

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE FORMAÇÃO DE GOTAS EM ASPERSORES JATO-PLACA

Marcelo Bacci da Silva

Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Mecânica
mbsilva@mecanica.ufu.br

Alexandre Antônio Santana

Eduardo Borges de Miranda

Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Mecânica
xande-santana@bol.com.br

Aristeu da Silveira Neto

Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Mecânica
aristeus@mecanica.ufu.br

Resumo. O propósito deste trabalho é apresentar uma metodologia que permita realizar a análise de parâmetros que influenciam o fenômeno de geração de gotas em aspersores jato-placa. O conhecimento dos mecanismos que influenciam a formação de gotas em sistemas aspersores do tipo jato-placa permite reduzir o consumo de água e de energia, além de contribuir para melhoria da produção agrícola. A metodologia usada para quantificar o espectro de gotas é baseada na técnica de filmagem com uma câmera de alta velocidade, para capturar os fenômenos de alta frequência, visando melhor compreender os aspectos físicos envolvidos. Por meio desta metodologia, é possível caracterizar o espectro de gotas geradas pelos sistemas aspersores comerciais, bem como propor novos tipos de sistemas aspersores jato-placa. Os resultados já obtidos demonstram a viabilidade desta metodologia.

Palavras chave: tamanho médio de gotas, sistema jato-placa, planejamento experimental, filmagem rápida

1. Introdução

O objetivo deste estudo é apresentar uma metodologia experimental que permita analisar os parâmetros que influenciam a geração de gotas num sistema aspersor jato-placa. Foi, então, conduzida uma investigação experimental dos mecanismos de formação de gotas e da distribuição de diâmetros de gotas de um sistema aspersor jato-placa comercial. Este tipo de aspersor é utilizado em sistemas de irrigação do tipo pivot central, e o conhecimento dos mecanismos e das variáveis que influenciam no tamanho e no número das gotas formadas pode ser de grande ajuda para que se possa otimizar tais sistemas, permitindo ainda a redução no consumo de água e de energia.

Encontram-se na literatura artigos que revisam os mecanismos de formação de gotas e de distribuição de tamanho de gotas para sistemas jato-placa (McCreery and Stoots, 1996; van Der Geld and Vermeer, 1994; Hsing and Tankin, 1996). De acordo com esses trabalhos, o fenômeno de geração de gotas é governado pela tensão superficial, forças aerodinâmicas e viscosas e em todos esses trabalhos, a distribuição dos diâmetros das gotas foi obtida com um analisador de partículas Doppler, ou por meios de técnicas de fotografia.

Fenômenos como a estrutura turbulenta da superfície do jato de líquido, o escoamento do líquido através da placa aspersora, o filme de líquido que se forma após a placa, as instabilidades no filme líquido, e a quebra do filme de líquido em gotas, foram observados e descritos por Tarqui (1996) e Amorim et al. (1999).

Neste artigo, a metodologia experimental para quantificar o espectro de gotas geradas no sistema aspersor jato-placa, é baseada na técnica de filmagem em alta velocidade, para capturar os fenômenos de alta frequência, e determinar a distribuição de diâmetro das gotas e melhor compreender as questões físicas envolvidas. Um estudo quantitativo dos fenômenos a alta frequência, como no caso da formação de gotas em sistemas aspersores jato-placa, é necessário para especificar a estrutura e a geometria das gotas, conforme mencionado no trabalho de McCreery and Stoots (1996)

A metodologia experimental e os resultados obtidos são descritos no trabalho. Para melhor compreender como as variáveis do sistema jato-placa influenciam a distribuição do diâmetro das gotas, foi utilizado um planejamento experimental.

2. Metodologia Experimental

O sistema aspersor jato-placa investigado neste estudo é composto de um bico ejetor, o qual projeta um jato de líquido contra uma placa aspersora, como ilustrado na Fig. (1). O jato é concêntrico com a placa e um filme de líquido se forma após a placa. O filme de líquido escoo na direção radial para fora da placa, e então se quebra em gotas.

