

## CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM TÚNEL DE VENTO PARA ENSAIOS DE ESTIMATIVA DA DERIVA EM PULVERIZAÇÕES AGRÍCOLAS<sup>1</sup>

ORLANDO MOREIRA JUNIOR<sup>2</sup> & ULISSES ROCHA ANTUNIASSI<sup>3</sup>

**RESUMO:** Este trabalho teve por objetivo a construção e a validação de um túnel de vento em escala reduzida e de baixo custo para utilização em estudos de tecnologia de aplicação de agrotóxicos. As atividades foram conduzidas no Laboratório de Máquinas para Pulverização do Núcleo de Ensaio de Máquinas e Pneus Agroflorestais (NEMPA), Departamento de Engenharia Rural, FCA/UNESP, Botucatu/SP, Brasil. O túnel de vento teve como principais características ser de circuito aberto e seção de teste fechada. Após o ventilador foram colocadas telas e colméia para uniformizar o fluxo de ar. O túnel de vento foi confeccionado com chapas de fibras de eucalipto de espessura 3,0 mm, possuindo seção de testes de 56 cm x 56 cm e comprimento total de 4,80 m. Para o acionamento utilizou-se um ventilador de 5 velocidades e 180 W de potência. O sistema foi dimensionado para fornecer fluxo laminar com velocidade de 2,0 m.s<sup>-1</sup>. Os ensaios de validação foram realizados com uma ponta Teejet XR 8003 na pressão de 200 kPa (gotas médias), aplicando calda contendo corante Azul Brilhante a 0,6% v v<sup>-1</sup> em mistura com dois adjuvantes: um redutor de deriva a base de polímero vegetal na concentração de 0,06% m v<sup>-1</sup> e um surfactante a base de lauril éter sulfato sódico na concentração de 0,2% v v<sup>-1</sup>. Cada pulverização foi realizada por 10 segundos e a deriva foi coletada através de fios de polietileno posicionados transversalmente ao fluxo de ar a diferentes distâncias da ponta e alturas do piso do túnel. A solução de lavagem de cada fio foi processada através de espectrofotometria para quantificação dos depósitos. O túnel de vento apresentou baixos níveis de turbulência e alta repetibilidade dos dados, indicando fluxo uniforme para a realização de medidas de estimativa de deriva. Os resultados da validação mostraram que o túnel de vento mediu variações de intensidade de depósito para as diferentes caldas, demonstrando-se adequado para ensaios de avaliação do potencial de risco de deriva. O uso do adjuvante a base de polímero reduziu significativamente o risco de deriva da ponta quando comparado ao surfactante.

**Palavras-chave:** Tecnologia de aplicação, gotas, adjuvantes.

---

<sup>1</sup> Parte da tese de doutorado do primeiro autor intitulada: Construção e validação de um túnel de vento para ensaios de estimativa da deriva em pulverizações agrícolas.

<sup>2</sup> Aluno do curso de PG Energia na Agricultura – FCA/UNESP - Botucatu-SP – Brasil, Atualmente professor da UFGD.

<sup>3</sup> Prof. Dr. Titular, Depto de Eng. Rural, FCA-UNESP, Rua José Barbosa de Barros, nº 1780, Caixa Postal 237 - CEP 18610-307, Fazenda Lageado, Botucatu-SP, ulisses@fca.unesp.br

## CONSTRUCTION AND VALIDATION OF A WIND TUNNEL FOR DRIFT EVALUATION ON PESTICIDE APPLICATIONS

**SUMMARY:** *The aim of this study was to build and validate a low cost reduced-scale wind tunnel for drift evaluation on pesticide application technology. The work was carried out at the NEMPA - Núcleo de Ensaio de Máquinas e Pneus Agroflorestais (NEMPA), FCA/UNESP, Departamento de Engenharia Rural, Botucatu/SP, Brazil. The wind tunnel main characteristics were an open circuit and a closed working section with a fan blowing air into the tunnel. Screens were fitted downstream after the fan in order to stabilize the air flow on the working section. The tunnel was built with 3.0 mm eucalyptus hardboard, with a total length of 4.8 m and a squared section of 0.56 m. The air flow was provided by a 180 W axial fan. The system was adjusted and calibrated to provide a laminar and stable flow at  $2.0 \text{ m s}^{-1}$ . Validation studies were carried out by using a Teejet XR 8003 flat fan nozzle at 200 kPa (medium droplets) to apply a spray solutions containing water plus a food dye (Blue FDC) at  $0,6\% \text{ m v}^{-1}$  mixed with two adjuvants: a polymer based anti drift formulation at  $0,06\% \text{ m v}^{-1}$  and a sodium lauryl ether sulfate based surfactant at  $0,2\% \text{ v v}^{-1}$ . After a 10-second application the drift was collected on nylon strips transversally fixed along the tunnel at different distances from the nozzle and different high from the bottom part of the tunnel. Drift deposits were evaluated by spectrophotometry. The wind tunnel had low levels of turbulence and high repeatability of the data, which means that the flow was uniform and able to be used for carrying out measures to estimate drift. The validation results showed that the tunnel was effective to enable comparative drift measurements on the spray solution used in this work making possible the evaluation of drift risk potential under those spray technologies. The use of an adjuvant based on a polymer reduced the amount of drift from the nozzle compared to the surfactant.*

**Keywords:** *Application technology, droplets, adjuvants.*

## 1 INTRODUÇÃO

De forma geral um túnel de vento é uma instalação destinada a produzir, de forma regular e controlada, uma corrente de ar com o objetivo de determinarem-se experimentalmente as condições do escoamento e de medir distribuições de esforços, de temperaturas e acompanhamento de partículas, além de outros elementos relevantes do estudo (GORECKI, 1988).

