MARCELO MENDES VIEIRA

ESTUDO EXPERIMENTAL DA EVAPORAÇÃO DE
JATOS DE ISO-OCTANO SUPERAQUECIDO

Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para
obtenção do Título de Doutor em
Engenharia.

VOLUME 1 E 2

SÃO PAULO
2005

MARCELO MENDES VIEIRA

ESTUDO EXPERIMENTAL DA EVAPORAÇÃO DE
JATOS DE ISO-OCTANO SUPERAQUECIDO

Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para
obtenção do Título de Doutor em
Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. José Roberto Simões Moreira

VOLUME 1 E 2

SÃO PAULO
2005

FICHA CATALOGRÁFICA

Vieira, Marcelo Mendes

**Estudo experimental da evaporação de jatos de iso-octano
superaquecido / M. M. Vieira -- São Paulo, 2005.**

2 v.

**Tese (Doutorado) -- Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.**

**1.Jatos evaporativos 2.Metaestável 3.Onda de choque
4.Onda de evaporação 5.Schlieren I. II. Universidade de
São Paulo. Escola Politécnica. II.t.**

*À minha esposa,
Marimar da Silva Barros Vieira.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Fapesp pela bolsa de doutorado cujo processo está intitulado “Estudo Experimental de Jatos Evaporativos” de nº 2000/06243-2. A esta entidade também agradeço o apoio financeiro oferecido ao projeto intitulado “Estudo Teórico Experimental de Jatos Evaporativos” de nº 2000/08302-6.

Meus agradecimentos a todos do Laboratório SISEA, destacando os amigos Marcelo da Silva Rocha, Edvaldo Angelo, Ricardo Brás e Shigeharu Nakaba que me ajudaram neste projeto.

Em especial, ao Prof. Dr. José Roberto Simões Moreira, coordenador deste laboratório e meu orientador, agradeço pelo apoio e pela confiança em mim depositados para a realização deste projeto.

Ofereço minha estima e gratidão aos amigos, parentes e companheiros de trabalho que torceram por mim ou auxiliaram-me de forma direta ou indireta.

Aos meus irmãos, pelos quais tenho um sentimento especial, Sérgio, Edna, Fátima, Marcio, e respectivos cônjuges, aos meus sobrinhos, à querida Esmeralda, aos meus padrinhos Antônio e Celeste (in memoriam). São pessoas que me apoiaram e incentivaram para realização deste trabalho.

Dedico o meu profundo respeito, carinho e gratidão a esta minha esposa e companheira, Marimar, pelo seu apoio e encorajamento a mim oferecidos e, a nossa filha, Fabiana, que proporcionou um significado maior em nossas vidas, no âmbito familiar.

E dedico a minha eterna gratidão aos meus pais, Abel e Izalina (in memoriam) que sempre buscaram ensinar a sabedoria de vida na simplicidade, dedicação e dignidade de suas ações e, com isso, me proporcionaram a formação acadêmica e, principalmente, a formação para a vida.

Finalmente, eu agradeço à Deus, que me permitiu ser testemunha de tantas realizações que acontecem em minha vida.

São Paulo, junho de 2005.