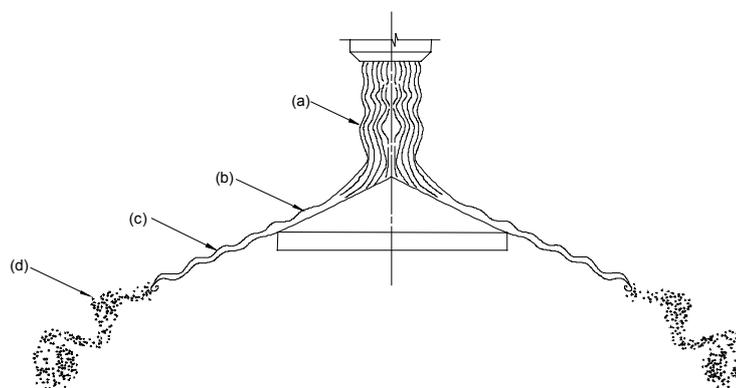


Figura 1. Sistema aspersor jato-placa: (a): jato de líquido; (b): filme líquido sobre a placa; (c): filme líquido livre; (d): formação de gotas.

O conhecimento das etapas de formação de gotas em sistemas aspersores jato-placa é de fundamental importância para a redução de consumo de água e de energia, melhorando a uniformidade da área irrigada, reduzindo os efeitos indesejáveis de erosão do solo e de evaporação de volume de água, e dessa forma otimizando a produção agrícola. Todas essas melhorias dependem do conhecimento da distribuição de gotas e do fenômeno físico que determina os mecanismos de formação e distribuição de tamanho das gotas. Neste trabalho foram investigadas as influências de 4 variáveis no tamanho e na distribuição das gotas: o diâmetro do bico ejetor, a vazão do sistema, o espaçamento bico-placa, e o tipo de superfície de placa aspersora. Um sistema aspersor jato-placa utilizado no estudo é apresentado na Fig.(2).

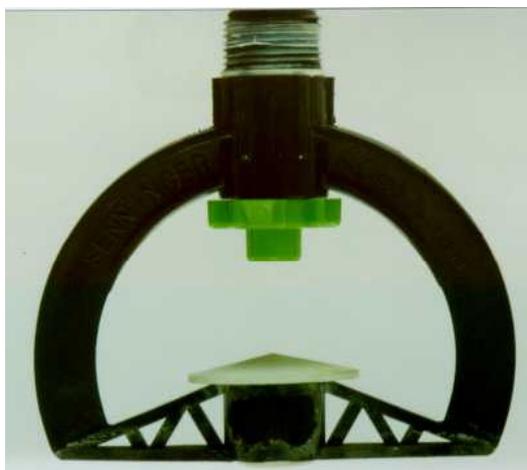


Figura 2. Sistema aspersor jato-placa típico.

A bancada experimental usada para se investigar a formação das gotas é apresentada no esquema da Fig. (3). Ao entrar em funcionamento, a água flui, a partir de um reservatório, até o bico ejetor do sistema aspersor, o qual projeta um jato de líquido contra uma placa aspersora, formando um lençol de líquido que, posteriormente, quebra-se em gotas. As imagens das gotas geradas no sistema são, então, capturadas pela câmera filmadora e digitalizadas para permitir um tratamento quantitativo por um software de tratamento de imagens adequado. No presente trabalho é utilizado o software *Global Lab*. Os resultados encontrados no programa *Global Lab* são apresentados na forma de tabelas e, em seguida, transferidos para um software de estatística.

