curto espaço de tempo. Para as temperaturas e umidade relativas normalmente encontradas em interiores, no entanto, uma parcela significativa dos bacilos emitidos pode permanecer viável durante longos períodos de tempo. Como exemplo, pode-se citar Loudon et al. (1969) que relataram uma viabilidade de 50% seis horas após a emissão do aerossol mesmo em ambiente com baixa umidade relativa.

6.3. Evolução da viabilidade

De acordo com Mohr (1991), a viabilidade relativa é quantitativamente medida pela razão entre o número de microorganismos viáveis em um determinado instante após a emissão do aerossol e o total de microorganismos vivos no momento da emissão. A obtenção de relações empíricas entre esta variável e as variáveis que a controlam configura um campo ainda pouco explorado e de complicada execução. As dificuldades de ordem experimental se aliam à complexidade do problema, visto que a perda de viabilidade de microorganismos em aerossóis resulta de uma combinação de efeitos físicos, ambientais e celulares, podendo ser esta uma explicação para a escassez de relações matemáticas para esta variável. Não obstante estas observações, foram encontradas equações para alguns microorganismos em ambientes externo e interno. Nenhum deles, no entanto, tratou do microorganismo em estudo e a falta de uma equação para a *M. tuberculosis* é uma informação que deve ainda ser suprida.

O modelo de decaimento exponencial baseia-se no comportamento de um grupo de microorganismos quando submetido a um agente agressor (físico, químico ou outro qualquer) que tende a reduzir sua viabilidade. A taxa de aniquilação de microorganismos será tanto maior quanto maior for a quantidade de unidades microbiológicas expostas à agressão (Pelczar Jr. et al., 1993). Desta forma, conforme a população viável se reduz, menor será a intensidade de desativação microbiológica. Esta relação é reproduzida por uma curva exponencial entre a viabilidade e o tempo de exposição. A sua forma mais simples é escrita a seguir, onde N_t é a viabilidade em um instante de tempo t (s), N_0 a viabilidade inicial e K a função de decaimento da população.

$$N_t = N_0 \cdot \exp(-K \cdot t/60) \quad (15)$$

Conforme discussão anterior, os microorganismos dispersos no ar ambiente estão susceptíveis a diversos fatores que tendem a reduzir ou eliminar sua capacidade reprodutora. Buscando uma função de decaimento que refletisse esta dependência, Lighthart e Mohr (1987) e Lighthart e Kim (1989) propuseram uma função de decaimento que depende do tempo e de algumas variáveis ambientais. A expressão adotada no segundo trabalho e reproduzida abaixo considera o efeito combinado da temperatura, da umidade relativa e da idade do aerossol sobre a viabilidade da *E. coli*.

$$\log_{10}[K(t, T, \phi)] = -0,22844 - 0,919497 \cdot \log_{10}[t(s)/60] + 0,00997 \cdot [T(K) - 273,15] - 0,0056 \cdot \phi(\%) \quad (16)$$

Com base no histórico da viabilidade de uma gotícula, é possível se estimar quantos microorganismos ainda permanecem viáveis. A Eq. (15) definirá a viabilidade da *M. tuberculosis*, apesar dos microorganismos típicos de meio aquoso (como a *E. coli*) invariavelmente apresentarem resistência bem menor à desativação que aqueles transportados pelo ar (Jawetz et al., 1968).

7. Inalação e deposição de partículas no trato respiratório

Para penetrar profundamente na árvore respiratória, uma partícula precisa inicialmente ser capturada pela corrente de ar durante o processo de inspiração. Tendo em vista a baixa velocidade da corrente de ar durante a inspiração normal, cerca de 1,0 a 1,25 m/s para jato nasal com 1 cm² de seção transversal e entre 0,3 e 0,42 m/s para boca com 3 cm², nem toda a partícula que chega à região naso-bucal do receptor adentrará seu sistema respiratório. A partir de um certo tamanho, o arrasto aerodinâmico passa a não ser suficiente para vencer a inércia da partícula que invariavelmente

desloca-se paralelamente à superfície do corpo. Assim, seguindo recomendação de Lippmann (1976), toda partícula com diâmetro maior ou igual a 50 µm não é considerada para efeito do processo de transmissão da tuberculose.

