

## Resumo

A velocidade das gotas pulverizadas representa a energia ou força com que essas impactam com a superfície dos alvos e nos dá um indicativo da sua trajetória (forma de penetração) no interior do dossel. Com o objetivo de estimar a velocidade das gotas, foi desenvolvido um método de coleta das forças de impacto dessas sobre uma superfície e outro que mede o fluxo de líquido nelas contido. Para medir as forças de impacto foi utilizada uma placa de impacto com alta sensibilidade conectada a um microcomputador equipado com software capaz de registrar forças pouco intensas. Ao mesmo tempo foi desenvolvido um sistema de coleta de líquido, com a mesma área de coleta da placa de impacto, utilizando uma balança de precisão para quantificar o líquido que passa naquela seção. Por fim, foi estimada a velocidade das gotas pulverizadas por diferentes pontas de pulverização. Os resultados mostram que é possível coletar as forças de impacto das gotas, utilizando uma placa de impacto com alta sensibilidade, e medir o fluxo de líquido que passa pela seção de mesma área da placa de impacto. É possível ainda, estimar a velocidade das gotas pulverizadas por diferentes pontas de pulverização, utilizando as forças de impacto e o fluxo de líquido que passa pela área da placa.

**Palavras-chave:** velocidade de gotas; pulverização; força de impacto; fluxo de líquido.

## Estudio sobre la estimativa de la velocidad de las gotas através de las fuerzas de impacto

### Resumen

La velocidad de las gotas pulverizadas representa la energía o la fuerza con que ellas impactan la superficie de los albos. Nos indican su trayecto a través de su penetración en el dosel. Objetivando estimar la velocidad de las gotas desarrollamos un método de colecta de las fuerzas de impacto sobre una superficie y otra para medir la cantidad de líquido que contienen. Para medir la fuerza de impacto usamos una placa de impacto con alta sensibilidad conectada a una micro computadora equipada con un software capaz de registrar fuerzas de impacto muy débiles (pequeñas). Al mismo tiempo desarrollamos un sistema de captación de líquido con área de colecta equivalente al área de impacto y utilizando una balanza de alta precisión para cuantificar la cantidad de líquido que pasó por la sección. Por último, fue estimada la velocidad de las gotas pulverizadas en diferentes puntos de pulverización. Los resultados muestran que es posible medir la fuerza de impacto das gotas utilizando una placa de impacto con alta sensibilidad e incluso medir el flujo del líquido que pasa por la sección de la misma placa de impacto. También es posible estimar la velocidad a que esas gotas andan y llegan a los diferentes puntos de impacto y la cantidad de líquido que pasa por la placa.

**Palabras llave:** velocidad de las gotas; pulverización; punto de impacto y flujo del líquido.

### Introdução

Existem várias formas de se representar o espectro de gotas geradas na pulverização. Matthews (2000) menciona que o espectro de gotas de um spray normalmente é estudado pelo seu diâmetro mediano volumétrico (dmv), diâmetro mediano numérico (dmn), coeficiente de dispersão (r) e amplitude relativa. Os mecanismos de rompimento da lâmina de líquido foram estudados por Butler-Ellis e Tuck

(1999) para cinco modelos de pontas convencionais e sete diferentes líquidos. Segundo estes autores, os padrões obtidos foram o de “perfuração” para as emulsões e “oscilação” para as soluções, sendo que o aumento do comprimento da lâmina resulta em gotas menores.

Dentre as características que influenciam na trajetória da gota em direção ao alvo, Matuo (1990) relaciona a temperatura, a umidade relativa, o vento e

## Estimativa da velocidade das gotas através das forças de impacto<sup>1</sup>

*Francisco Faggion<sup>2</sup>*

1 Parte da tese de doutorado do autor, apresentada à FCA/UNESP, 2002.

2 Doutor, Ministério da Integração Nacional, Esplanada dos Ministérios, Bloco E, CEP 70.067-901, Brasília, DF. Fone (61) 3414 5676. E-mail: faggion@yahoo.com

a pressão barométrica. Em condições tropicais de alta temperatura, o fenômeno da evaporação das gotas é bastante problemático, agravando-se em dias muito secos, com baixa umidade relativa do ar.