RESUMO

Este trabalho experimental tem por objetivo apresentar os estudos experimentais realizados com jatos de líquidos evaporativos ("flash boiling") de iso-octano. Nos estudos, o jato emergia de um diminuto bocal que descarrega em uma grande câmara de baixa pressão. O líquido ao passar pelo bocal sofria uma expansão interna alcançando elevados graus de superaquecimento ou de metaestabilidade, já que se mantinha na fase líquida. Nos experimentos, eram controladas as condições de pressão e temperatura de injeção durante um período de alguns poucos segundos suficientes para que as condições de regime permanente fossem estabelecidas. Um dos métodos para a visualização do escoamento do jato evaporativo foi o "Schlieren", o qual permitia visualizar elevados gradientes de densidade como normalmente ocorrem com ondas de choque, presentes nesta investigação. Também foi empregada a técnica de visualização de "iluminação por detrás" para que fossem comparadas as imagens obtidas por este método com o do "Schlieren", bem como mostrar detalhes do fenômeno em estudo. Com isso, foi possível estudar a estrutura do processo evaporativo do jato e, com o auxílio de ferramentas de filtragem matemática e manipulação das imagens obtidas, os fenômenos compressíveis envolvidos. Os perfis dos jatos observados foram: (1) filete contínuo de líquido sem evaporação, (2) jato com fragmentações ou atomizado e (3) abrupta evaporação seguida por expansão com formação de ondas de choque. Neste último caso, a inspeção das fotografias indicou que a evaporação do líquido se dava externamente ao bocal, a partir de um núcleo metaestável de líquido, o qual apresentava o formato aproximado de um cone. Também foi aplicada a teoria de ondas oblíquas de evaporação para estudar o comportamento deste cone líquido. Os ensaios foram conduzidos com três bocais cônico-convergentes de dimensões e materiais diferentes, quais sejam: bocal de aço com diâmetro de saída de 0,3 mm, bocal de aço com 0,8 mm e bocal de vidro com 0,35 mm.

ABSTRACT

The main goal of this thesis is to present results of experiments with flashing liquid jets of iso-octane. The experiments were carried out with a liquid jet issuing from a small nozzle into a low-pressure chamber. High degrees of metastability were obtained as the liquid jet expanded within the nozzle. Injection pressure and temperature were controlled to the desired testing values for a few seconds, which were found long enough to reach and keep the steady state regime. The photographic documentation of the phenomenon was obtained from a "Schlieren" set up using CCD camera. The "back-lightening" visualization technique was also used in order to compare both image techniques and to unveil some flashing phenomenon details. Analyses of these images with the help of mathematical filters as well as other image manipulating techniques enabled a qualitative visualization of the flashing liquid jet structure and geometry leaving the nozzle. Three liquid jet regimes were observed: (1) continuous liquid jet (2) partially atomized, and (3) evaporation with the presence of shock waves. In this latter case, we speculate that the evaporation took part on the liquid jet surface, which had the approximate shape of a cone. Also it was employed the oblique evaporation wave theory to explain some of the behavior of the overall evaporation process. The tests were carried out using three conical-converging nozzles made of different materials: a 0.3 mm exit diameter steel nozzle, a 0.8 mm exit diameter steel nozzle, and a 0.35 mm exit diameter glass nozzle.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO.....	2
1.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
1.2.1	A Presença do Núcleo de Líquido.....	5
1.2.2	A Condição de Líquido Metaestável.....	11
1.2.3	A Formação da Onda de Evaporação.....	12
1.2.4	A Configuração do Jato Evaporativo	14
1.2.5	O Escoamento à Jusante da Onda de Evaporação.....	19
1.2.6	Considerações sobre o Efeito Transitório e o Comportamento do Jato em Regime Permanente.....	28
1.2.7	A Questão da Vazão.....	31
1.2.8	Experimentos Anteriores.....	35
1.3	OBJETIVOS	37
1.4	DIVISÃO DO TRABALHO.....	39
2.	TEORIA	41
2.1	A SUBSTÂNCIA ISO-OCTANO.....	41
2.1.1	Comportamento da Substância SCME.....	42
2.1.2	O Limite de Metaestabilidade do Líquido	44
2.2	ONDAS DE EVAPORAÇÃO	47
2.3	SOLUÇÃO ANALÍTICA PROPOSTA PARA DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO À JUSANTE EM FUNÇÃO DO GRAU DE METAESTABILIDADE	52
2.4	ONDAS DE EVAPORAÇÃO OBLÍQUAS	58
2.5	FORMATO DE CONE DO NÚCLEO DE LÍQUIDO.....	60
2.6	COMPORTAMENTO TERMODINÂMICO DO JATO.....	61
3.	ARRANJO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	65
3.1	SISTEMA DE PRESSURIZAÇÃO E DE VÁCUO	68
3.2	SISTEMA DE AQUECIMENTO	70
3.3	SISTEMA DE INJEÇÃO	71
3.4	SISTEMA ÓPTICO - MÉTODO “SCHLIEREN”	76

