

## ESTUDO EXPERIMENTAL DE JATOS EVAPORATIVOS

**Marcelo Mendes Vieira** – mmendes@usp.br

**Marcelo Silva Guimarães** – marcsg@usp.br

**José R. Simões-Moreira** – jrsmoes@usp.br

Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Mecânica

SISEA - Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos

Caixa Postal 61548 – 05508-900 – São Paulo, SP, Brasil

***Resumo.** Este trabalho tem o objetivo de apresentar os estudos experimentais realizados com jatos evaporativos. A substância utilizada é o querosene. O jato evaporativo em estudo é emergente de um bocal cônico-convergente, com 10° de semi-ângulo e diâmetro de saída de 0,3 mm, que descarrega em uma câmara de baixa pressão controlada. O líquido ao passar pelo bocal sofre uma expansão alcançando elevados graus de superaquecimento. No experimento são controladas as condições de pressão e temperatura de injeção e o líquido é injetado durante cerca de 1 s, suficiente para que as condições de regime permanente sejam estabelecidas. O método para a visualização do escoamento do jato é o "schlieren" o qual oferece a oportunidade de visualizar o gradiente de densidade do fluido na região do escoamento. Com isso, pode-se estudar a estrutura do jato e, com o auxílio de ferramentas de filtragem matemática e manipulação das imagens obtidas, é possível analisar o jato emergente de forma qualitativa. Os perfis dos jatos observados são: (1) contínuo, (2) pulverizante e (3) evaporação completa do líquido com formação de ondas de choque. Neste último caso, a inspeção das fotografias indicam que a evaporação do líquido se dá na sua superfície que resulta um jato evaporativo de formato aproximado a um cone.*

***Palavras-chave:** Ondas de evaporação, Líquido metaestável, Evaporação, Mudança de fase, Schlieren.*

### 1. INTRODUÇÃO

Sob determinadas condições, quando uma interface de líquido é exposta de forma súbita a um ambiente de baixa pressão, observa-se a formação de uma onda de evaporação (Hill, 1991 e Simões-Moreira, 1994) que pode ocorrer sob a condição de uma queda abrupta da pressão do líquido (na literatura inglesa este fenômeno é dito como "flashing") e é observada em jatos de líquidos evaporativos. Neste caso, durante a súbita expansão do líquido, é possível observar uma interface que separa a fase líquida, logo na saída do bocal, e a mistura bifásica resultante da evaporação do líquido. Esta interface é própria de uma onda evaporativa. Kurschat *et al.* (1992) relatam tal observação e destacam também a formação de uma onda de choque que ocorre devido ao escoamento supersônico obtido após a onda de evaporação. Eles utilizaram uma substância do tipo SCME (Substância de Complexidade Molecular Elevada)

que possibilita a evaporação completa do fluido em um processo adiabático (Thompson e Sullivan, 1975 e Simões-Moreira, 1997). Para a análise da estrutura do jato evaporativo, isto é uma vantagem, pois estas substâncias alcançam valores de título próximos ou iguais ao valor unitário, referente à mistura bifásica, na expansão do jato na câmara, oferecendo uma maior clareza nas imagens obtidas. Como foi visto, Rietz (1990), Kurschat *et al.* (1992) e Athans e Hirsra (1995) utilizaram, no estudo destes jatos evaporativos, métodos ópticos como interferometria, visualização com a iluminação por detrás ("shadowgraph") e iluminação lateral (seja o feixe expandido ou em forma de lâmina).

Este trabalho tem o objetivo de analisar a estrutura destes jatos evaporativos. O líquido utilizado é o querosene que possui um comportamento das substâncias do tipo SCME. O método óptico utilizado é o "schlieren" que oferece condições para analisar o gradiente de densidade ao longo do escoamento do fluido com o processamento matemático das imagens, além de destacar a formação de possíveis ondas de choque e ondas de evaporação. A análise dos jatos é feita de forma qualitativa através dos registros fotográficos. Foram observados os seguintes tipos de jatos: (1) contínuo, (2) pulverizante e (3) evaporação na superfície, dependendo do grau de superaquecimento do líquido.

A aplicação deste estudo em sistemas de injeção de combustíveis (Oza, 1984) e em dispositivos de expansão de ciclos de refrigeração, são as principais motivações para realização deste trabalho. No caso da aplicação em ciclos de refrigeração, os dispositivos empregados nestes sistemas como, válvulas de expansão ou tubos de orifício, têm sob suspeita a formação de tais fenômenos evaporativos.

## 2. BANCADA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A bancada experimental foi construída para testar os jatos evaporativos. Para isso, são controladas, principalmente, a pressão e a temperatura de injeção do líquido e a pressão da câmara onde o jato é descarregado. Sendo assim, foi dividida a bancada em vários sistemas que são responsáveis pelo controle dessas variáveis e pela aquisição das imagens do jato e que estão esquematizados na Fig. 1, com exceção do sistema de aquisição de dados. No entanto, todos serão relatados a seguir.