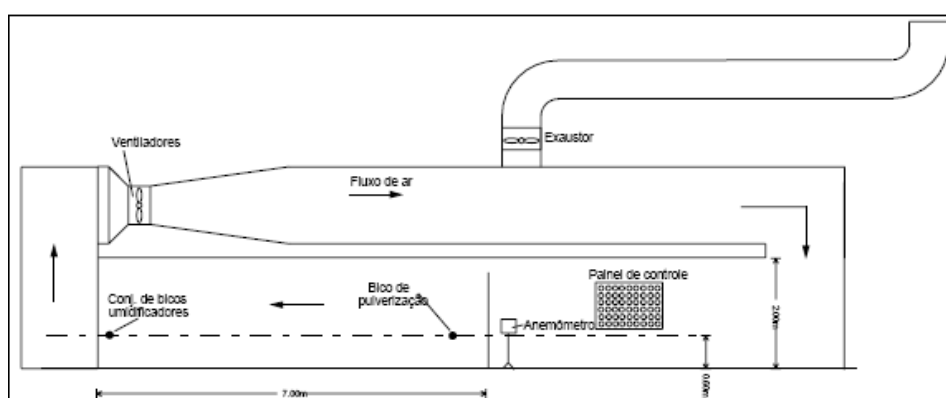
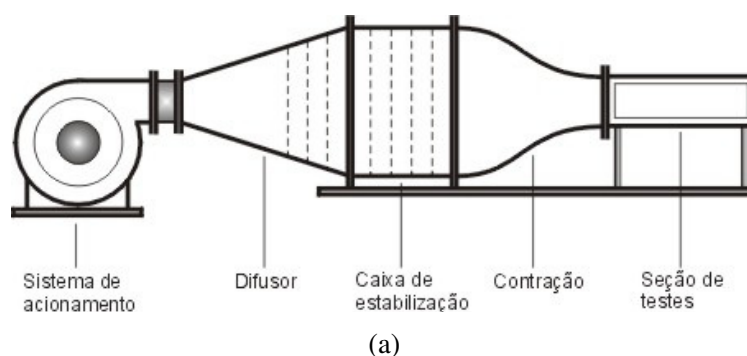
Existem túneis de vento utilizados para se fazer estudos de deriva fora do Brasil (COSTA, 2006). Muitos desses têm a possibilidade de controle de temperatura e umidade do ar, apresentam grande área de

seção de teste e sistemas automatizados. Entretanto, sua construção e manutenção apresentam custos elevados, além de exigir prédios específicos para abrigá-los.

Segundo Gorecki (1988), dentre as várias características apresentadas pelos túneis de vento, destacam-se as que podem ser classificadas em função da posição de construção (verticais ou horizontais), do tipo da câmara (aberta ou fechada) e da velocidade do fluido (de subsônicos a hipersônicos).

Lima (2004) construiu um túnel de vento didático de circuito aberto e seção de testes fechada de pequenas dimensões (Figura 1a). Costa (2006) realizou experimentos no túnel de vento (Figura 1b) pertencente ao laboratório do Silsoe Research Institute, Inglaterra, que apresentava circuito e seção de testes fechada, visando análise de deriva para diferentes pontas de pulverização, pressões de trabalho e adjuvantes. O autor concluiu que o processo de deriva dependia do tipo de ponta utilizada na pulverização, da pressão e do adjuvante pulverizado, pois esses elementos influíam no tamanho da gota pulverizada. Esse túnel de vento contava com sistema de aquisição de dados automatizado, umidificador de ar, controlador de temperatura e sistema de exaustão de gases.

Quanto à construção, os modelos horizontais são os mais usuais, pela sua praticidade e menor custo de construção. O uso de câmara aberta ou fechada vai depender do tipo de estudo que será realizado, assim como a velocidade do fluido e o tamanho do corpo que se deseja ensaiar (BARLOW et al., 1999).



**Figura 1** - (a) Túnel de vento de circuito aberto e seção de testes fechada (LIMA et al., 2004) e (b) Túnel de vento de circuito fechado (COSTA, 2006).

O número de Reynolds constitui a base do comportamento de sistemas reais, pelo uso de modelos físicos reduzidos (FOX; McDONALD, 1998). Um exemplo comum é o túnel aerodinâmico onde se medem forças desta natureza em modelos de asas de aviões, automóveis, edificações. Pode-se dizer que dois sistemas são dinamicamente semelhantes se o número de Reynolds for o mesmo para ambos. *D* refere-se em geral, a qualquer dimensão do sistema, por exemplo a corda de asa de um avião, o comprimento de um navio, a altura de um edifício. Geralmente, nos túneis aerodinâmicos a semelhança mais utilizada é a de Mach (GORECKI, 1988). Tipicamente, por valores experimentais, costuma-se caracterizar um fluido com escoamento laminar com  $Re < 2100$  e escoamento turbulento com  $Re > 4000$  (FOX; McDONALD, 1998). Na maioria dos túneis de vento usa-se o ar como fluido. Os gases são compressíveis e sua massa específica varia com a temperatura e a pressão, mas em muitos casos pode-se considerar sua massa específica constante, o que facilita os cálculos e fornece bons resultados (BARLOW et al., 1999).

As técnicas para medições de deriva ou potencial risco de deriva podem incluir aquelas baseadas em ensaios de campo ou em túnel de vento. O uso de túneis de vento possibilita quantificar o potencial de deriva em condições controladas para as variáveis envolvidas no processo, como a pressão de pulverização, tipo de ponta e constituição da calda, entre outras (MOREIRA JÚNIOR, 2009). Em função do grande número de variáveis envolvidas e o alto custo para estudos de deriva em nível de campo, vários autores apresentaram estudos em túneis de vento para caracterizar o efeito de parâmetros operacionais sobre o risco de deriva na pulverização em condições controladas (PARKIN; WHEELER, 1996; LEON et al., 1998, WALKATE et al. 2000; MURPHY et al., 2000). Como exemplo, experimentos realizados por Costa (2006) para análise de deriva em túnel de vento mostraram que o processo depende do tipo de ponta utilizada, da pressão e do adjuvante pulverizado, pois esses elementos influem diretamente no tamanho da gota pulverizada.

Segundo Butler-Ellis (2004) e Antuniassi (2009), os adjuvantes redutores de deriva atuam no aumento do tamanho médio da gota e na redução do percentual de gotas menores do que  $100 \mu\text{m}$ , enquanto a maioria dos surfactantes apresenta efeito contrário. McMullan (2000) descreveu os efeitos dos adjuvantes redutores de deriva, incluindo os polímeros vegetais, os quais são modificadores da viscosidade e por esta razão modificam o espectro de gotas.

Este trabalho teve por objetivo a construção e a validação de um túnel de vento em escala reduzida e de baixo custo para utilização em estudos de tecnologia de aplicação de agrotóxicos.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

As atividades gerais do trabalho e a construção do túnel de vento foram realizadas no Laboratório de Máquinas para Pulverização do Núcleo de Ensaio de Máquinas e Pneus Agro-Florestais (NEMPA), da Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Botucatu/SP, Brasil. As análises de espectrofotometria foram realizadas no laboratório do Núcleo de Pesquisas Avançadas em Matologia (NUPAM), pertencente ao Departamento de Produção Vegetal / Agricultura da UNESP/FCA, Campus de Botucatu.