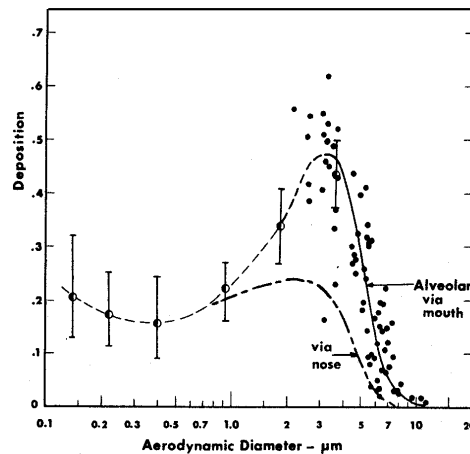


Figura 6. Deposição alveolar em função do tamanho da partícula e da trajetória de inalação [Fonte: Lippman, 1976].

Após inspirada, a gotícula infectada precisa ainda vencer os mecanismos de defesa que buscam capturá-la ainda nas regiões superiores do trato. Uma estimativa bastante razoável da quantidade de partículas que alcançam os pulmões pode ser levantada pelas curvas de deposição. Nelas, o percentual de deposição (ϕ) das partículas inspiradas pelo nariz ou pela boca e sua dependência em relação ao diâmetro aerodinâmico da partícula (ou diâmetro geométrico para $d_p \leq 0,5 \mu\text{m}$) são exibidos como na Fig. (6) para a região alveolar. Nota-se que há uma sensível diferença entre as inalações bucal e nasal, sendo esta última mais eficiente na remoção de partículas estranhas inspiradas. Apesar do experimento ter sido conduzido com material abiótico, a previsão da deposição alveolar de partículas contaminadas pelo bacilo da tuberculose será feita com base nesta curva.

8. Estimativa do risco de infecção

Buscando subsidiar a formalização de um índice de risco de adquirir a tuberculose, foram levantadas algumas referências sobre o assunto. Os trabalhos normalmente discorrem sobre os fatores ambientais, os grupos mais atingidos e os aspectos gerais do risco dos poluentes biológicos sobre os ocupantes de interiores e ambientes externos. Merece destaque o trabalho de Nicas (2000) que propõe uma equação para avaliar o risco biológico e direciona seu esforço para o principal agente da tuberculose. O autor atribui o risco de infecção (R_{tb}) ao número de bacilos viáveis inalados e depositados na região pulmonar de um indivíduo susceptível (D_{tb}). Sabe-se que a dose microbiológica depositada está diretamente relacionada ao tempo de exposição à atmosfera contaminada (Δt_{exp}), ao volume de ar inalado ($Q_{in} \cdot \Delta t_{exp}$), à concentração de partículas contaminadas arrastadas pelo ar, à fração depositada no trato respiratório ou eficiência de deposição [$\phi = \phi(d_p)$] e à viabilidade de cada partícula (também função de d_p). Nicas (2000) simplifica bastante a estimativa de D_{tb} ao assumir que apenas a concentração de microorganismos no ar é dependente do tempo. O autor admite ainda o aerossol como monodisperso e composto do próprio bacilo (ao invés de partículas), propriedades homogêneas do ar em torno do emissor e decaimento da viabilidade nulo.

Corrigindo algumas destas deficiências, propõe-se aqui que D_{tb} seja calculada de forma mais exata para um aerossol com N classes de tamanho pela integração no tempo do somatório das quantidades de microorganismos depositados por cada classe k em intervalos infinitesimais dt. Integrando o somatório das deposições infinitesimais da classe k (dD_{tb}^k) durante dt, chega-se a seguinte expressão para a dose microbiológica acumulada nos pulmões durante um período de exposição Δt_{exp} :

$$D_{tb} = \int \sum_{k=1}^N dD_{tb}^k = \int_{t_0}^{t_f} \sum_{k=1}^N \underbrace{[f_1^k(H_r, t) Q_{in}]}_{\text{Vazão de partículas da classe k}} \times \underbrace{\left(\frac{N_t}{N_0} \bar{c}_r \right)}_{\text{Fração viável}} \times \underbrace{[\phi(d_p^k)]}_{\text{Percentual depositado}} dt = Q_{in} \cdot \bar{c}_r \sum_{k=1}^N \left[\int_{t_0}^{t_f} f_{1,r}^k \exp(-Kt/60) dt \right] \quad (17)$$