Inicialmente, tem-se o sistema de vácuo e pressurização que é responsável pelo controle e manutenção da pressão ambiente onde o jato é expandido. Seu reservatório e a seção de observação do jato possuem um total de 440 litros. Estimativas indicaram que esse volume é suficiente para proporcionar uma segurança de até dois jatos de testes, de volume de 3 cm<sup>3</sup> de n-dodecano líquido, sem que pressão da câmara demasiadamente. Para a obtenção de vácuo, uma bomba de vácuo de 18 m<sup>3</sup>/h de fabricação da Edwards, modelo E1M18, é acionada. Antes da mesma, instalou-se um condensador de vapores (também conhecido "vacuum trap"), como ilustrado no esquema geral da Fig. 1, para resfriar os gases succionados a fim de condensar e drenar os vapores que causariam a contaminação do óleo da bomba, e por consequência a deterioração da mesma, sobretudo se for o vapor de água. Um manômetro de coluna de mercúrio mede a pressão do reservatório na faixa de 2,5 a 200 kPa abs, sendo sua precisão de 0,094 kPa. Faixas entre 0,010 e 2,500 kPa abs, é utilizado o vacuômetro analógico da marca Edwards de medição absoluta e precisão de 0,054 kPa. Todas estas precisões são analisadas para uma confiabilidade de 95%. Devido aos riscos de ignição espontânea do líquido injetado, faz-se necessário preencher o volume total com gás nitrogênio, pelo sistema de pressurização até alcançar a pressão absoluta de ensaio desejada.

Destacando o injetor, tem-se em sua construção, basicamente, dois tubos anulares e concêntricos sendo o tubo interno preenchido em seu interior pelo fluido de teste alimentado pela linha do sistema de injeção. Este tem a função de injetar no intervalo tempo de 1 s a pressão constante. Para isto, a ponta da haste, solidária ao cilindro pneumático (ver Fig. 1), de

10 mm de diâmetro e 10 mm de curso, determina o tempo de abertura desobstruindo o canal do bocal e, o fechamento. Este bocal, situado no topo do injetor, é do tipo cônico convergente, feito de aço-carbono e usinado pelo processo de eletroerosão. Seu diâmetro na saída do bocal é de 0,3 mm, na entrada é de 3,0 mm, seu comprimento é de 8,0 mm e a metade do seu ângulo de cone é de 10°. Junto à entrada deste bocal, está um termopar do tipo T, de bitola AWG 30, da marca Omega, para medição da temperatura do líquido. Um transdutor de pressão da marca Kulite, modelo XTE-190-100-A e com faixa de 0 a 700 kPa, é fixado na linha de injeção para descrever o comportamento durante o ensaio. Para manter constante a injeção existe a câmara de expansão do sistema de injeção que proporcionará uma expansão do gás (processo quase isoentrópico). Assim sendo, pelo volume consumido pela injeção que é igual a 0,01 % do volume desta câmara, a pressão da linha variará em 0,02 %, que é algo desprezível. Para registrar o volume de líquido injetado existe a pipeta graduada que indica através do nível do líquido. Na calibração da bancada, para uma confiabilidade de 95 %, a temperatura de injeção tem uma precisão de 1,7 °C e a pressão de injeção tem uma precisão de 2,1 kPa.