### 2.1 Projeto, desenvolvimento e seleção de materiais para a construção do túnel de vento

A base inicial do projeto levou em consideração a opção de se construir um túnel de vento de circuito aberto e seção de teste fechada. A escolha por essa configuração baseou-se nos critérios de minimização dos custos e pela facilidade de construção. Neste sistema o ventilador abastece o circuito e age como soprador. O acoplamento do sistema de ventilação ao túnel foi especificado com uma camada de feltro, tendo por finalidade o amortecimento das vibrações causadas pelo seu funcionamento. Logo após o ventilador foram projetadas duas telas e uma colméia, com a finalidade de uniformizar o fluxo de ar que se desloca para a seção de testes onde são feitas as medidas. Esta configuração foi escolhida por apresentar como principais vantagens a facilidade de montagem e limpeza de seus componentes após os ensaios. Com essa configuração, ventilador, telas e colméia são instaladas antes da seção de ensaio e, desta forma, não necessitam de materiais e projetos especiais anticorrosão e de selagem, além de ter um custo mais baixo e menor necessidade de limpeza e manutenção. Este fator é de suma importância levando-se em consideração o potencial uso de defensivos e adjuvantes, os quais podem causar danos aos componentes do sistema de ventilação.

As dimensões do túnel de vento (4,80 m de comprimento total, 0,56 m de largura e 0,56 m de altura) foram definidas de acordo com o espaço necessário para o ensaio de uma ponta isolada, considerando-se ainda o comprimento mínimo da área útil da seção de testes (2,5 m), visando a reprodução das condições de trabalho em túneis de vento citados na literatura (COSTA, 2006). As dimensões finais de altura e largura foram também ajustadas ao tamanho do corpo do ventilador, de maneira a facilitar o encaixe das peças.

O projeto da estrutura do túnel de vento considerou a utilização de chapas de madeira (fibra de eucalipto) de espessura 3,0 mm, reforçadas por caibros e sarrafos. A escolha desse material baseou-se nas características de facilidade de corte, perfuração e colagem, além do baixo custo. As placas foram cortadas

e encaixadas de acordo com as dimensões definidas no projeto. Entretanto, as dimensões laterais das mesmas foram mantidas maiores do que o necessário visando a possibilidade de mudança nas dimensões de altura e largura do túnel, no caso da necessidade de alteração nas dimensões do ventilador. O projeto previu ainda o revestimento da parte interna do túnel com um filme plástico para impermeabilizar as chapas de madeira, prolongando a vida útil do equipamento.

O sistema de acionamento do túnel foi baseado num ventilador de cinco velocidades e potência de 180 Watts, composto de quatro pás de 0,24 m cada. As velocidades de rotação das pás do ventilador foram aferidas por um tacômetro digital, modelo DT 6234B da empresa IMPAC.

O projeto do túnel de vento não considerou a utilização da contração e do difusor, visando diminuir os custos de construção e o reduzir o espaço ocupado (comprimento final). Visando melhorar a qualidade do fluxo de ar na seção de testes foram projetadas duas telas e uma colméia. A primeira foi proposta com tela de aço de malha 6 mm e a segunda com fio de “nylon” de malha 2,0 mm. A função das telas é de eliminar os vórtices (deseja-se ausência de rotação e de velocidades transversais, isto é, de vorticidade ou redemoinhos) que surgem devido ao movimento das hélices do ventilador. Após as telas foi colocada uma colméia que tem a função de direcionar o escoamento, deixando-o laminar. No escoamento laminar, todas as partículas que passam por um mesmo ponto têm a mesma trajetória, que é perfeitamente definida pela geometria do duto, retilínea no caso desse túnel de vento. Já no escoamento turbulento não há uniformidade das trajetórias como o próprio nome sugere, pois surgem componentes transversais de velocidade no escoamento.

A colméia foi projetada com a colagem de 841 seções de tubos quadrados de alumínio com paredes de 2 mm, largura de 20 mm e comprimento de 100 mm. A vedação das telas e da colméia junto à paredes do túnel foi planejada com uma camada de feltro em volta das peças.

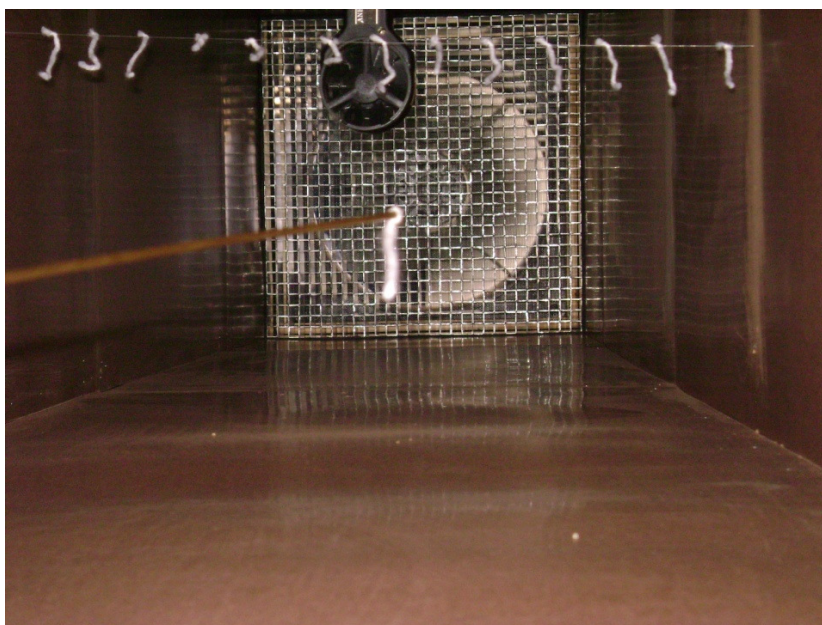
## **2.2 Ensaios preliminares do desempenho aerodinâmico do túnel de vento**

Antes da realização dos ensaios de validação final do túnel de vento foram realizados ensaios preliminares para se verificar as características de desempenho do túnel quanto ao fluxo de ar gerado.

As velocidades do fluxo de ar medidas dentro da seção de testes do túnel de vento foram determinadas com um anemômetro de ventoinha modelo A892160 da empresa EXTECH. Também foram feitas medições de temperatura ambiente e umidade relativa do ar em todos os ensaios, usando uma estação climática marca Oregon Scientific, modelo “Weather Station 433 MHz Cable Free”.