Farooq et al. (2001), afirmam que as gotas da descarga de uma ponta desaceleram verticalmente durante o deslocamento e, quando houver a ação de vento lateral, também ocorre desaceleração horizontal. Os autores justificam essa redução da velocidade pela diminuição da inércia das gotas, determinada basicamente pelo seu peso ao invés da sua energia inicial. Próximo da ponta, as gotas menores se deslocam mais lentamente que as maiores e afastado da ponta as gotas pequenas podem ter velocidade negativa, indicando que estão se deslocando para cima.

Bergeron et al. (1999) dividem o fenômeno do impacto das gotas em três estágios: impacto, expansão e retração. O impacto e a expansão ocorrem nos 2 milissegundos após o impacto e os fenômenos físicos que ocorrem são controlados pelas forças da inércia, da viscosidade e da capilaridade. No estágio da retração, que ocorre durante os 10-50 milissegundos subsequentes, a gota pode respingar da superfície ou simplesmente retrair lentamente até a sua posição de equilíbrio. Esses eventos são controlados pela competição entre as forças de dissipação viscosa das gotas e as forças de capilaridade que tentam minimizar a área superficial das gotas. Após a retração, os eventos de longo tempo são controlados pelas leis clássicas da termodinâmica, como as do coeficiente de dispersão e do ângulo de contato.

É comum relacionar o risco de deriva de uma determinada ponta de pulverização pela porcentagem volumétrica de gotas menores que 100  $\mu\text{m}$  de diâmetro, relatam Miller e Butler-Ellis, 2000. Os autores alertam que existe a necessidade de medir os parâmetros físicos do espectro de gotas incluindo a distribuição do tamanho, a velocidade, a estrutura do espectro de gotas e a velocidade do vento no interior do spray para melhor entender o comportamento das gotas.

SOUTHCOMBE et al. (1997) mencionam que a presença de bolhas de ar dentro das gotas influencia o seu transporte e deposição. COMBELLACK e MILLER (2001) vão além, dizendo que a presença de ar dentro das gotas

influencia o tamanho, a velocidade, a forma de impacto, a retenção e a deriva.

A velocidade das gotas na saída das pontas de pulverização com indução de ar geralmente é menor que a velocidade das gotas geradas pelas pontas convencionais e, por causa da elevada força de retenção em relação à massa, elas normalmente tem velocidade menor quando impactam com a superfície, de acordo com Miller (2001).

Usando o Particle Measuring Systems imaging probe (PMS), Butler-Ellis e Tuck (2000) relatam que as gotas com ar em seu interior possuem velocidades menores que as gotas produzidas por pontas de pulverização convencionais e que isto pode ser afetado pelo tipo de líquido utilizado. Poucos estudos são feitos em relação à velocidade das gotas, especialmente devido ao custo elevado dos equipamentos a laser utilizados para medir a velocidade delas. O objetivo deste trabalho foi desenvolver métodos de medida das forças de impacto e do fluxo de líquido das gotas pulverizadas e estimar a sua velocidade.

## Materiais e métodos

As atividades descritas neste trabalho foram realizadas nos laboratórios do Silsoe Research Institute, na Inglaterra. As pontas com indução de ar utilizadas foram fabricadas por Billericay Farm Services, Billericay, Essex, England (denominadas pontas Modelo A); Hardi International, Taastrup, Denmark (B); Spraying Systems, Wheaton, Illinois, USA (C); Sprays International, Paul Street, London, England (D). As pontas de pulverização convencionais do tipo XR foram fabricadas pela Spraying Systems (E).