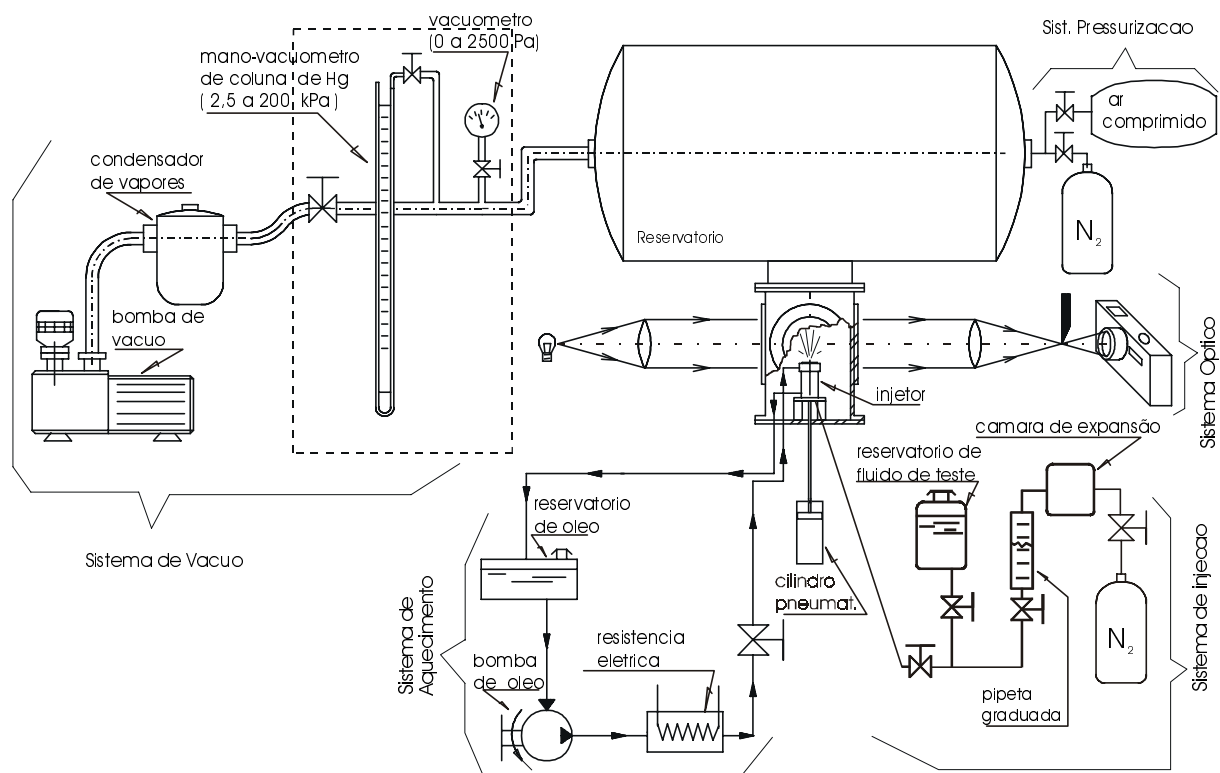


Figura 1- Esquema geral da bancada experimental.

No injetor, em sua região anular, circula o óleo aquecido pela resistência elétrica e bombeado pela bomba de engrenagens do sistema de aquecimento, conforme visto na Fig. 1. A faixa de temperatura que pode ser ensaiada situa-se entre 20 a 300 °C. O volume que é injetado não é maior que 3 cm<sup>3</sup>, no entanto, o volume de fluido de teste que é efetivamente aquecido e está contido no injetor é 4 vezes maior, garantindo a regularidade da temperatura durante o ensaio. Isto também é comprovado pelo monitoramento da mesma pelo sistema de aquisição de dados que, também monitora os dados de pressão da linha de injeção. Além disso, promove o acionamento da válvula solenóide que dispara o cilindro pneumático para a abertura e fechamento do injetor. Outra função deste sistema, é monitorar o disparo para a aquisição de imagens do jato realizada pela câmara CCD, monocromática, com tamanho do

sensor de 12,7 mm, da marca Coastar, modelo CV-M50. O computador que gerencia a câmara possui uma placa de aquisição de imagens da marca Data Translator, modelo DT-3152. Ela foi programada para tirar uma fotografia antes do evento, e mais quatro fotografias durante o evento. Isto porque a primeira fotografia será utilizada para filtrar as demais fotografias do jato, sendo estas processadas matematicamente com um filtro do tipo subtrativo.

O sistema óptico utiliza o método "schlieren" para visualização do escoamento do jato que, basicamente, consiste de um feixe luminoso paralelo que atravessa a região do evento e depois é focalizado sobre o "pin-hole" (também chamado de faca ou filtro espacial). Se um raio de luz sofrer um desvio considerável devido às variações de densidade do meio, este será refletido e não atravessará o "pin-hole" e, portanto, não será projetado sobre o filme ou anteparo. O esquema da geometria óptica empregada está na Fig. 2. É possível ver que o feixe da fonte luminosa é concentrado ao passar pela lente convergente, coincidindo o foco do feixe com a posição do filtro espacial, também chamado de faca, ou "pin-hole". Isso faz com que a fonte luminosa tome um caráter pontual, sendo que, o diâmetro do "pin-hole" é de 0,28 mm. Assim como na lente, a posição do "pin-hole" coincide com a distância focal do espelho parabólico, fazendo com que o feixe expandido após o "pin-hole", percorra através da seção do evento, de forma paralela. O segundo espelho recebe o feixe paralelo e focaliza-o no outro "pin-hole" com diâmetro de 0,42 mm.