3.5	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	79
3.6	IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ÓPTICO	83
3.7	FILTRAGEM DE IMAGENS.....	91
3.8	PROCEDIMENTO DO ENSAIO	93
3.9	FAIXAS DE INCERTEZAS	95
4.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	96
4.1	RESULTADOS EXPERIMENTAIS: BOCAL DE AÇO COM 0,3 MM DE DIÂMETRO (SÉRIES: RUN1, RUN2 E RUN3)	96
4.1.1	Resultados das Medidas das Vazões Mássicas	99
4.1.2	Comprimento de Extinção do Núcleo Líquido	101
4.1.3	Dimensões Características da Estrutura da Onda de Choque	102
4.1.3.1	Influência da Pressão da Câmara sobre as Dimensões da Onda de Choque	107
4.2	ENSAIOS COM O BOCAL RUGOSO DE 0,8 MM DE DIÂMETRO NA SAÍDA - SÉRIE R08	108
4.2.1	Resultados das Medidas das Vazões Mássicas - Série R08	109
4.2.2	Comprimento de Extinção do Núcleo Líquido - Série R08	109
4.2.3	Dimensões Características da Estrutura da Onda de Choque - Série R08	110
4.2.4	Considerações sobre o Regime Permanente da Série R08.....	112
4.3	ENSAIOS COM O BOCAL DE VIDRO DE 0,35 MM DE DIÂMETRO NA SAÍDA - SÉRIE V03	113
4.3.1	Resultados das Medidas das Vazões Mássicas - Série V03.....	114
4.3.2	Comprimento de Extinção do Núcleo Líquido - Série V03.....	116
4.3.3	Dimensões Características da Estrutura da Onda de Choque - Série V03.....	116
5.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	120
5.1	ANÁLISE E DISCUSSÃO DO BOCAL DE AÇO COM 0,3 MM DE DIÂMETRO	120
5.1.1	A Condição de Máxima Vazão	124
5.1.2	Jatos com pressão de saturação abaixo ou próxima da pressão da câmara	130
5.1.3	Jatos no limiar da condição de blocagem.....	134
5.1.4	Jatos com vazão bloqueada sem a visualização da onda de choque	137
5.1.5	Jatos bloqueados com a visualização da onda de choque	141
5.1.6	Análise de Comprimento de Extinção do Líquido.....	150
5.1.7	Comportamento da Onda de Choque	158