Uma série com quatro pontas de diferentes vazões foi utilizada em cada modelo. As quatro séries de pontas de pulverização de jato plano com indução de ar (de A a D) foram identificadas com a sigla IA (indução de ar) e a série de pontas convencional (E) foi identificada pela sigla PC (ponta convencional), ou seja, sem indução de ar. As vazões da série de pontas de cada modelo foram: 015, 02, 03 e 04 (galões americanos por minuto). Além dessas, foram utilizadas outras quatro pontas com indução de ar 02 e 04 dos modelos C e D. Todas as pontas testadas foram fabricadas para gerar um ângulo de aplicação de 110°.

A calda de pulverização utilizada para a realização dos testes foi água com 0,1% em volume do surfactante não iônico Agral, formulado numa solução não aquosa concentrada. O surfactante Agral provoca o abaixamento da tensão superficial da água, atingindo o patamar mínimo antes mesmo da concentração atingir 0,1% e, aumentando a concentração, a tensão superficial do líquido permanece estável de acordo com Montório (2001). Esse produto é amplamente utilizado nos laboratórios do Silsoe Research Institute para realizar avaliações de rotina de pontas de pulverização. Além disso, Gilbert (2000) também indica o uso de surfactante não iônico para a realização de testes do desempenho de pontas.

Foram aplicadas cinco pressões de trabalho ao líquido (200, 250, 300, 350 e 400 kPa) em todos os tratamentos. Para regular a pressão de trabalho foi colocado um sensor de pressão na tubulação, próximo da ponta de pulverização. O sensor foi conectado a um mostrador digital onde era feita a leitura. A pressão de trabalho foi ajustada variando a entrada de ar no recipiente de armazenamento da calda, utilizando uma válvula reguladora de pressão.

O experimento consistiu na medição das forças de impacto das gotas na seção central longitudinal do spray e determinação do fluxo de massa do líquido que passa pela mesma seção do spray onde foram medidas as forças de impacto das gotas.

Foi utilizado o delineamento experimental parcelas sub-subdivididas. Os tratamentos foram organizados no esquema 5 x 4 x 5 (5 diferentes modelos de pontas x 4 vazões x 5 pressões), com 3 repetições. Um conjunto suplementar de ensaios foi realizado para as pontas dos modelos C e D, considerando o esquema de 2 x 5 x 5 (2 vazões x 5 pressões x 5 pontas de cada modelo), visando a análise da variabilidade dos resultados dentro de uma amostra de pontas. Foram utilizadas as pontas 02 e 04.

Na coleta de dados para determinar as forças remanescentes sobre a placa de impacto, realizou-se outro ensaio suplementar com pontas do modelo C de acordo com o esquema 2 x 2 (2 vazões x 2 pressões), com 3 repetições. Foram utilizadas as pontas 02 e 04 nas pressões de 200 e 400 kPa.

Após a coleta dos dados, com as médias das forças de impacto das gotas e os respectivos fluxos

de líquido, foi calculada a velocidade das gotas numa determinada área do spray. Os resultados gerais obtidos no experimento foram submetidos à análise da variância utilizando o SAS<sup>®</sup>. e quando o teste F foi significativo, as médias foram comparadas através do teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Foi calculado, ainda, o desvio padrão das forças de impacto das gotas e do fluxo de líquido.

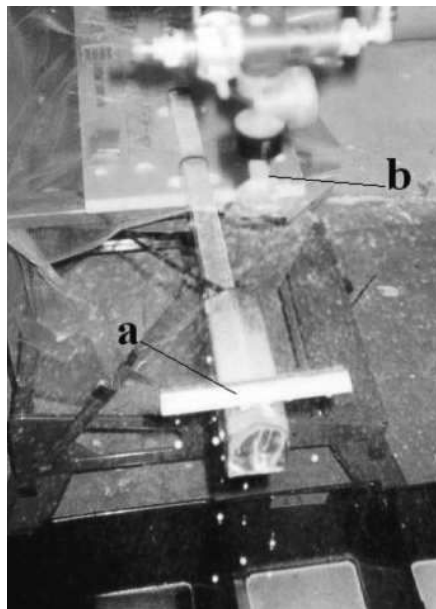
Para medir as forças geradas pelo impacto das gotas do spray foi utilizada uma placa de impacto, medindo 25 por 150 mm, suspensa por uma célula de carga com sensibilidade de 0,005 Newton (Figura 1), baseando-se na descrição de Murphy (2000). A célula de carga foi conectada a um computador para registrar as forças de impacto das gotas da seção do spray que atingiam a superfície sólida da placa.