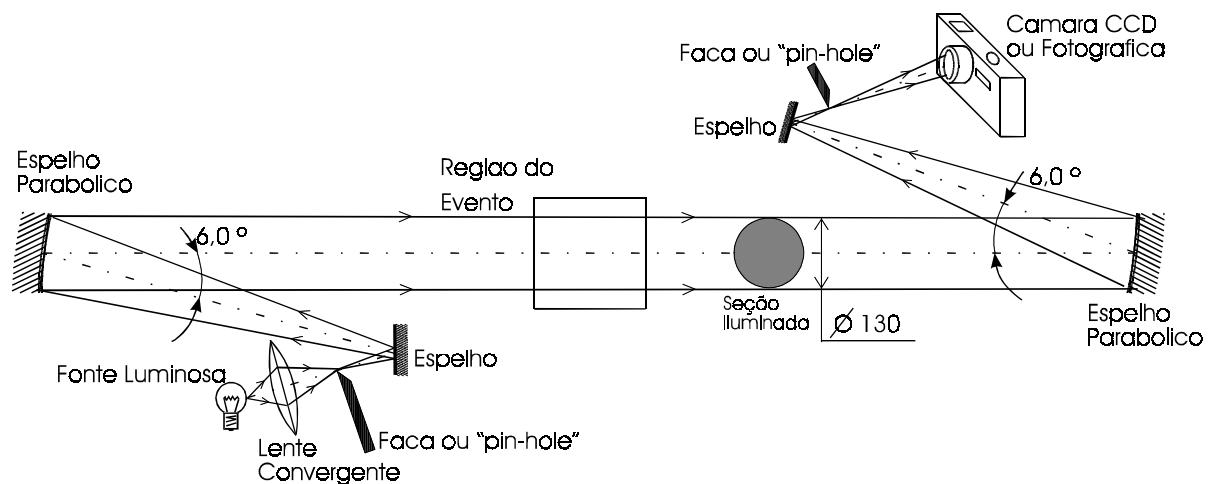


Figura 2 - Geometria do aparato óptico.

No procedimento do ensaio, primeiramente é feito vácuo no sistema. Para tanto, o condensador de vapor deve conter nitrogênio líquido ou gelo seco. Se a linha de injeção não estiver preenchida com o líquido de teste, também é feito vácuo na linha de injeção, mantendo o bocal do injetor aberto. Nesta etapa, o vácuo chega até 0,1 mbar ou 10 Pa. Em seguida, isola-se a comunicação da linha de injeção e a câmara de vácuo com o fechamento do injetor aplicando uma pressão de 4 bar ou 400 kPa no cilindro pneumático. Com o vácuo na linha de injeção, é possível o total preenchimento desta linha com o fluido de teste. Após este procedimento de enchimento, a linha é pressurizada com o gás nitrogênio até alcançar a pressão de injeção desejada, cujo o monitoramento é feito pelo computador. Na câmara de vácuo, a pressurização também é feita com gás nitrogênio até alcançar a pressão de ensaio monitorado pelo mano-vacuômetro ou pelo vacuômetro analógico.

O sistema de aquecimento começa a funcionar com o acionamento da bomba de óleo e a ligação da resistência elétrica que vai aquecer o óleo de circulação. O monitoramento da temperatura é feito pelo computador do sistema de aquisição de dados e o controle e

manutenção da temperatura fica sob responsabilidade do termostato e do "variac", que e estão ligados em série a esta resistência elétrica que aquece o óleo.

Sabendo que, as pressões de injeção e da câmara de vácuo constam nos valores desejados e a temperatura do fluido foi alcançada, falta apenas anotar o nível inicial do volume do fluido. Em seguida, acionar-se-á o ensaio propriamente dito pelo computador principal, que adquire os dados de pressão, temperatura de injeção, assim como, enviará os comandos de disparo do injetor e de aquisição de imagens. Após o ensaio efetivo, registra-se o nível total injetado do líquido, e também, carrega-se os dados obtidos em arquivos. Dos dados de pressão analisam-se a média, o desvio padrão e o perfil do gráfico. Extrai-se também o tempo inicial e o tempo final de injeção. Dos dados de temperatura apenas é tirada a temperatura média porque o desvio padrão é da ordem de 0,20 °C.

### 3. RESULTADOS

O fluido utilizado neste trabalho é o querosene. Dentro de suas características de hidrocarboneto, ele oferece a possibilidade de uma evaporação completa em um processo adiabático.

Neste trabalho, os resultados serão analisados de forma qualitativa. Assim, o fator que mais influenciou para a diferenciação dos perfis de jatos foi, praticamente, a temperatura de injeção às baixas pressões de câmara ( 0,1 a 2,0 kPa). Quanto maior a temperatura do líquido, maior é o grau de superaquecimento e, por consequência, maior a sua potencialidade de evaporar. A seguir estão enunciados os resultados observados.

#### 3.1 Tipos de jatos observados

Abaixo estão enumerados os tipos de jatos observados:

- a) Jato contínuo: não possui fragmentação da coluna de líquido devido a evaporação e pode ser observado na fotografia da Fig. 3-a;
- b) Jato pulverizante: nesta categoria, ocorre evaporação de líquido dando origem a uma componente de velocidade radial no escoamento (Fig. 3-b);
- c) Jato com ondas de choque de formato elipsóide: possui um pequeno núcleo líquido que evapora e expande com velocidade supersônica, finalizando em uma onda de choque. A Fig. 3-c mostra uma fotografia com a formação de uma onda de choque;
- d) Jato com ondas de choque de formato esferóide: é observada a formação de uma onda de choque de perfil esferóide quando o líquido possui altíssima temperatura, próxima do ponto crítico, como constatou Chaves *et al.* (1992) e pode ser vista na fotografia da Fig. 3-d.