Um diagrama esquemático para o aparato experimental é apresentado na Fig. (4) a seguir. Para conseguir resultados em unidades adequadas às aplicações, o software de tratamento de imagens necessita ser calibrado, sendo necessário inserir um elemento de referência junto às imagens das gotas, por exemplo, uma esfera de aço, cujo diâmetro é conhecido. Então, quando as imagens são capturadas, esta esfera de referência também aparece, e pode-se comparar o tamanho das gotas com o valor do diâmetro dessa esfera de calibração.

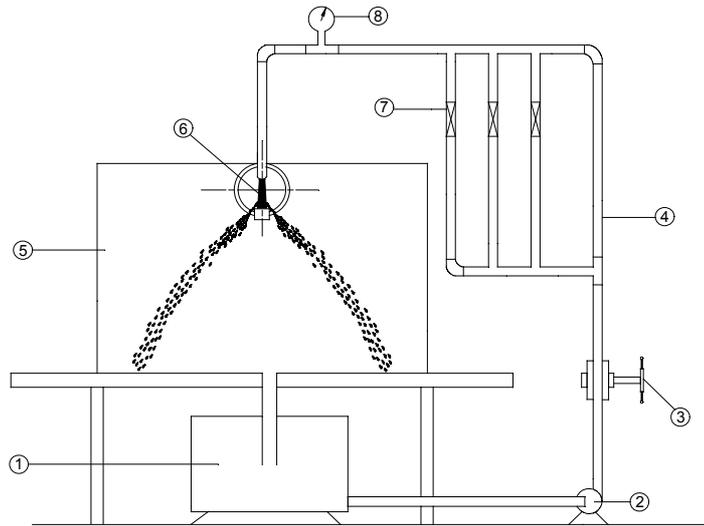


Figura 3. Aparato experimental; (1): reservatório de água; (2): bomba centrífuga de capacidade 2,24 kW; (3): válvula para controle da vazão; (4): tubulação de PVC de 25 mm de diâmetro; (5): caixa coletora de água; (6): bico ejetor e placa aspersora; (7): rotômetros; (8): manômetros.

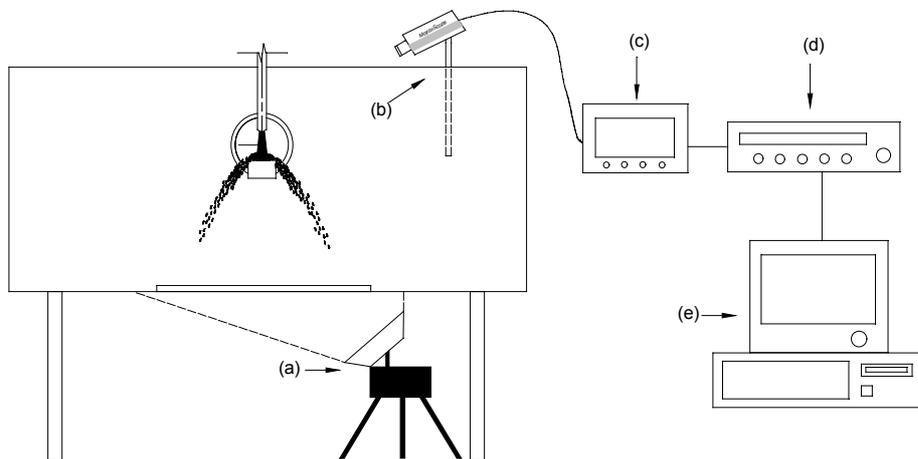


Figura 4. Diagrama esquemático do aparato experimental; (a): lâmpada de 1 kW; (b): câmera filmadora de alta velocidade; (c): monitor da câmera filmadora; (d): vídeo super VHS; (e): computador com a placa de aquisição de imagens.

Um espectro de gotas típico que é produzido pelos sistemas aspersores jato-placa é apresentado na Fig.(5) a seguir.



Figura 5. Imagens típicas das gotas capturadas usando o sistema de filmagem rápida.

As imagens mostrando os detalhes das gotas geradas no sistema aspersor jato-placa comercial utilizado nos experimentos são apresentadas na Fig. (6).