Para verificação da qualidade do fluxo de ar foram realizados ensaios de visualização com fios de lã fornecidos pela empresa Coats Corrente Ltda. Através destes ensaios foi possível verificar as condições do escoamento em toda a área de ensaio do túnel de vento. A Figura 2 mostra uma seqüência de fios de lã

dispostos na forma de um varal, utilizados para verificar as características e a qualidade do fluxo de ar na área de seção de testes. Os fios de lã tinham 2 mm de espessura e 6 cm de comprimento cada e ficaram espaçados um do outro em 3,5 cm, totalizando 16 fios de lã na estrutura. Esses fios foram posicionados transversalmente ao fluxo de ar na seção de testes do túnel de vento nas posições 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm, 35 cm, 40 cm, 45 cm e 50 cm de altura em relação ao piso do túnel de vento e a 1,80 e 2,80 m de distância do início do túnel de vento. Também foi utilizada uma haste metálica de 2 m de comprimento com um fio de lã na ponta para que fosse possível fazer a varredura do escoamento na seção de testes do túnel de vento, sendo que a lã utilizada tinha cor branca para facilitar a sua visualização. Durante estes ensaios foi possível verificar uniformidade adequada do fluxo, já que não foram detectadas regiões de recirculação.



**Figura 2** - Haste e “varal” de fios de lã utilizados nos ensaios de visualização da uniformidade do fluxo de ar no interior do túnel de vento.

Nestes ensaios preliminares verificou-se a qualidade do fluxo de ar com a utilização de três velocidades diferentes do ventilador, a velocidade mais baixa, a de intensidade média e a mais alta. Nestes ensaios foram totalizadas doze configurações diferentes, onde foram realizadas mudanças de posição das telas da colméia e do anemômetro, para cada uma das três velocidades testadas, ou seja, quando multiplicadas pelas três velocidades citadas acima, totalizaram trinta e seis ensaios. Em todos estes ensaios foram realizadas as seguintes determinações: velocidade e qualidade do fluxo de ar através de ensaios de visualização e posicionamento das telas e da colméia. Ao final dos ensaios determinou-se a configuração ideal para esse túnel de vento.

As medidas da velocidade do fluxo de ar foram realizadas em duas distâncias diferentes, em relação ao início do túnel de vento. Uma a 1,80 m e a outra a 2,80 m. Essas medidas foram utilizadas para se saber qual a melhor posição para a seção de testes, já que esta deve apresentar um escoamento livre de oscilações de velocidade (baixa flutuação de velocidade, escoamento totalmente desenvolvido) e livre de vórtices (região de recirculação). Para tanto, foi montado um suporte para o anemômetro, o que possibilitou seu deslocamento desde o teto até o piso do túnel de vento. Desta forma, foram feitas varreduras de velocidade em todas as configurações montadas. As posições para a colocação do anemômetro foram definidas após alguns testes de visualização e também valores encontrados na literatura (GORECKI, 1988; MOREIRA, 1996).

#### **2.4 Posicionamento das telas e da colméia**

Um conjunto de ensaios foi delineado para a determinação do melhor posicionamento das telas e da colméia, visando o melhor desempenho do túnel em termos aerodinâmicos. Os testes foram realizados com uma das telas e a colméia e, posteriormente, trocou-se a tela e manteve-se a colméia e uma terceira configuração, onde foram utilizadas as duas telas e a colméia, sempre variando suas posições. Através da realização destes testes foi possível descobrir qual a interferência de cada uma das telas no escoamento, já que uma apresentava uma malha muito pequena e, portanto, apresentava maior perda de carga, diminuindo a energia do escoamento, quando comparada com a outra (POPE, 1966). Também se variou a distância das telas e da colméia em relação ao ventilador, que foram mantidos sempre fixo no início do túnel de vento. Com estas modificações, foram realizadas análises do comportamento do escoamento e assim foi possível interferir de maneira construtiva no posicionamento de cada elemento constituinte do túnel de vento, identificando a melhor posição das telas, colméia e seção de testes (GORECKI, 1988).

Ao final destes testes, foram analisadas todas as configurações estudadas e definidas as posições das telas e da colméia para os menores níveis de turbulência (através dos testes de visualização) e velocidade constante na seção de testes, ou seja, maior qualidade de fluxo (através das medidas com o anemômetro). Desta forma foi encontrada a configuração que apresentou um fluxo de ar mais próximo do laminar com velocidade de  $2 \text{ m s}^{-1}$ .

#### **2.5 Ensaios para validação da estimativa de deriva**

O sistema de pulverização foi projetado de um tanque pressurizado de aço inox com capacidade de 15 L, um bico com válvula anti-gotejo e uma ponta de pulverização XR8003, a ser operada na pressão



de 200 kPa, gerando um espectro de gotas médias. A ponta ficou posicionada no fluxo de ar a uma altura de 0,44 m em relação ao piso do túnel de vento.

Para cada coleta a pulverização da calda foi realizada por 10 segundos, sendo que a deriva foi coletada através de fios de polietileno posicionados transversalmente ao fluxo de ar. Cada fio possuía 2,0 mm de diâmetro e 0,56 m de comprimento útil (largura do túnel de vento), sendo posicionados por meio de furos na parede do túnel, sendo fixados por presilhas de madeira colocadas na parte externa. Os fios foram posicionados nas distâncias de 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5 m em relação à ponta de pulverização, referenciando-se no comprimento do túnel. Na distância de 1,0 m da ponta, os fios foram fixados nas alturas de 0,05; 0,10; 0,20 e 0,30 m com relação ao piso do túnel, e nas demais posições os fios foram fixados nas alturas de 0,05; 0,10 e 0,25 m, totalizando 13 fios coletores.

Para que as gotas pulverizadas ao colidirem com piso do túnel de vento não voltassem ricocheteando, o que poderia atrapalhar as medidas de deriva foi construído um suporte para a calda pulverizada. Esse suporte é composto por um recipiente armazenador e uma tela de “nylon”. Abaixo da tela foi colocada uma grelha metálica com a finalidade de manter a tela de “nylon” esticada. Desta forma, as gotas pulverizadas tinham acesso a este recipiente e não voltavam ao ambiente onde acontecia a pulverização e, portanto, não interferiam nas medidas de deriva. Ao final de cada ensaio, o recipiente era esgotado através de uma torneira localizada no fundo do mesmo.