A Tabela 1 oferece as condições destes ensaios descritos.

Tabela 1. Condições dos ensaios da Fig. 3

Ensaio	Pressão de injeção (kPa)	Temperatura de injeção (°C)	Pressão da câmara (kPa)
a)	300	60	2,1
b)	615	95	1,2
c)	650	220	1,0
d)	700	270	1,2

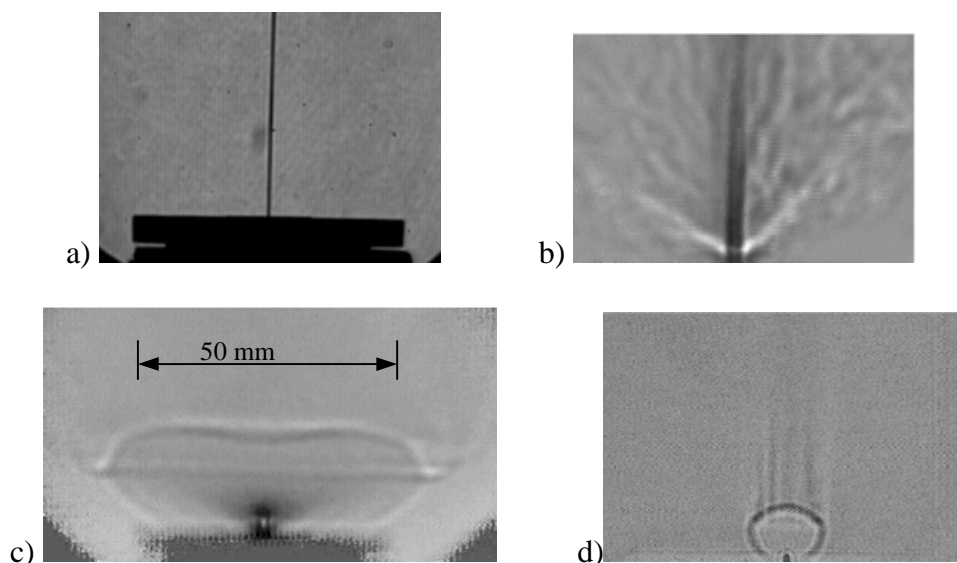


Figura 3 - Os diferentes tipos de jato: em a) tem-se um jato contínuo, em b) jato pulverizante, em c) jato com evaporação completa e formação de uma onda de choque elipsóide e, em d) jato com evaporação completa e formação de uma onda de choque esférica.

### 3.2 A onda de evaporação

Com exceção da primeira fotografia da Fig. 3, é interessante notar a região escura que existe no eixo axial do jato, ou seja, aquela próxima a saída do bocal. Com isso, é possível concluir que esta região é constituída pela fase líquida do jato. Outros autores, também observaram tal fato, com outros métodos ópticos (Rietz, 1990, Kurschat *et al.*, 1992 e Athans e Hirsá, 1995). Esta interface que existe entre o núcleo líquido e a região de expansão, pode ser analisada como sendo uma onda de evaporação. Esta pode ser entendida como um processo onde o líquido sofre uma evaporação súbita se transformando em uma mistura bifásica de alta velocidade. Esse fenômeno é similar ao que ocorre nas ondas de deflagração que ocorrem na combustão, pelo menos, em sua modelagem matemática. No entanto, tanto nas ondas de deflagração como nas ondas de evaporação, é comum que a expansão do jato ocorra resultando na condição sônica na evaporação. A solução sônica encontrada nestes fenômenos é chamada de condição de Chapman-Jouguet (Simões-Moreira, 1999). Sendo assim, explica-se aqui a formação das ondas de choque nestes escoamentos, pois na onda de evaporação o fluido atinge a condição sônica e depois se expande livremente alcançando um escoamento supersônico até resultar na formação de uma onda de choque de formato mais ou menos elipsóide.

Baseados neste fato, estudos numéricos já vem se realizando para resolução deste problema. Simões-Moreira (1999 e 2000), introduziu a teoria das ondas de evaporação oblíquas. Angelo (2000) e Angelo e Simões-Moreira (2000), em estudos referentes à expansão do vapor após a onda de evaporação observou em seus resultados a abrupta queda da pressão na região próxima da onda de evaporação, o que é bastante coerente ao que foi observado na Fig. 4. A primeira fotografia da Fig. 4-a, corresponde a imagem original do jato pelo método "schlieren". Nela apenas se observa com nitidez o núcleo líquido que se evapora. Na fotografia seguinte, Fig. 4-b, corresponde à fotografia do jato da Fig. 4-a, no entanto, esta teve a imagem filtrada de manchas pelo filtro matemático subtrativo utilizando como referência a fotografia que é tirada antes da realização do ensaio como visto na seção 2, e depois, é processada a sua tonalidade matematicamente, destacando assim as iso-linhas. Desta

forma, como o método "schlieren" interpreta que a tonalidade é proporcional ao gradiente de densidade, pode-se interpretar que cada "faixa" ou "listra" desta imagem corresponde à iso-linhas de valores de densidade do vapor expandido. Sendo assim, a Fig. 4-b leva a concluir que em sua expansão, próximo da região de líquido, estas iso-linhas estão bem estreitas correspondendo a uma área de grande variação da densidade do fluido.