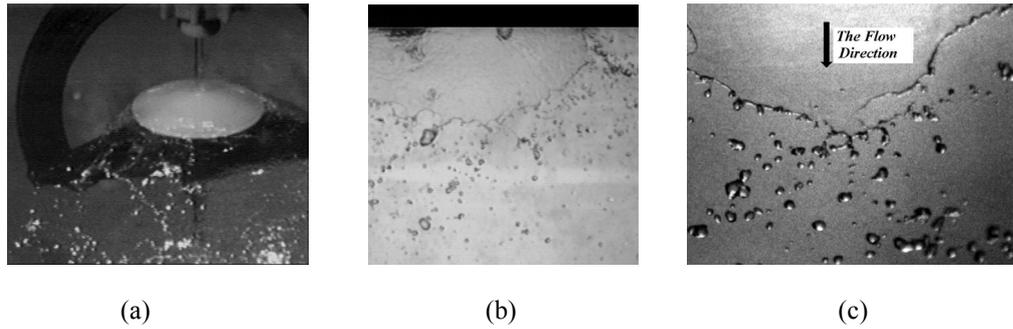


Figura 6. Seqüência de imagens das gotas: (a): bico ejetor e placa aspersora; (b): filme de líquido que se forma após a placa aspersora; (c): detalhes das gotas formadas.

Para calibrar o software de tratamento de imagens, visando medir os diâmetros das gotas, uma imagem do espectro de gotas com uma esfera de aço de 4 mm de diâmetro é obtida nos experimentos, conforme indicada na Fig. (7).

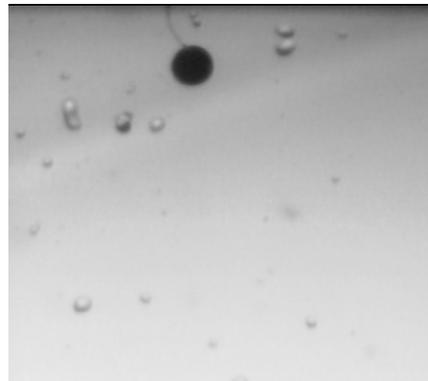


Figura 7. Esfera de calibração.

Na seqüência, as imagens das gotas foram digitalizadas e, após etapas de filtragem do software, foi possível de se determinar os diâmetros das gotas. O software Global Lab foi utilizado neste trabalho, o qual determina o diâmetro de cada gota, de acordo com o sistema de calibração estabelecido anteriormente.

Os experimentos foram realizados para medir os efeitos das variáveis de controle na resposta. Utilizando um planejamento experimental antes de iniciar as filmagens, a quantidade de experimentos a serem realizados fica estabelecida, e os resultados dos efeitos das variáveis na resposta do sistema podem ajudar na identificação e quantificação de variáveis importantes no processo. Os planejamentos fatoriais são extremamente úteis para este propósito, especialmente os planejamentos fatoriais a dois níveis, porque são econômicos e fáceis de serem utilizados, e podem fornecer informações valiosas dos experimentos, de acordo com Box *et al.* (1978). Com a finalidade de conduzir os experimentos de maneira adequada e melhor compreender a influência das variáveis nos resultados, foi escolhido um planejamento fatorial 2^4 , conforme descrito em Box *et al.* (1978). Os níveis das 4 variáveis selecionadas no estudo, o diâmetro do bico ejetor (d_b), representado pela variável X_1 , a vazão do sistema (Q), que é a variável X_2 , o espaçamento bico-placa (h), representado pela variável X_3 , e a geometria da placa, representada pela variável X_4 , são apresentados na Tabela (1) a seguir. Os níveis que aparecem na Tabela (1) representam os valores de máximo, nível (+1), e de mínimo, nível (-1), de cada variável analisada e dependem do sistema experimental.