Para quantificação dos depósitos de calda nos fios coletores foi utilizado como traçante o corante Azul Brilhante a 0,6% v v<sup>-1</sup>, em mistura com dois adjuvantes: um redutor de deriva a base de polímero vegetal na concentração de 0,06% m v<sup>-1</sup> e um surfactante a base de lauril éter sulfato sódico na concentração de 0,2% v v<sup>-1</sup>. A pressão, altura do bico, velocidade do fluxo de ar foram iguais para todos os tratamentos. É importante ressaltar que os adjuvantes utilizados foram selecionados por terem funções diferentes (um redutor de deriva e um surfactante), sendo esperado que seus comportamentos com relação ao índice de deriva sejam opostos, visando avaliar a capacidade do túnel de vento de identificar tais diferenças. Apesar de atenderem as características funcionais de cada grupo de adjuvante, os produtos utilizados não possuem registro nos órgãos oficiais como adjuvantes.

Durante os ensaios as condições climáticas foram monitoradas e os ensaios foram realizados somente com a temperatura ambiente menor que 30°C e a umidade relativa do ar maior que 55%. Em cada coleta o sistema de pulverização foi acionado por 10 segundos com o ventilador ligado e o fluxo de ar estabilizado em 2 m s<sup>-1</sup>. Após as aplicações o ventilador era desligado e em seguida aguardava-se cinco minutos, tempo necessário para total estabilização do ambiente dentro da seção de testes e fixação das gotas que estavam impregnadas nos fios coletores. A retirada dos fios foi realizada por duas pessoas por meio de um alicate, sendo os fios depositados individualmente em sacos plásticos transparentes. Posteriormente foram adicionados 15 mL de água destilada em cada saco plástico, os quais foram agitados ma-

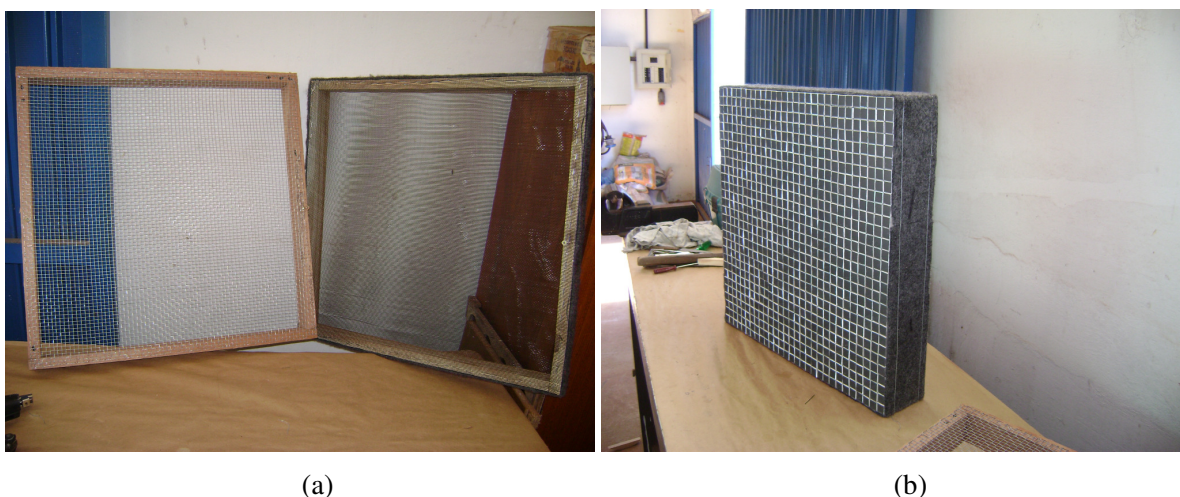
nualmente. Após a lavagem de todos os fios coletores, o líquido foi analisado em um espectrofotômetro UV-visível de duplo feixe, modelo Cintra 20. Os resultados em absorbância, no comprimento de onda 630 nm para o corante Azul Brillhante, foi transformado em ppm por meio de confecção de curvas-padrão a partir de concentrações conhecidas da amostra da calda utilizada em cada tratamento. Os depósitos referentes a cada posição de coleta foram avaliados individualmente, possibilitando representar a distribuição dos depósitos ao longo de toda seção de testes, assim como sua totalização em análise comparativa com o total de calda pulverizado nos 10 segundos.

Os dados foram analisados através da estatística descritiva exploratória e a comparação entre os tratamentos foi feita utilizando o intervalo de confiança a 95% de probabilidade (IC 95%). Os valores absolutos de intervalo de confiança foram somados e subtraídos às respectivas médias, permitindo a comparação entre os adjuvantes (caldas) avaliados.

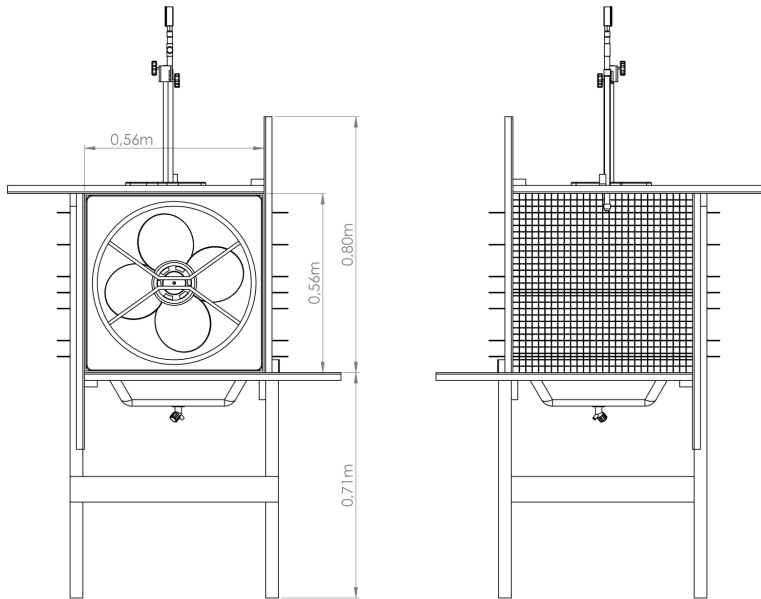
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Construção do túnel de vento