As forças de impacto foram gravadas no computador no formato texto, usando o software Sprayforce V2.01 (PAUL TWYDELL, 1999, Silsoe Research Institute). O software foi programado para registrar 10 leituras das forças de impacto por segundo. O tempo de coleta de cada amostra foi de 20 segundos. Posteriormente, os dados foram transferidos para o Microsoft Excel<sup>®</sup> onde foram organizados e analisados. Na coleta de dados, a placa de impacto foi posicionada 200 mm abaixo de cada orifício de saída da ponteira, no centro do spray, paralela ao seu maior eixo. A regulagem da pressão de trabalho em cada amostra foi feita antes de iniciar a coleta e o ajuste da pressão foi realizado pulverizando-se durante alguns segundos, usando-se como referência o mostrador digital.

Durante as pulverizações, uma quantidade de líquido permanecia sobre a placa de impacto gerando um erro de leitura. As forças geradas por este líquido foram medidas usando uma ponta de vazão 02 e outra 04 do modelo C, ambas nas pressões de 200 e 400 kPa. Foi utilizado o mesmo procedimento adotado para as coletas do trabalho definitivo, porém, após 10 segundos do início da pulverização foi cortado o fluxo das gotas e mantido o registro das forças de impacto no computador até completar 20 segundos. A média das forças registradas nos últimos 10 segundos de coleta foi subtraída de cada registro das forças em todos os tratamentos.

Para obter a massa de líquido contida nas gotas que atingiram a placa de impacto no tempo

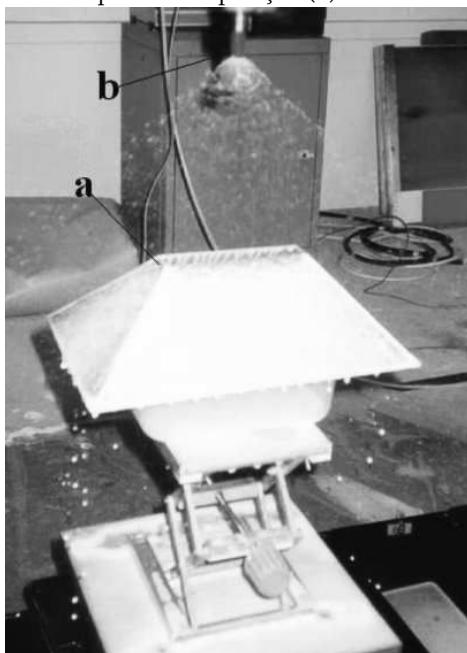
**Figura 1.** Placa de impacto (a) com uma ponta pulverizando (b).



de coleta foi construído um coletor de fluxo com a mesma área de captura que a placa de impacto (Figura 2). Na parte inferior do coletor foi colocado um recipiente para receber e armazenar o líquido que passava pela área de coleta.

O coletor foi alocado na mesma posição que havia sido colocada a placa de impacto, no centro do spray, paralelo com o seu maior eixo, 200 mm abaixo de cada ponta de pulverização. Antes de iniciar a pulverização, foi disposta uma chapa na parte

**Figura 2.** Coletor de fluxo (a) com uma ponta em operação (b).



superior do coletor, fechando a sua entrada. Abriu-se o registro de saída do líquido para iniciar a aspersão e em seguida removeu-se a chapa que estava sobre o coletor. Após 60 segundos de coleta a chapa foi recolocada e o registro de saída fechado. Em seguida o recipiente com o líquido foi levado a uma balança para determinar a massa do líquido.

O fluxo de líquido foi encontrado dividindo a massa do líquido pelo tempo de coleta (Equação 3).

$$F = \frac{M}{T} \quad (1)$$

Onde:

Fl = Fluxo de líquido, kg s<sup>-1</sup>;

Ml = Massa do líquido, kg;

T = Tempo de coleta.