A Tabela (1) mostra um experimento fatorial 2^4 no qual existem três variáveis quantitativas, diâmetro do bico ejetor (d_b), vazão do sistema (Q), espaçamento bico-placa (h) e uma variável qualitativa, a geometria da placa.

Tabela 1. Matriz de planejamento fatorial 2^4 .

Variáveis	Nível (+1)	Nível (-1)
X_1 : d_b [mm]	8,73	5,15
X_2 : Q [cm^3/s]	208,33	87,5
X_3 : h [mm]	40	24
X_4 : geometria da placa	cônica	plana

3. Resultados

Através do uso do planejamento fatorial esquematizado na Tabela (1), pode-se estimar os efeitos de cada uma das variáveis no sistema e verificar a influência correspondente na resposta obtida. Após a realização dos experimentos e do tratamento das imagens pelo software *Global Lab*, os resultados obtidos são os diâmetros médios das gotas num sistema de unidades adequado, mm por exemplo. A Tabela (2) mostra os dados com os níveis das variáveis codificadas, onde para as variáveis quantitativas, o nível (-1) representa o menor valor assumido pela variável no experimento, e o nível (+1) representa o maior valor que essa variável pode assumir nos experimentos, sendo que para a variável qualitativa os dois níveis podem ser convenientemente codificados pelos sinais de (+1) e de (-1).

Tabela 2. Resultados obtidos no planejamento fatorial 2⁴.

Experimento	X ₁ (d _b)	X ₂ (Q)	X ₃ (h)	X ₄ (geometria da placa)	Diâmetro da Gota [mm]
1	-1	-1	-1	-1	1,063
2	+1	-1	-1	-1	1,820
3	-1	+1	-1	-1	0,674
4	+1	+1	-1	-1	0,940
5	-1	-1	+1	-1	1,781
6	+1	-1	+1	-1	3,390
7	-1	+1	+1	-1	0,990
8	+1	+1	+1	-1	2,360
9	-1	-1	-1	+1	1,180
10	+1	-1	-1	+1	2,090
11	-1	+1	-1	+1	0,622
12	+1	+1	-1	+1	1,000
13	-1	-1	+1	+1	1,823
14	+1	-1	+1	+1	2,668
15	-1	+1	+1	+1	0,913
16	+1	+1	+1	+1	1,885

Conforme se observa na Tabela (2), cada linha representa uma condição experimental, ou um teste a ser realizado na bancada experimental da Fig. (4). O resultado de cada teste é um conjunto de imagens de gotas. Após o tratamento das imagens no software *Global Lab*, o resultado final de cada teste é o diâmetro médio das gotas, como apresentado na Tabela (2). Os efeitos das variáveis no diâmetro das gotas e o nível de significância (α) das variáveis são apresentados na Tabela (3), sendo este o resultado final do tratamento estatístico dos resultados.

Tabela 3. Nível de Significância das variáveis.

Fator	Efeitos	Nível de Significância (α)
X ₁	0,888	0,0003
X ₂	-0,804	0,0005
X ₃	0,803	0,0006
X ₄	-0,105	0,3560
X ₁ .X ₂	-0,141	0,2260
X ₁ .X ₃	-0,311	0,0295
X ₂ .X ₃	-0,112	0,3250
X ₁ .X ₄	-0,075	0,5010
X ₂ .X ₄	-0,031	0,7720
X ₃ .X ₄	-0,203	1,1050

O mecanismo de formação de gotas é governado por muitos parâmetros. Um importante aspecto do mecanismo de formação das gotas é o conhecimento das interações entre as fases gasosa e líquida, de acordo com o trabalho de McCreery and Stoots (1996). Logo, é importante conhecer como as características do escoamento influenciam o diâmetro das gotas. A vazão do sistema e as condições geométricas, como o diâmetro do bico ejetor e o espaçamento bico-placa, tem uma influência na formação das gotas, conforme se observa na Tabela (3), e os tipos de geometria da placa aspersora usados nos testes, não influenciaram o diâmetro das gotas.