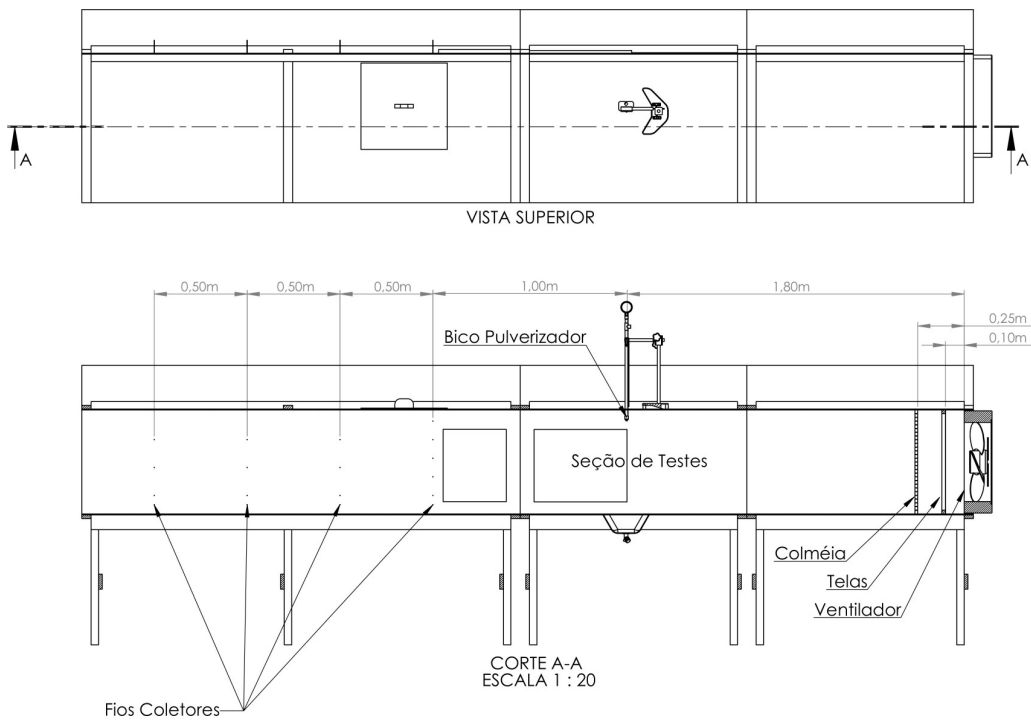
As Figuras 3 a 8 apresentam a configuração final do túnel de vento e seus principais componentes. Os resultados dos ensaios preliminares (visualização da qualidade do fluxo de ar através dos fios de lã) mostram que as opções tecnológicas adotadas na construção do túnel de vento tiveram êxito. Os dados coletados durante os ensaios preliminares demonstraram a obtenção de um fluxo de ar laminar e uniforme, apresentado desempenho adequado quando comparados com outros estudos realizados (COSTA, 2006, LUND, 2000 e WALKLATE ET AL. 2000).



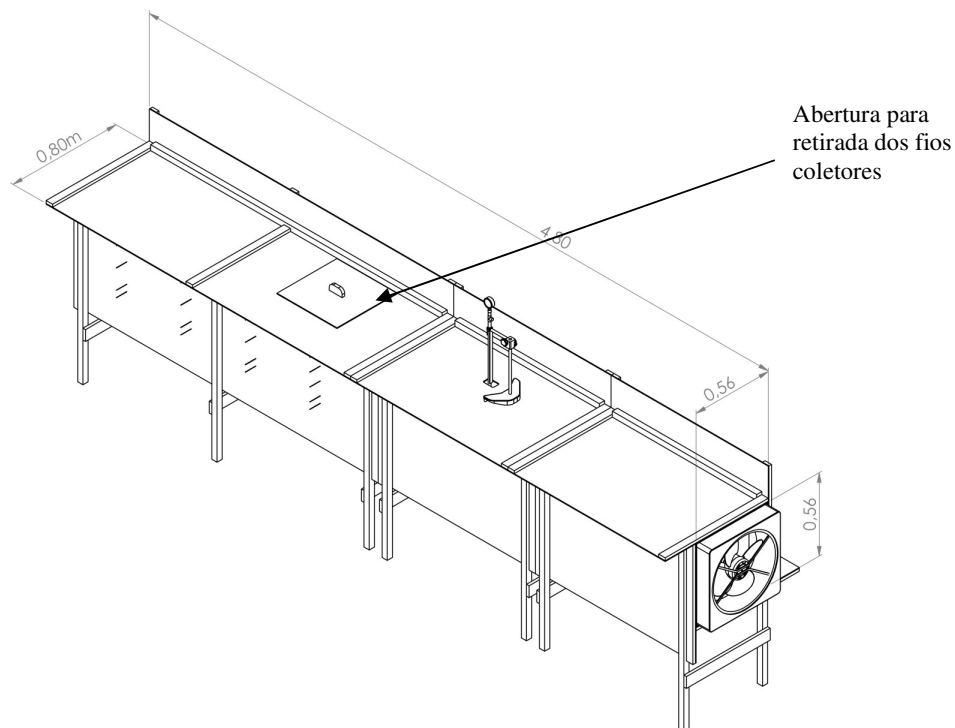
**Figura 3** - Telas (a) e colméia (b) utilizadas na construção do túnel de vento.



**Figura 4** - Vista frontal e posterior de parte do túnel de vento.



**Figura 5** - Vista superior e lateral do túnel de vento e seus principais componentes.



**Figura 6** - Principais dimensões do túnel de vento (em metros), com destaque para a abertura utilizada para retirada dos fios coletores.



**Figura 7** - Ilustração com a visualização final do projeto do túnel de vento.



**Figura 8** - Vista geral do túnel de vento depois da montagem no laboratório, incluindo o sistema de pulverização.

O tamanho da área da seção de testes ficou dentro dos limites de potência do ventilador que foi utilizado nos ensaios. Pode-se calcular qual o fluxo que o ventilador consegue impulsionar para uma determinada área de seção de testes pela Equação (5). Neste trabalho foi necessária uma velocidade na seção de testes de  $2 \text{ m.s}^{-1}$  e sabendo que a área da seção de testes é de  $0,31 \text{ m}^2$ , a vazão volumétrica que o motor do ventilador deveria oferecer é de  $0,62 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

$$V_v = A.V \quad (5)$$

Onde:

$V_v$  = Vazão Volumétrica ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )

$A$  = Área da seção transversal ( $\text{m}^2$ )

$V$  = Velocidade ( $\text{m.s}^{-1}$ )

Utilizando o valor da velocidade desejada durante os ensaios ( $2\text{m.s}^{-1}$ ) foi possível calcular o número de Reynolds e através desse resultado saber o tipo de escoamento dentro do túnel de vento. O número de Reynolds constitui a base do comportamento de sistemas reais, pelo uso de modelos físicos

reduzidos. Um exemplo comum é o túnel aerodinâmico onde se medem forças desta natureza em modelos de asas de aviões, automóveis, edificações. Pode-se dizer que dois sistemas são dinamicamente semelhantes se o número de Reynolds, for o mesmo para ambos. D refere-se em geral, a qualquer dimensão do sistema, por exemplo a corda de asa de um avião, o comprimento de um navio, a altura de um edifício. Geralmente, nos túneis aerodinâmicos a semelhança mais utilizada é a de Mach. Tipicamente, por valores experimentais, costuma-se caracterizar um fluido com escoamento laminar com  $Re < 2100$  e escoamento turbulento com  $Re > 4000$ .