5.2	COMPARAÇÃO DOS JATOS EVAPORATIVOS DO BOCAL DE AÇO DE 0,3 MM DE DIÂMETRO COM BOCAIS DE AÇO DE 0,8 MM E DE VIDRO DE 0,35 MM	162
5.2.1	Comparação da Condição de Máxima Vazão	165
5.2.2	Comparação do Comprimento de Extinção do Líquido.....	168
5.2.3	Comparação do Comportamento da Onda de Choque.....	172
5.2.4	A Influência das Condições de Injeção e do Comprimento do Núcleo Líquido nas Dimensões da Onda de Choque	174
5.2.5	Considerações Sobre a Dimensão da Onda de Choque do Bocal de Vidro	176
6.	APLICAÇÃO DA TEORIA DA ONDA DE EVAPORAÇÃO NOS JATOS.....	180
6.1	CÁLCULO DO NÚCLEO DE LÍQUIDO	180
6.2	O ATRASO DA ONDA DE EVAPORAÇÃO.....	186
6.2.1	Condição do Líquido Metaestável no Atraso.....	188
6.2.2	Considerações sobre a Onda de Choque Formada em Jatos com Atraso da Onda Evaporativa	188
7.	CONCLUSÕES E CONTINUIDADE DO TRABALHO	190
7.1	CONCLUSÕES	191
7.2	CONTINUIDADE DO TRABALHO	193
	ANEXO A - PROPRIEDADES DE SATURAÇÃO DO ISO-OCTANO.....	195
	ANEXO B - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO BOCAL DE AÇO COM 0,3 MM DE DIÂMETRO (R03).....	197
B.1.	MEDIÇÃO DAS VAZÕES MÁSSICAS	197
B.2.	MEDIÇÃO DO COMPRIMENTO DE EXTINÇÃO DO NÚCLEO LÍQUIDO.....	201
B.3.	MEDIÇÃO DAS DIMENSÕES DA ESTRUTURA DA ONDA DE CHOQUE.....	204
B.4.	IMAGENS DOS ENSAIOS REALIZADOS COM ISO-OCTANO	210
	ANEXO C - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO BOCAL DE AÇO COM 0,8 MM DE DIÂMETRO (R08) E DO BOCAL DE VIDRO COM DIÂMETRO DE 0,35 MM (V03).....	268
C.1.	MEDIÇÃO DAS VAZÕES MÁSSICAS - SÉRIE R08.....	268
C.2.	MEDIÇÃO DO COMPRIMENTO DE EXTINÇÃO DO NÚCLEO LÍQUIDO - SÉRIE R08.....	269
C.3.	MEDIÇÃO DAS DIMENSÕES DA ESTRUTURA DA ONDA DE CHOQUE - SÉRIE R08.....	270
C.4.	IMAGENS DOS ENSAIOS DA SÉRIE R08	272
C.5.	MEDIÇÃO DAS VAZÕES MÁSSICAS - SÉRIE V03.....	280

C.6.	MEDIÇÃO DO COMPRIMENTO DE EXTINÇÃO DO NÚCLEO LÍQUIDO - SÉRIE V03.....	281
C.7.	MEDIÇÃO DAS DIMENSÕES DA ESTRUTURA DA ONDA DE CHOQUE - SÉRIE V03.....	281
C.8.	IMAGENS DOS ENSAIOS DA SÉRIE V03	284
	LISTA DE REFERÊNCIAS	298
	APÊNDICES	

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1 - A imagem à esquerda se refere a um jato de iso-octano com pressão (P_0) e temperatura de injeção (T_0) de 250 kPa e 56°C, respectivamente. A pressão de saturação é 300 vezes maior que a pressão da câmara (P_∞) que é de 0,09 kPa. 1
- Figura 1.2 - Seqüência de imagens de jatos evaporativos de querosene com pressão de injeção de 600 kPa, e pressão da câmara igual a 1,6 kPa. A temperatura de injeção é de 38, 95, 120 e 260 °C, respectivamente (Vieira, 1999). 6
- Figura 1.3 - Exemplo de jato líquido que sofre uma desintegração, tomando um formato cônico. Nesta representação D_b é o diâmetro do bocal, L_d é o atraso que ocorre na fragmentação do núcleo líquido e L_E é o comprimento do núcleo líquido (Ramamurthi e Nandakumar, 1994). 7
- Figura 1.4 - Imagem de jato de iso-octano com temperatura e pressão de injeção de 223 °C e 2068 kPa, respectivamente, obtidas pelo método de “laser sheet” (Athans, 1994). 8
- Figura 1.5 - As fotografias representam as imagens de uma única injeção de querosene com pressão inicial de 500 kPa e pressão da câmara de 0,6 kPa e temperatura de injeção de 150 °C, obtidas pelo método “Schlieren”. A primeira foi obtida 1 s após a abertura do injetor e, depois de 1 s, a segunda foi adquirida (Vieira, 1999). 8
- Figura 1.6 - Imagens obtidas por Kitamura e outros (1986) que ilustram uma seqüência de jatos de água que foram submetidos a uma pressão da câmara menor que a pressão de vapor, de forma progressiva. Isto proporcionou o aumento da evaporação, por consequência, da pulverização. A velocidade do inicial do jato, a pressão de injeção, e diferença entre a temperatura de injeção do fluido e a temperatura de saturação em função da pressão da câmara, são respectivamente: a) 8,5 m/s, 760 mmHg, valor negativo ; b) 8,65 m/s, 22 mmHg, 28,5 °C ; c) 8,22 m/s, 23 mmHg, 45,4 °C ; d) 8,22 m/s, 20 mmHg, 48 °C. 9
- Figura 1.7 - Tipos de evaporação do jato de água descarregado na atmosfera emergente de um bocal com diâmetro de 0,5 mm. Suas características estão em função da pressão e temperatura de injeção. Na região “a” não existe nucleação. Na região “b”, a nucleação está na superfície do jato. Na região “c”, o jato é totalmente pulverizado com a presença do núcleo de líquido. Nucleações provenientes da parede interna do bocal ou pela presença de partículas estão na região inferior do gráfico e tem a mesma configuração de jato (em destaque). 10
- Figura 1.8- Através da correlação feita por Kitamura e outros (1986), foi verificado que sofrem “flashing” aqueles ensaios que se encontram acima da linha sólida. No gráfico, a abcissa é o número de Weber, $We = \rho_v . D_b . u^2 / \sigma$ e, na coordenada o número de Jacob,