Como pode ser observado na Tabela (3), as variáveis que mais influenciaram no diâmetro das gotas foram, em ordem de importância, o diâmetro do bico ejetor, a vazão do sistema e o espaçamento bico-placa. Este resultado foi observado através do teste de hipóteses, onde a máxima probabilidade de erro admitida é 5%, ou, $\alpha < 0,05$. De acordo com esses resultados, o diâmetro médio das gotas permanece o mesmo para os dois tipos de geometria da placa investigadas no estudo. A variável qualitativa geometria da placa não influencia significativamente o diâmetro das gotas ($\alpha = 0,36$). Os resultados apresentados na Tabela (3) ainda mostram que a dependência da distribuição dos diâmetros das gotas com o espaçamento bico-placa é menos dramática que a dependência com o diâmetro do bico ejetor e com a vazão do sistema.

A Figura (8) mostra a dependência do diâmetro médio das gotas com o diâmetro do bico ejetor, e, conforme se pode observar, há uma relação linear que foi quantificada.

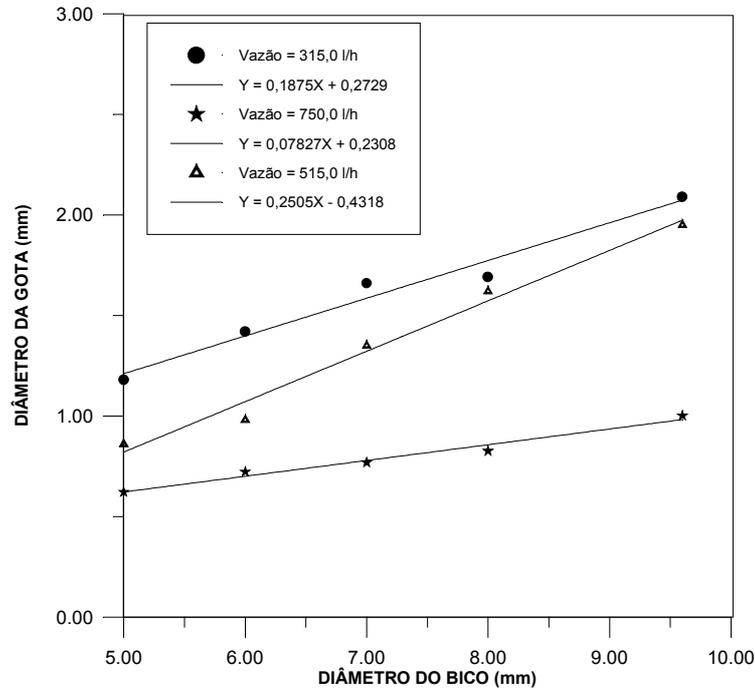


Figura 8. Gráfico do diâmetro da gota em função do diâmetro do bico ejetor usando placa aspersora convexa.

Considerando os números adimensionais de Reynolds e de Weber, o comportamento do diâmetro médio das gotas é apresentado nas figuras seguintes.