O número de Reynolds é adimensional e para o túnel desenvolvido neste trabalho pode ser calculado da seguinte maneira:

$$Re = \frac{c \cdot D}{\nu} \quad (6)$$

$$Re = \frac{2,0 \cdot 0,03}{16,04 \cdot 10^{-6}} = 3,7 \cdot 10^3 \quad (7)$$

Onde:

c: velocidade média do fluxo, medida na seção de ensaio ( $2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

D: comprimento característico, neste trabalho é o diâmetro externo médio do bico pulverizador (aproximadamente 3 cm ou 0,03 m).

$\nu$ : viscosidade cinemática do fluido ( $= \eta / \rho$ , onde  $\eta$  é viscosidade dinâmica e  $\rho$  é massa específica do fluido, neste caso o ar). Na literatura (FOX, McDONALD, 1998), a  $30^\circ\text{C}$  a viscosidade cinemática do ar é:  $\approx 16,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

O valor encontrado para o número de Reynolds neste túnel indica que o escoamento está na transição entre os regimes laminar e turbulento. Durante os testes de visualização com fios de lã, foi observado que não há regiões de turbulência na seção de ensaio. As medidas de velocidade realizadas com o anemômetro de ventoinha mostraram que as velocidades foram praticamente constantes na seção de testes, podendo-se assumir um escoamento laminar. Esses dados garantem um bom desenvolvimento do fluxo na seção de testes, minimizando a possibilidade de turbulência no escoamento durante os ensaios. Isso ocorre devido a baixa velocidade utilizada nos ensaios ( $v = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) e também a baixa razão de bloqueio causada pelo bico pulverizador e os fios coletores.

Para reduzir a interferência durante os ensaios, as medidas de velocidade na seção de testes foram realizadas sempre antes dos ensaios de pulverização, desta forma, o anemômetro utilizado para medir a velocidade não interferiu no escoamento durante os ensaios, apenas o bico pulverizador. A razão de bloqueio pode ser calculada em função da área da seção de testes e da área do bico pulverizador, consideran-

do a seção de testes quadrada de 56 cm x 56 cm e área da seção de testes túnel de vento de aproximadamente 0,31 m<sup>2</sup>:

$$A = 2.\pi.r.h = 2.3,14.0,015.0,12 = 0,011 \text{ m}^2 \quad (8)$$

Onde:

A é a área da seção de ensaios do túnel de vento;

r é o raio médio do bico de pulverização (15 mm);

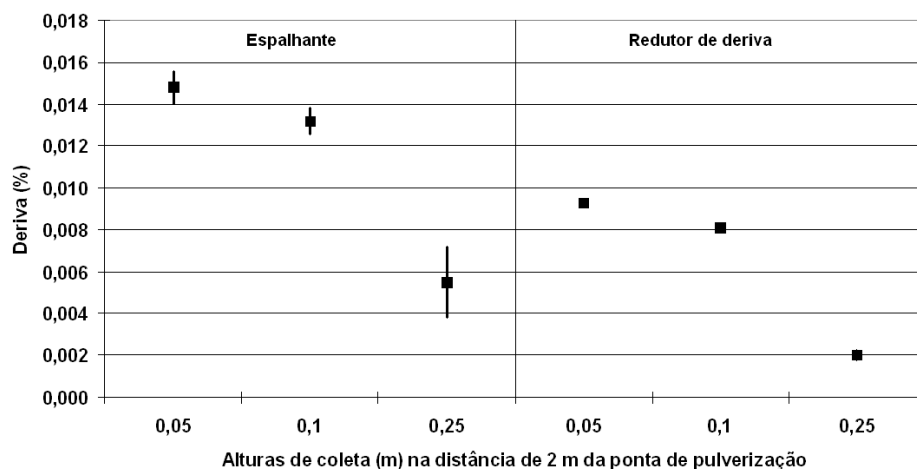
h a altura do bico e suporte que ficou dentro do túnel de vento (12 cm);

Isso resultou em uma razão de bloqueio de aproximadamente 3,5%. Com isto, não houve necessidade de correção nas medidas realizadas durante os ensaios (GIRARDI, 1989; MOREIRA, 1996).

### 3.2 Validação do túnel para a quantificação da deriva

Na Figura 9 são apresentados os resultados dos ensaios com a ponta de pulverização XR 8003 comparando os níveis de depósitos (deriva) nos fios coletores para os dois adjuvantes, em função da altura dos fios com relação ao piso do túnel de vento, para a distância de 2,0 m a partir da ponta. Nota-se que o surfactante apresentou os maiores níveis de depósito ou deriva estimada, independente da altura dos coletores, com diferença significativa para o adjuvante redutor de deriva pela análise do IC 95%. O redutor de deriva a base de polímero vegetal apresentou os menores valores, também com diferença significativa. Estes resultados são explicados pela própria definição funcional dos adjuvantes, ou seja, o redutor de deriva proporciona menor percentual de gotas menores do que 100 µm e maior diâmetro mediano volumétrico, enquanto o surfactante induz o efeito contrário. Tais efeitos são esperados e foram discutidos por Butler-Ellis (2004) e Antuniassi (2009). Outro aspecto observado é a variação do percentual de deriva em relação à altura do piso do túnel de vento. Quanto maior a altura, menor o depósito de corante e, portanto, menor a deriva coletada nos fios. Este comportamento das coletas mostra que, apesar das gotas serem carregadas pelo vento, o efeito natural da força da gravidade é bastante significativo no processo, concentrando as gotas na parte de baixo do túnel.