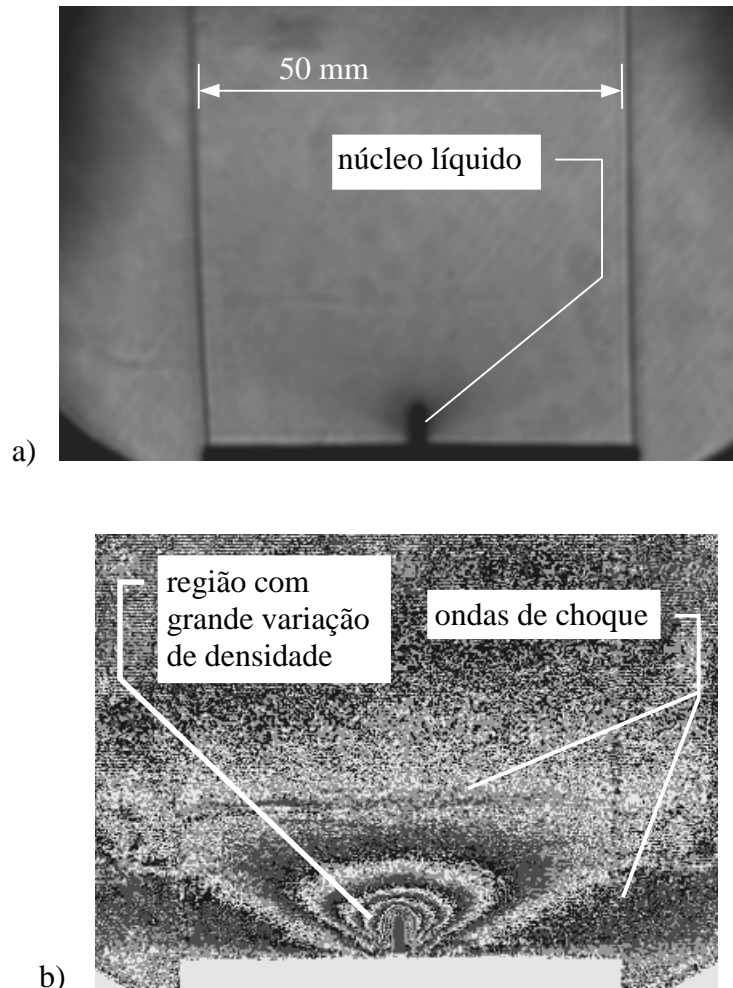


Figura 4 - Imagens de um jato com evaporação completa. A primeira é a fotografia original e a segunda corresponde a imagem filtrada e processada matematicamente.

### 3.3 Estágio de formação da onda de choque nos jatos pulverizantes

Os ensaios revelaram que a onda de choque tem o seu estágio de formação em jatos do tipo pulverizante. Como estudo de caso, destacou-se os ensaios com querosene cujas pressões de injeção e da câmara de vácuo se mantiveram constante com os valores de 500 kPa e 1,2 kPa.

Na Fig. 5-a, verifica-se que o jato tem um princípio de formação da onda de choque. A temperatura neste ensaio é de 85 °C. O segundo ensaio desta figura, a temperatura de injeção é de 110 °C e a onda de choque se expande. Na Fig. 5-c, a temperatura de injeção é de 155 °C. Nela, o jato possui a formação de uma onda de choque elipsóide, com a possibilidade de muitas gotículas traspassarem a onda de choque. E por último, a Fig. 5-d, cuja temperatura é de 260 °C, possui a formação da onda de choque elipsóide com a completa evaporação do líquido.