Tendo a força de impacto das gotas sobre uma superfície de área conhecida e o fluxo de massa do líquido que passa na mesma área, foi possível encontrar a velocidade das gotas. Assumiu-se que a massa do líquido que passou pela área de coleta do coletor de fluxo é equivalente a que atingiu a placa de impacto em cada amostra, por terem área de coleta equivalente e as coletas terem sido feitas em igual período de tempo.

Inicialmente, foram ajustadas as unidades dos dados para posteriormente serem divididas as forças

de impacto pelo fluxo, obtendo-se como resultado a velocidade das gotas a 200 mm da ponta, dada em m.s-1 (Equação 4).

$$Vg = \frac{F}{Fl} \quad (2)$$

Onde:

Vg = Velocidade das gotas, m s<sup>-1</sup>;

F = Média das forças de impacto das gotas, N;

Fl = Fluxo de líquido, kg s<sup>-1</sup>.

## Resultados e discussão

A tabela 1 mostra um resumo da nomenclatura utilizada para descrever os tratamentos e os fatores avaliados.

### Forças de impacto das gotas

As forças de impacto das gotas geradas pelas pontas com indução de ar, trabalhando de 200 a 400 kPa de pressão, apesar de normalmente serem menores, mostraram maior variabilidade do que as geradas pelas pontas convencionais equivalentes, em todas as pressões estudadas (Figura 3).

As forças de impacto das gotas geradas pelas pontas de pulverização 04 foram maiores que as

**Tabela 1.** Denominação dos tratamentos e descrição dos fatores avaliados.

Denominação dos tratamentos	Fatores avaliados
Modelo A	IA - indução de ar - Billericay Farm Services
Modelo B	IA - indução de ar - Hardi International
Modelo C	IA - indução de ar - Spraying Systems
Modelo D	IA - indução de ar - Sprays International
Modelo E	XR - convencional - Spraying Systems
Vazão 015	110015
Vazão 02	11002
Vazão 03	11003
Vazão 04	11004
Pressão 200	200 kPa
Pressão 250	250 kPa
Pressão 300	300 kPa
Pressão 350	350 kPa
Pressão 400	400 kPa

geradas pelas pontas 02 equivalentes. Esse fato pode ser parcialmente explicado pelo aumento da vazão na passagem das pontas 02 para 04.

As forças de impacto das gotas geradas pelas pontas de pulverização com indução de ar possuem maior variabilidade que as geradas pelas pontas convencionais trabalhando nas mesmas condições. Desta forma, as pontas com indução de ar geram gotas de tamanho maior e em menor número em relação às pontas convencionais equivalentes, mantida a mesma vazão.

### Fluxo de massa do líquido

A média do fluxo de massa de líquido de três repetições, utilizando as pontas da série C com indução de ar e da série E convencional com vazões 02 e 04, é apresentada na figura 4. Os resultados obtidos mostram que o fluxo de massa aumenta com o aumento da pressão de trabalho e com a utilização de pontas de pulverização com vazões maiores, como esperado. A média do fluxo de massa nas pontas com indução foi superior às convencionais equivalentes, especialmente para as 02.

### Velocidade das gotas

A velocidade das gotas é menor para as pontas de pulverização com indução de ar em relação às convencionais, concordando com Butler-Ellis et al.