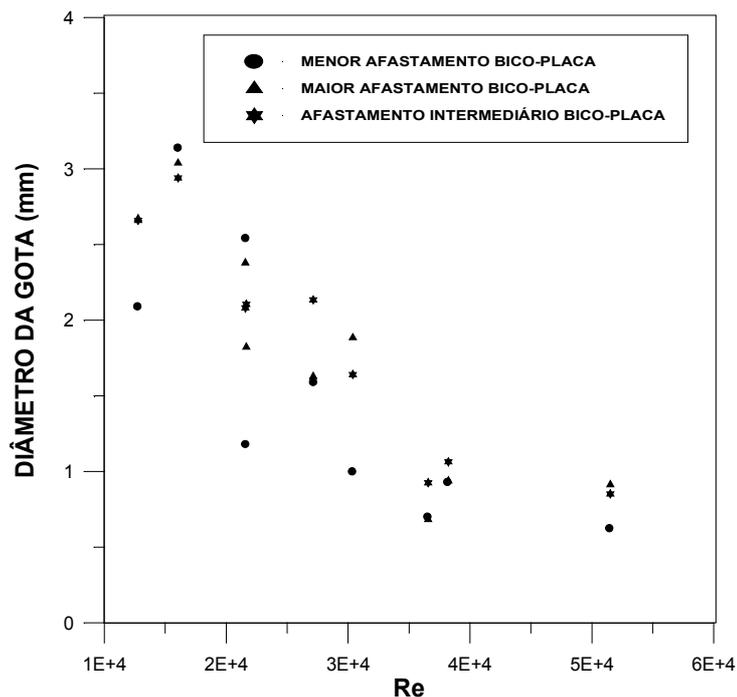


Figura 9. Variação do diâmetro médio das gotas com o número de Reynolds e com o afastamento bico-placa.

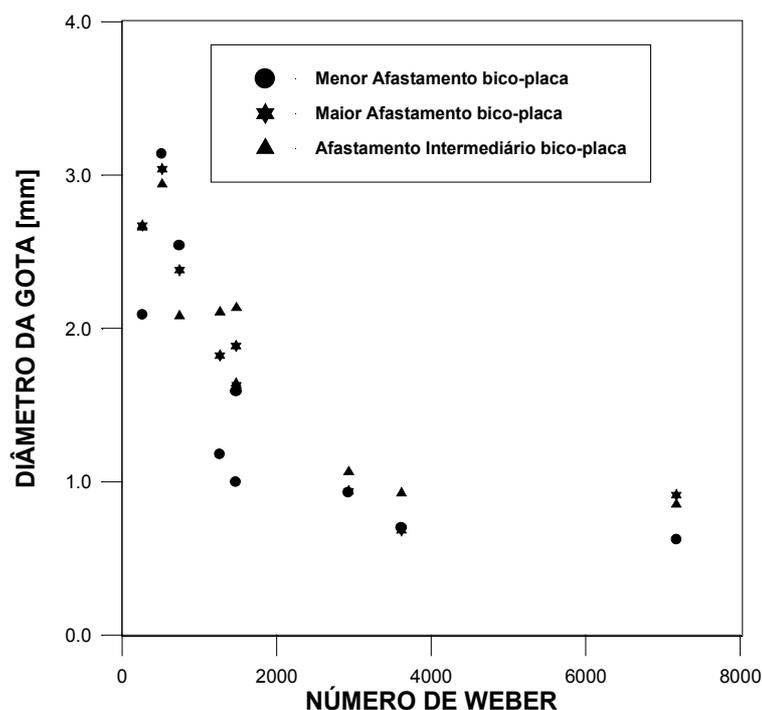


Figura 10. Variação do diâmetro médio das gotas com o número de Weber.

Os resultados apresentados na Fig. (9) apontam para um comportamento em que o diâmetro médio das gotas diminui com o aumento do número de Reynolds. Essa tendência no comportamento do diâmetro médio das gotas é fisicamente consistente, uma vez que o aumento no número de Reynolds aproxima-se da condição operacional de atomização, que é caracterizada por números de Reynolds elevados e formação de gotas de pequenos diâmetros. O mesmo resultado é verificado em relação ao número de Weber, conforme a Fig. (10). Por outro lado, pelas figuras apresentadas, observa-se que a influência do afastamento da placa aspersora não é importante, pois todas as curvas são muito próximas.

4. Conclusão

A distribuição do diâmetro de gotas para um sistema aspersor jato-placa foi determinada usando a técnica de filmagem com uma câmera de alta velocidade, e um diâmetro médio foi calculado para cada distribuição.