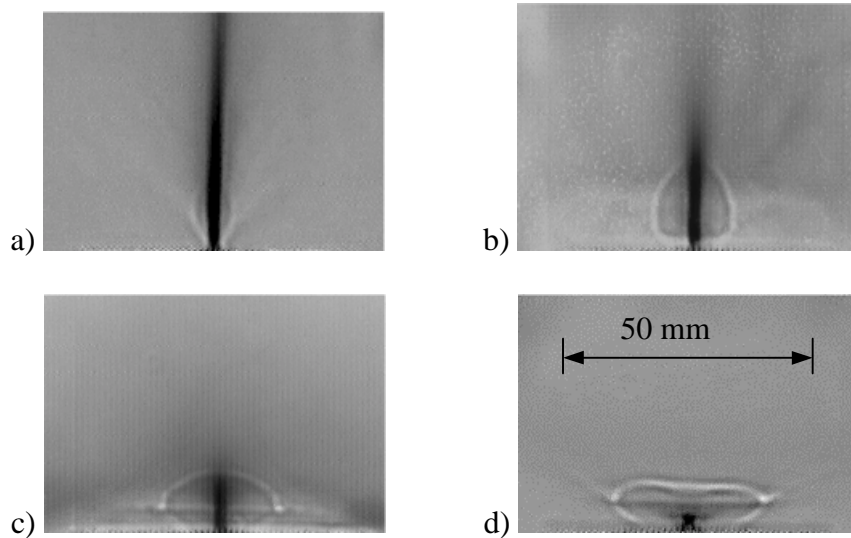


Figura 5 - Exemplos de ondas de choque em função do grau de superaquecimento. As fotografias representam uma seqüência de ensaios com pressão inicial de 500 kPa e pressão da câmara de 1,2 kPa. Suas temperaturas de ensaio são de 85 °C, 110 °C, 155 °C e 260 °C, respectivamente.

### 3.4 Análise da vazão

O cálculo da vazão teórica foi realizado usando a expressão clássica de descarga de um fluido incompressível através de um orifício ou bocal dada por

$$Q = C_D \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot v_l \cdot (P_0 - P_\infty)} \quad (1)$$

onde,  $C_D$  é o coeficiente de descarga (0,922),  $A$  é a área do bocal,  $v_l$  é volume específico do líquido que é tomado em função da temperatura (a 30 °C, é de 0,00129m<sup>3</sup>/kg) e,  $(P_0 - P_\infty)$  é a diferença entre as pressões de injeção e da câmara de vácuo.

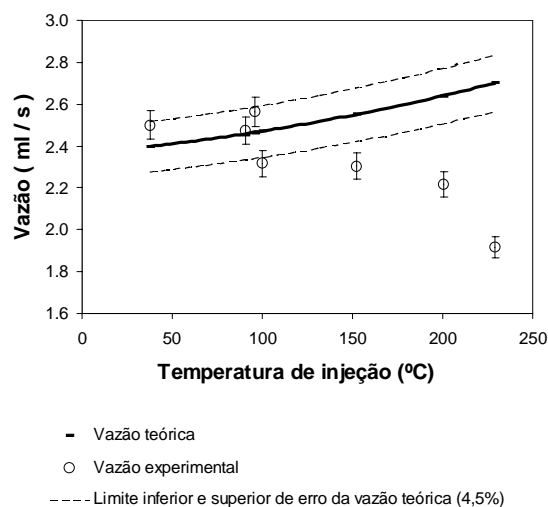


Figura 6 - Gráfico da vazão a uma pressão de injeção de 0,5 MPa.



O gráfico da Fig. 6 toma uma comparação entre os valores da vazão teórica com os valores de vazão encontrados experimentalmente, em função da temperatura de injeção. Todos estes ensaios foram realizados com uma pressão inicial de 500 kPa. Para o cálculo da vazão teórica, existe uma faixa de incerteza de 4,5 % e na vazão medida no ensaio, uma incerteza de 2,6 %, para uma confiabilidade de 95 %, cujo detalhamento da análise de incerteza se encontra em Vieira (1999). Nesta figura é possível verificar que acima de 100°C, existe uma queda dos valores da vazão da injeção do querosene, justamente na faixa onde os jatos começam a assumir um perfil com evaporação completa. Duas hipóteses podem ocorrer: (1) existe uma nucleação de vapor internamente ao bocal ou, (2) a onda de evaporação que ocorre no núcleo líquido do jato, externamente ao bocal, restringe a vazão. Em ambos os casos ocorre uma restrição da vazão se a condição de escoamento crítico for alcançada.

#### **4. Conclusões e continuidade**

Diante destes resultados algumas conclusões são possíveis de se extrair deste trabalho que a seguir estão enumerados:

- a) Conforme alguns autores observaram (Athans e Hirsa, 1994 e Kurschat *et al.*, 1992), existem a formação de vários perfis de jatos evaporativos: jato pulverizante, jato com formação de ondas de choque elipsóide e com formação de ondas de choque esférico;
- b) O fato do querosene não ser uma substância pura, não foi possível, pelo menos aqui, encontrar uma correlação com as condições de pressão de injeção e pressão da câmara;
- c) O método "schlieren" mostrou-se eficaz para o estudo destes jatos evaporativos. Com isto verificou-se a formação das ondas de choque, observou-se a possibilidade das ondas de evaporação, e a visualização do gradiente de densidade do jato em sua expansão;
- d) Os ensaios revelaram que a onda de choque já possui um princípio de formação em jatos do tipo pulverizante;
- e) Existe uma queda dos valores da vazão, na faixa onde os jatos começam a assumir um perfil com evaporação completa e isto ocorre devido à fenômenos evaporativos que podem ocorrer.