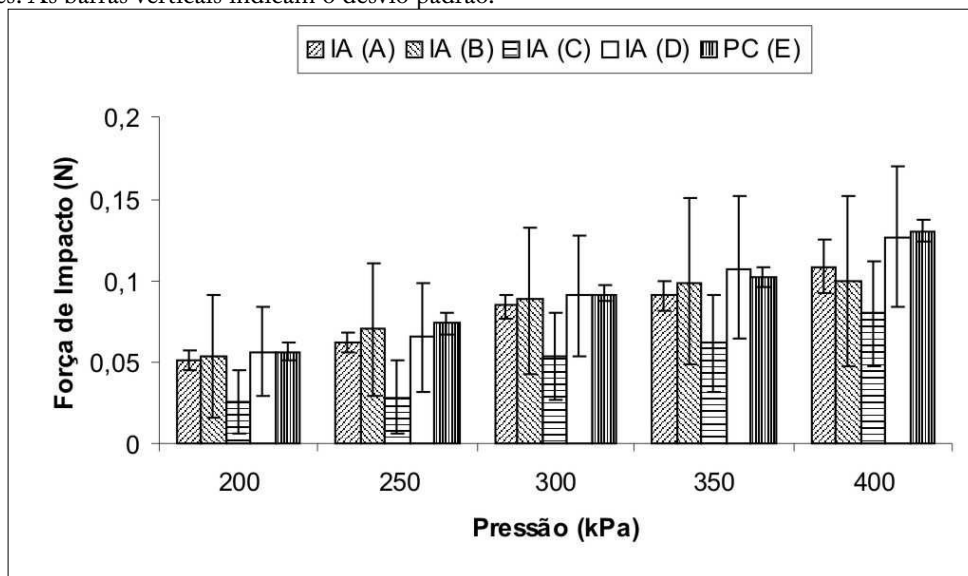
(2001) que encontraram resultados semelhantes usando uma calda com surfactante. Além disso, utilizando pontas convencionais de pulverização, esses autores verificaram que a velocidade das gotas foi a mesma em soluções contendo surfactante ou apenas água.

Da mesma forma que para as pontas 02 a figura 5 mostra que as gotas geradas pelas pontas de pulverização convencionais apresentam maior velocidade que as gotas geradas pelas com indução de ar, também para as pontas com vazão 04 nas diferentes pressões estudadas (FAGGION, 2002).

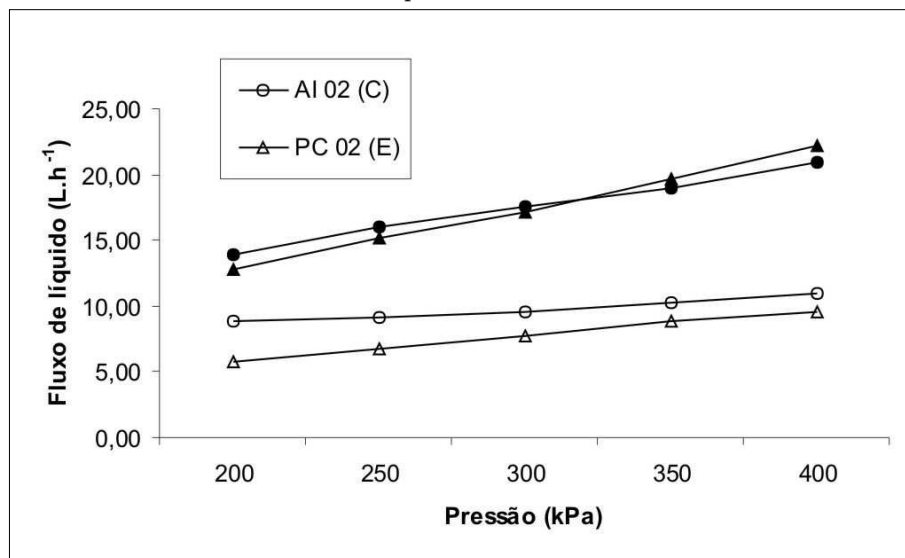
A velocidade das gotas aumenta com a diminuição da porcentagem de ar capturado para a maioria das pontas de pulverização 02 e 04, trabalhando a 300 kPa de pressão. Esses resultados foram esperados, pois a presença de ar dentro das gotas aumenta o seu diâmetro e diminui a sua densidade. Em consequência, a velocidade de deslocamento das gotas reduz pela força de resistência à passagem oferecida pelo ar.

A maior velocidade das gotas de maior densidade induz-nos a pensar que essas gotas sofrem menor efeito de deriva. No entanto, as gotas com menor densidade devido à presença de ar em seu interior podem sofrer menor efeito de deriva, provavelmente por serem de tamanho maior e possuírem maior massa.