onde $t_f = t_0 + \Delta t_{exp}$ é o instante final do contato com o ar biologicamente poluído, $f_1^k(H_r, t)$ e $f_{1,r}^k$ representam a fração de líquido das partículas da classe k na posição de inalação H_r , Q_{in} a vazão volumétrica da mistura ar-aerossol admitida constante (6 a 7,5 litros/min), N_t/N_0 a fração de bacilos viáveis, \bar{c}_r a concentração de microorganismos no fluido respiratório e $\phi(d_p^k)$ a eficiência de deposição pulmonar das partículas da k-ésima classe do aerossol.

Nicas (2000) propõe que o risco de infecção seja calculado pela expressão exponencial

$$R_{tb} = 1 - \exp(-D_{tb}) \quad (18)$$

ou por $R_{tb} \equiv D_{tb}$ quando $D_{tb} \leq 0,5$. Com bastante propriedade, a Eq. (18) prevê risco nulo para absorção nula de bacilos e máximo ($= 1$) quando a dose de bacilo depositado cresce. Uma possível razão para a escolha do perfil exponencial advém da relação que a taxa de crescimento de uma população microbiológica mantém com a quantidade de micróbios desta população, conforme raciocínio apresentado para a taxa de decaimento da viabilidade. Em condições propícias, cada microorganismo tem a capacidade de gerar um outro que em conjunto geram quatro novos seres e assim por diante para cada membro da população considerada.

Como a equação para D_{tb} pode produzir valores fracionários e não há sentido em usar tais valores para se referir ao número de bacilos viáveis, será adotado um arredondamento destes valores. Como a estimativa da população foi feita com base no volume de líquido inalado e na concentração média de bacilo no fluido respiratório, os volumes mínimo e médio de um bacilo tuberculoso e a parcela decimal de D_{tb} serão usados para avaliar se o arredondamento será para o inteiro maior ou menor que D_{tb} . Se o produto entre a parte decimal de D_{tb} e o volume médio do bacilo for menor que seu volume mínimo, D_{tb} será igualada ao inteiro menor mais próximo, caso contrário será utilizado o valor inteiro imediatamente superior. Em função deste arredondamento, a relação linear do risco proposta por Nicas (2000) quando $D_{tb} \leq 0,5$ não será admitida aqui.

9. Conclusões

O presente trabalho discute os principais fenômenos envolvidos na transmissão de doenças por meio de bioaerossóis infectados microbiologicamente em ambientes condicionados e propõe um modelo para avaliar teoricamente o problema. A modelação sugerida aborda os diversos processos envolvidos, tratando desde a emissão de partículas respiratórias até as modificações físicas, constitutivas e biológicas que estas sofrem antes de sua inalação e deposição no trato respiratório. Por fim, são propostas equações para o risco de transmissão da tuberculose em função da dose microbiológica acumulada durante o período de exposição à atmosfera contaminada.

Entre outros resultados, o modelo será capaz de fornecer uma série de informações sobre a evolução da contaminação e do risco de infecção. Dentre os campos e dados mais significativos para esta análise, destacam-se: i) a viabilidade dos microorganismos de forma global em todo o aerossol e parcial para cada classe de tamanho; ii) a concentração de bacilos viáveis; iii) o índice de risco para diferentes intervalos de exposição (Δt_{exp}); iv) o índice R_{tb} em função da frequência de emissão de aerossol; e v) a influência dos parâmetros geométricos e de funcionamento do sistema de condicionamento sobre a dinâmica do problema.