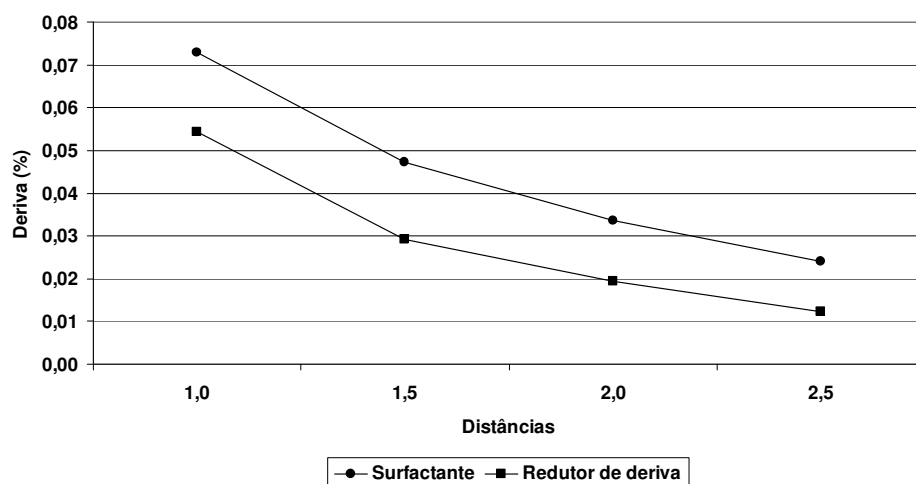
As análises realizadas para as demais distâncias de 1,0, 1,5, e 2,5 m mostraram o mesmo comportamento relativo entre os tratamentos, ou seja, maior potencial de deriva para o surfactante e menor para o redutor de deriva, independente da altura de posicionamento dos fios coletores.



**Figura 9** - Percentual de deriva de dois adjuvantes coletada na distância de 2,0 m da ponta de pulverização. Os pontos indicam as médias de cada análise e as barras verticais representam a variação dos valores de acordo com o cálculo do IC 95%

Na Figura 10 está apresentada a soma dos depósitos das alturas em cada distância para os dois tratamentos. Observa-se a mesma tendência entre os adjuvantes, ou seja, na medida em que aumenta a distância dos fios coletores em relação à ponta de pulverização diminui a deriva, preservando-se o comportamento relativo entre os mesmos, com o redutor de deriva oferecendo o menor potencial estimado pela análise no túnel. Esses resultados estão de acordo com McMullan (2000), que descreve os efeitos dos adjuvantes redutores de deriva, incluindo os polímeros vegetais (polissacarídeos), os quais são modificadores da viscosidade. Segundo o autor, tais substâncias quando combinadas com a calda pulverizada aumentam o tamanho de gotas. Também é possível verificar na Figura 10 que as maiores concentrações de deriva encontram-se mais próximas da ponta, diminuindo gradativamente até a distância de 2,5 m.





**Figura 10** - Percentual de deriva observada para os dois tratamentos, de acordo com as distâncias de coleta dentro do túnel de vento.

Numa análise global dos resultados, a calda com o redutor de deriva a base de polímero vegetal reduziu em 35,1% o potencial de deriva da ponta XR 8003 em comparação à calda com o surfactante a base de lauril éter sulfato sódico. Do ponto de vista prático, o túnel de vento se mostrou ferramenta adequada para avaliar o potencial de deriva de das condições de aplicação avaliadas, identificando com precisão as características funcionais das caldas contendo os diferentes adjuvantes no que se refere ao potencial de deriva.

#### 4 CONCLUSÕES

Foi possível construir um túnel de vento de dimensões reduzidas e de baixo custo para realizar estimativas de deriva. Os ensaios preliminares do fluxo de ar incluindo a visualização com fios de lã apresentaram baixos níveis de turbulência e alta repetibilidade dos dados, indicando a geração de um fluxo de ar laminar, adequado para realização de medidas de estimativa de deriva. Os resultados dos ensaios de validação da determinação de deriva mostraram que o túnel de vento conseguiu medir variações de intensidade de depósito para as diferentes caldas avaliadas, demonstrando-se adequado para ensaios de avaliação do potencial de risco de deriva. O uso do adjuvante a base de polímero reduziu significativamente o risco de deriva quando comparado ao surfactante.

## 5 REFERÊNCIAS

ANTUNIASSI, U. R. Conceitos básicos da tecnologia de aplicação de defensivos para a cultura da soja. **Boletim de pesquisa de Soja 2009**, v. 13, p. 299-317, 2009.

BARLOW J. B., RAE W. H., POPE A., “Low-Speed Wind Tunnel Testing”, 3<sup>rd</sup> edition; John Wiley & Sons, 1999.

BUTLER ELLIS, M. C. **The effect of spray liquid on the application of pesticide sprays**. In: RAETANO, C.G., ANTUNIASSI, U.R. Qualidade em Tecnologia de Aplicação. Botucatu: Fepaf, 2004. p. 167-176.

COSTA, A. G. F. Determinação da deriva da mistura 2,4-D e glyphosate com diferentes pontas de pulverização e adjuvantes. 2006, 103p. (Tese Doutorado em Energia na Agricultura), Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.

FOX, R. W.; McDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**, 4<sup>o</sup> ed., Rio de Janeiro: LTC, 1998. 662p.

GORECKI, J. P. **Túneis aerodinâmicos: passado, presente e futuro**. In: [II ENCONTRO NACIONAL DE CIÊNCIAS TÉRMICAS], 1988, Águas de Lindóia-SP, 53p., 1988.

LEON, J. C.; BABIN, B.; CHOI, C. Y. Design, construction, and evaluation of a compact recirculating wind tunnel for agricultural experiments. **Transactions of the ASAE**, v. 41, n. 1, p. 213-218, 1998.

LIMA, P. H. et al. Planejamento e desenvolvimento de um túnel aerodinâmico do tipo soprador visando o ensino e a pesquisa em engenharia. In: CONGRESSO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA - CREEM, 2004, Nova Friburgo, RJ, **anais do XI CREEM 2004**. Paper CRE04 – A-A01.

McMULLAN, P.M. Utility adjuvants. **Weed Technology**, v. 14. p.792-797, 2000.

MOREIRA, JUNIOR O. **Estudo experimental do escoamento sobre modelos de ônibus com diferentes inclinações da superfície frontal**. 1996, 184p. Tese (Mestrado) Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos-SP, 1996.

MURPHY, S. D.; MILLER, P. C. H.; PARKIN, C. S. The effect of boom section and nozzle configuration on the risk of spray drift. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 75, p. 127-137, 2000.

PARKIN, C.S.; WHEELER, P.N. Influence of spray induced vortices on the movement of drops in wind tunnels. **Journal Agricultural Engineering Research**, v. 63, p. 35-44, 1996.

POPE, A., **Low speed wind tunnel testing**, New York, N.Y.: John Wiley, 1966. 245p.

SCHLICHTING, H., **Boundary-Layer Theory**, New York, N.Y.: McGraw-Hill, 1979. 458p.

WALKLATE, P.J.; MILLER, P.C.H.; GILBERT, A.J. Drift classification of boom sprayers based on single nozzle measurements in a wind tunnel. **Aspects of Applied Biology**, v. 57, p.49-56, 2000.