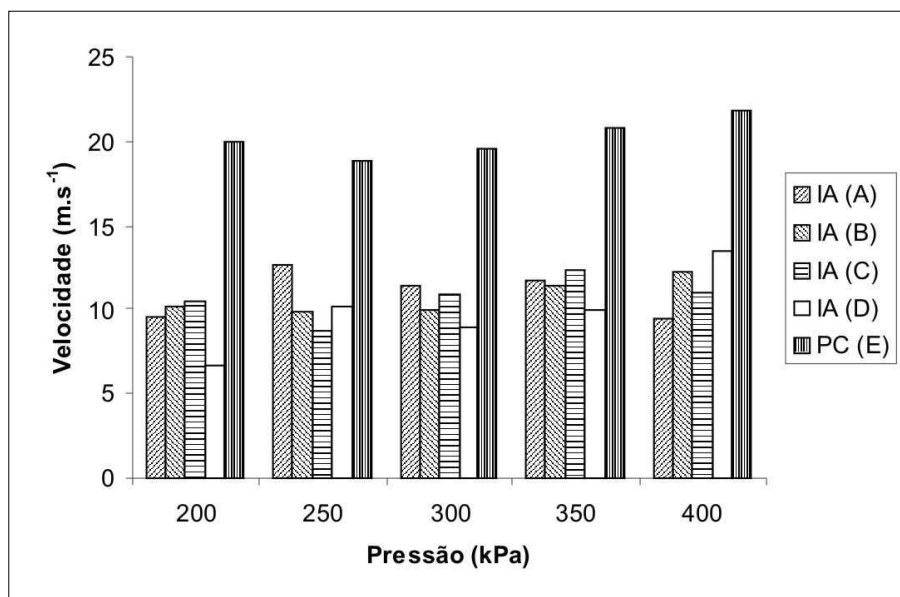
**Figura 3.** Forças de impacto das gotas geradas por pontas de pulverização 04, trabalhando em diferentes pressões. As barras verticais indicam o desvio padrão.



**Figura 4.** Fluxo de massa de líquido de duas pontas 02 (vazio) e 04 (cheio), uma com indução de ar e outra convencional, trabalhando de 200 a 400 kPa de pressão.



**Figura 5.** Velocidade das gotas geradas por pontas de pulverização 04 trabalhando em diferentes pressões.



A velocidade média calculada das gotas 200  $\mu\text{m}$ , abaixo da ponteira da ponta convencional 015, trabalhando a 300 kPa de pressão, foi de 23,76 m.s<sup>-1</sup>. Miller (1993) encontrou velocidade das gotas próxima de 20 m.s<sup>-1</sup> utilizando o equipamento Aerometrics spray analyser para uma ponta com as mesmas características, trabalhando na mesma

pressão e utilizando água com 0,1% de um surfactante não iônico. Através de uma representação gráfica esse autor mostra que Dombrowski e Jones (1963) encontraram velocidades da lâmina formada na saída da ponteira entre 15 a 25 m.s<sup>-1</sup>.

A medida das forças de impacto mostra maior variabilidade das forças de impacto das gotas do spray

gerado por pontas de pulverização, com indução de ar, em relação às convencionais equivalentes. A maior variabilidade das forças indica que as pontas com indução de ar geram menor número de gotas e com massa variável, algumas dessas com massa maior que as maiores gotas geradas pelas pontas convencionais equivalentes.

## **Conclusões**

É possível medir as forças de impacto das gotas utilizando uma placa de impacto com alta sensibilidade e armazená-las num computador. Este método detecta maior variabilidade das forças de

impacto das gotas geradas por pontas de pulverização com indução de ar em relação às convencionais.

A partir da coleta do líquido pulverizado é possível medir o fluxo de líquido que passa pela mesma secção de coleta da placa de impacto.

Tendo as forças de impacto das gotas e o fluxo de líquido que passa pela mesma área é possível calcular a velocidade das gotas numa determinada posição do spray.

## **Referências**

Apresentadas no final da versão em inglês.