10. Referências

- ASHRAE, 1997, "ASHRAE Handbook – 1997 Fundamentals (SI)", ASHRAE, 922 p.
- Bayer, C. W. e Black, M. S., 1988, "IAQ evaluations of three office buildings", ASHRAE J., Vol. 30, No. 7, pp. 48-53.
- Burge, H. A., 1995, "Bioaerosols", Lewis Publishers, Boca Raton, USA, 318 p.
- Burton, D. J., 1990, "Maintenance of indoor air quality: a major concern for the 1990s", Occup. Health Saf., Vol. 59, No. 6, pp. 61.
- Cole, E. C. e Cook, C. E., 1998, "Characterization of infectious aerosols in health care facilities: an aid to effective engineering controls and preventive strategies", Am. J. Infect. Control, Vol. 26, No. 4, pp. 453-464.
- Cole, A. S. e Eastoe, J. E., 1989, "Biochemistry and oral biology", 2nd Ed., Reed Educational and Professional Publishing Ltd, Oxford, UK, 555 p.
- Davies, C. N., 1966, "Aerosol science", Academic Press Inc., London, UK, 468 p.
- Duarte, R. N. C., 2002, "Dispersão de aerossóis humanos contaminados em interiores", Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC (Em desenvolvimento)
- Faeth, G. M., 1983, "Evaporation and combustion of sprays", Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 9, pp. 1-76.
- Fluent, 1995, "FLUENT user's guide", Version 4.3, Fluent Incorporated, Lebanon/NH, USA.
- Fuchs, N. A., 1964, "The mechanics of aerosols", Translation by R. E. Daisley and M. Fuchs, Dover Publications, New York, USA.
- Jawetz, E.; Melnick, J. L. e Adelberg, E. A., 1968, "Microbiologia médica", Guanabara Koogan, Rio de Janeiro, Brasil, 534 p.
- Kowalski, W. J.; Bahnfleth, W. P. e Whittam, T. S., 1999, "Filtration of airborne microorganisms: modeling and prediction", ASHRAE Trans., Vol. 105, Pt. 2, pp. 4-17.
- Kroemer, K. H. E.; Kroemer, H. J. e Kroemer-Elbert, K. E., 1997, "Engineering physiology: bases of human factors/ergonomics", 3rd Ed., Van Nostrand Reinhold, New York, 317 p.
- Li, Wen-I. et al., 1998, "The macrotransport properties of aerosol particles in the human oral-pharyngeal region", J. Aerosol Sci., Vol. 29, No. 8, pp. 995-1010.
- Lighthart, B. e Kim, J., 1989, "Simulation of airborne microbial droplet transport", App. Env. Microbiology, Vol. 55, No. 9, pp. 2349-2355.
- Lighthart, B. e Mohr, A. J., 1987, "Estimating downwind concentrations of viable airborne microorganisms in dynamic atmospheric conditions", App. Env. Microbiology, Vol. 53, No. 7, pp. 1580-1583.
- Lippmann, M., 1976, "Size-selective sampling for inhalation hazard evaluation", In: Liu, Benjamin Y. H., Symposium on Fine Particles: Aerosol Generation, Measurement, Sampling and Analysis, Minneapolis, USA, pp. 287-310.
- Loudon, R. G. e Roberts, R. M., 1967, "Droplet expulsion from the respiratory tract", Am. Rev. Resp. Dis., Vol. 95, pp. 435-442.