Um planejamento fatorial 2^4 foi efetuado e os resultados encontrados quantificam a influência do diâmetro do bico ejetor, o espaçamento bico-placa, a vazão do sistema e o tipo de geometria da placa no diâmetro médio das gotas geradas no sistema aspersor.

Em geral, o diâmetro médio das gotas aumenta com o diâmetro do bico ejetor e diminui com o aumento da vazão do sistema. A dependência da distribuição dos diâmetros das gotas com o espaçamento bico-placa não é tão significativa quanto a dependência com o diâmetro do bico ejetor e com a vazão do sistema. A geometria da placa não influencia o diâmetro da gota.

Também foi analisada a influência dos números adimensionais de Reynolds e de Weber no diâmetro médio das gotas, e os resultados apontam para um comportamento em que o diâmetro médio das gotas diminui com o aumento desses dois números adimensionais, conforme os valores utilizados nos experimentos.

Um planejamento fatorial 3^3 deverá ser aplicado em trabalhos futuros, para melhor especificar a dependência da distribuição do diâmetro médio das gotas com o diâmetro do bico ejetor, com a vazão do sistema e com o espaçamento bico-placa.

5. Referências

- Amorim, L.M., Silva, M.B. and Silveira Neto, A.,1999, "Experimental Investigation of the Flow Transition Over a Spray Nozzle-Plate System", Two-Phase Flow Modelling and Experimentation, Vol.3, Pisa, Italy, pp. 1929-1935.
- Box, G.E.P., Hunter, W.G, Hunter, J.S., 1978, "Statistical for Experimenters – An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building", Ed. Edgard Blücher, S.Paulo, Brazil, 428 p.
- Hsing, P.C. and Tankin, R.S., 1996, "Measurement of Droplet Size, Velocity, and Temperature Distributions in Rayleigh Flow", Experiments in Fluids, 22, pp. 144-152.

- Kincaid, D.C., 1993, "Sprinkler Droplet Kinetic Energy and Erosion Potential", ASAE paper 93102, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI.
- McCreery, G.E. and Stoots, C.M., 1996, "Drop Formation Mechanisms and Size Distributions for Spray Plate Nozzles", Int. J. Multiphase Flow, Vol. 22, N° 3, pp. 431-452.
- Van Der Geld, C.W.M. and Vermeer, H., 1994, "Prediction of Drop Size Distributions in Sprays Using the Maximum Entropy Formalism: The Effect of Satellite Formation", Int. J. Multiphase Flow, Vol. 20, N°2, pp. 363-381
- Tarqui, J.L.Z., 1996, "Desenvolvimento de um Método de Fotografia para o Estudo de Fenômenos de Altas Freqüências em Aspersores Jato-Placa", Dissertação de Mestrado, Vol.3, pp. 149-167.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF DROP FORMATION OVER A SPRAY NOZZLE-PLATE SYSTEM

Marcelo Bacci da Silva

Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Mecânica
mbsilva@mecanica.ufu.br

Alexandre Antônio Santana

Eduardo Borges de Miranda
Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Mecânica
xande-santana@bol.com.br

Aristeu da Silveira Neto

Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Mecânica
aristeus@mecanica.ufu.br

Abstract. *A fundamental knowledge of drop formation in a spray nozzle-plate system permits reduction of water and energy consumption, thus improving the agricultural production. The object of this study is to present an experimental methodology that conducts to analysis of parameters that influence the drop generation over a spray nozzle-plate system. The methodology used to quantify the drop spectrum is based in high speed images recording technique to capture the high frequency phenomena in order to better understand the physics aspects involved. By means of this methodology, it is possible to characterize the drop spectrum of the existing spray-nozzle systems and also to suggest new types of these systems. Preliminary results demonstrate the viability of this methodology, which, in turn, can lead to broad practical application.*

Keywords. *drop spectrum, mean drop size, high speed recording, spray nozzle-plate, experimental design*