Para a continuidade deste trabalho, pretende-se utilizar outros métodos ópticos, assim como, utilizar substâncias puras para a análise e comparação com os métodos numéricos que estão se realizando. O trabalho também será analisado do ponto de vista computacional.

#### ***Agradecimentos***

Os autores agradecem à Fapesp (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela contribuição financeira destinada para a realização deste trabalho. O primeiro autor também agradece pela bolsa oferecida pelo CNPq.

#### **REFERÊNCIAS**

- Angelo, E., 2000, Estudo Numérico de Jatos Evaporativos, dissertação de mestrado apresentada à Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- Angelo, E. e Simões-Moreira, J. R., 2000, Estudo Numérico de Jatos Evaporativos, submetido ao ENCIT 2000.

- Athans, R. E. e Hirska, A., 1995, A Photographic Study of a Small Flashing Jets, Flow Visualization and Image Processing of Multiphase System, ASME, V. 209, pp. 201-206.
- Guimarães, M. S. e Simões-Moreira, J. R., 1999, Arranjo Óptico para a Visualização de Jatos Evaporativos de Líquidos Altamente Superaquecidos, Trabalho de Formatura, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo e, Relatório Final de bolsa de iniciação científica FAPESP, processo n.º 97/01188-9.
- Hill, L. G. e Sturtevant, B., 1990, An Experimental Study of Evaporation Waves in a Superheated Liquid, Adiabatic Waves in Liquid-Vapor Systems, eds. Meier, G. E. A. e Thompson, P. A., Springer-Verlag, pp. 25-37.
- Kurschat, Th., Chaves, H. e Meier, G. E. A., 1992, Complete Adiabatic Evaporation of Highly Superheated Liquid Jets, Journal of Fluid Mechanics., V. 236, pp. 43-59.
- Oza, R. D., 1984, On the Mechanism of Flashing Injection of Initially Subcooled Fuels, Journal Fluid Engineering, Transactions of the ASME, V. 106, pp. 105-109.
- Peter, E. M., Takimoto, A. e Hashiro, Y., 1994, Flashing and Shattering Phenomena of Superheated Liquid Jets, JSME International Journal, Série B, V. 37, nº 2, pp. 313-321.
- Rietz, R. D., 1990, A Study Photographic of Flash-Boiling Atomization, Aerosol Science and Technology, V. 12, pp. 561-569.
- Simões-Moreira, J. R., 2000, Oblique Evaporation Waves, Shock Waves - An International Journal on Shock Waves, Detonations and Explosions (aceito para publicação).
- Simões-Moreira, J. R. 1999, Aplicação da Teoria das Ondas de Evaporação aos Jatos Evaporativos, tese de livre docência apresentada à Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- Simões-Moreira, J. R. e Shepherd, J. E., 1999, Evaporation Waves in Superheated Dodecane, Journal of Fluid Mechanics, V. 382, pp. 63-86.
- Simões-Moreira, J. R., 1997, Comportamento Termodinâmico de Substâncias de Complexidade Molecular Elevada, CIDIM, Cuba.
- Simões Moreira, J. R., 1994, Adiabatic Evaporation Waves, tese de doutorado apresentada ao Rensselaer Polytechnic Institute, Nova Iorque, EUA.
- Thompson, P. A. e Sullivan, D. A., 1975, On the Possibility of Complete Condensation Shock Waves in Retrograde Fluids, Journal of Fluid Mechanics, V. 95, pp. 279-304.
- Vieira, M. M., 1999, Estudo Experimental de Jatos Evaporativos, dissertação de mestrado apresentada à Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

## EXPERIMENTAL STUDY OF EVAPORATION JETS

**Abstract.** *The main goal of this paper is to present results of experiments with flashing jets. The experiments were carried out with a jet issuing from a conical convergent nozzle, 10° half-angle and 0,3 mm of exit diameter, into a low-pressure chamber. High degrees of metastability were obtained as the liquid jet expanded in the nozzle. Injection pressure and temperature were controlled to the desired values during about 1 s, which was found to be sufficient to reach and keep the steady state regime. Images from the phenomenon were obtained from a "schlieren" set up using CCD camera. The analyses of these images with mathematical filters enabled a qualitative visualisation of the flashing jet structure and geometry leaving in nozzle. Three jet regimes were observed: (1) continuous; (2) partially atomised and; (3) complete evaporation with shock waves. In latter case, we speculate that the evaporation takes part on the liquid jet surface, which takes the approximate form of a cone.*

**Key words:** *Evaporation wave, Metastable liquid, Evaporation, Phase change, Schlieren.*