- Loudon, R. G. e Roberts, R. M., 1968, "Singing and the dissemination of tuberculosis", *Am. Rev. Resp. Dis.*, Vol. 98, pp. 297-300.
- Loudon, R. G.; Bumgarner, L. R.; Lacy, J. e Coffman, G. K., 1969, "Aerial transmission of mycobacteria", *Am. Rev. Resp. Dis.*, Vol. 100, pp. 165-171.
- Mohr, A. J., 1991, "Developments of models to explain the survival of viruses and bacteria in aerosols", In: Hurst C. T. (Editor), *Modeling the Environmental Fate of Microorganisms*, American Society of Microbiology, Washington/DC USA, pp. 160-190.
- Morris, R. H., 1986, "Indoor air pollution: airborne viruses and bacteria", *HPAC.*, Vol. 58, No. 2, pp. 59-68.
- Nardell, E. A., 1993, "Environmental control of tuberculosis", *Med. Clinics North Am.*, Vol. 77, No. 6, pp. 1315-1334.
- Nicas, M., 2000, "Markov modeling of contaminant concentrations in indoor air", *AIHA J.*, Vol. 61, No. 7, pp. 484-491.
- Pauken, M., 1999, "Sleeping soundly on summer nights", *ASHRAE J.*, Vol. 41, No. 5, pp. 40-47.
- Pelczar Jr., M. J.; Reid, R. e Chan, E. C. S., 1981, "Microbiologia", McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1072 p.
- Pelczar Jr., M. J.; Chan, E. C. S. e Krieg, N. R., 1993, "Microbiology: concepts and applications", McGraw-Hill., New York, USA, 576 p.
- Qian, Y.; Willeke, K.; Grinshpun, S. A. e Donnelly, J., 1997, "Performance of N95 respirators: reaerosolization of bacteria and solid particles", *AIHA J.*, Vol. 58, No. 12, pp. 876-880.
- Rose, C., 1994, "Bioaerosols", *West J Med*, Vol. 160, No. 6, pp. 566.
- Schafer, M.; Fernback, J. E. e Jensen, P. A., 1998, "Sampling and analytical method development for qualitative assessment mycobacterial species of the Mycobacterium tuberculosis complex", *AIHA J.*, Vol. 59, No. 8, pp. 540-546.
- Sepkowitz, K. A., 1996, "How contagious is tuberculosis ?", *Clin. Infect. Diseases*, Vol. 23, pp. 954-962.
- Sirignano, W. A., 1999, "Fluid dynamics and transport of droplets and sprays", Cambridge University Press, Cambridge, UK, 311 p.
- Skov, P., 1992, "The sick building syndrome", *An. New York Acad. Sci.*, Vol. 641, April 30, pp. 17-20.
- Sterling, T. D., Collett, C. e Rumel, D., 1991, "A epidemiologia dos 'edifícios doentes'", *Rev. Saúde Pública*, Vol. 25, No. 1, pp. 56-63.
- Top, F. H. e Wehrle, P. F., 1976, "Communicable and infectious diseases", 8th Ed., The C. V. Mosby, St. Louis, USA, 700 p.
- WHO, 1999, "The world health report 1999", World Health Organization, Geneve, Switzerland, 121 p.
- Woods, J. E., 1979, "Ventilation, health and energy consumption: a status report", *ASHRAE J.*, Vol. 21, No. 7, pp. 23-27.
- Zeterberg, J. M., 1973, "A review of respiratory virology and the spread of virulent and possibly antigenic viruses via air conditioning systems", *An. Allergy*, Vol. 31, No. 5, pp. 228-234.
- Zin, W. A. e Rocco, P. R. M., 1999, "Mecanismos de defesa das vias aéreas", In: Aires, M. M., *Fisiologia*, 2^a Ed., Guanabara Koogan, São Paulo, pp. 549-552.

A MODEL FOR THE DISEASE TRANSMISSION VIA BIOAEROSOLS

Raimundo Nonato Calazans Duarte

Universidade Federal da Paraíba - Departamento de Engenharia Mecânica
58.109-970 – Campina Grande/PB
rduarte@nrva.ufsc.br

César José Deschamps

Universidade Federal de Santa Catarina – Departamento de Engenharia Mecânica
88.040-900 – Florianópolis/SC
deschamps@nrva.ufsc.br

Cezar Otaviano Ribeiro Negrão

Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná – Departamento Acadêmico de Mecânica
80.230-901 – Curitiba/PR
negrao@cefetpr.br

Abstract. *The analysis of biological air quality is a requirement to understand, prevent, and eliminate the human diseases caused by microorganisms. This is particularly true given the present trend for people staying longer periods in conditioned environments. Transmission of respiratory diseases by emission of contaminated aerosol (via cough, sneeze, talking, etc.) is a very complex phenomenon which has not been explored from an engineering point of view. In fact, there is an almost complete absence of theories to estimate both the infection risk and the relative importance of each parameter on the transmission process. The present work proposes a mathematical model to evaluate the respiratory bioaerosol dispersion, taking in to account the transport and the interaction of the contaminated droplets with the surrounding air as well as their inhalation and deposition on the respiratory tract. The model was established to analyze the tuberculosis infection risk having the Mycobacterium tuberculosis as the microbiological agent. However, it can be extended to other respiratory diseases caused by different microorganisms. The conservation equations derived for the model can be solved computationally adopting traditional techniques such as the finite volume methodology.*

Keywords: *biological air quality, infectious disease, tuberculosis, aerial transmission, CFD modeling.*