- $Ja = \rho_L \cdot C_{pL} \cdot \Delta T / (\rho_V \cdot \Delta h_{LV})$, sendo ρ a massa específica do fluido, u a velocidade do jato, σ a tensão superficial do líquido, C_{pL} o calor específico do líquido, Δh_{LV} a entalpia de vaporização e, ΔT é a diferença entre a temperatura do líquido e a temperatura de saturação à pressão ambiente onde é descarregado o jato. Os subscritos “L” e “V” se referem às fases líquida e vapor..... 12
- Figura 1.9 - Onda de evaporação em n-dodecano metaestável..... 13
- Condições: A temperatura do líquido é de 230 °C, a pressão abaixo da onda é de 59 kPa, a pressão acima da onda de evaporação é de 37 kPa e velocidade da onda sob o líquido estacionário é de 47,2 cm/s (Simões Moreira, 1994). 13
- Figura 1.10 - Imagem do núcleo de líquido de um jato (Kurschat, 1992). 14
- Figura 1.11 - Perfis de jatos de água (Peter e outros, 1994). O primeiro jato tem uma baixa taxa de evaporação no filete do jato. O segundo tipo, com um pequeno acréscimo da razão entre pressão de saturação e da câmara, já possui uma dispersão de gotículas devido à evaporação na periferia do núcleo líquido. Na seqüência, o terceiro jato tem um núcleo de líquido mais definido que o anterior com uma acentuada taxa de evaporação. No último caso, por causa da elevada razão entre a pressão de saturação e da câmara, o jato possui uma elevada taxa de evaporação proporcionando a dispersão imediata das gotículas logo na saída do bocal..... 16
- Figura 1.12 - Jatos de diferentes tipos dependentes do parâmetro R_P (Kurschat e outros, 1992). Imagens obtidas pela técnica de interferometria. O primeiro jato não possui evaporação. No segundo, existem nucleações esporádicas quebrando a continuidade do jato. O jato apresentado em “c” pulveriza-se totalmente, com o acréscimo da razão da pressão de vapor e da câmara, R_P . A imagem seguinte, com um elevado valor de R_P , apresenta a formação da onda de choque. A penúltima imagem (“e”) mostra um jato semelhante ao anterior, porém destaca a presença do núcleo de líquido, além da onda de choque. Por último, um jato contendo um núcleo de líquido menor que o anterior e, uma onda de choque menor, embora a pressão da câmara seja a mesma comparada ao anterior, porém a temperatura de injeção é maior..... 18
- Figura 1.13 - Imagens de um jato com elevada taxa de evaporação. A primeira é a fotografia original e as outras correspondem às imagens filtradas e processadas matematicamente (Vieira, 1999)..... 20
- Figura 1.14 - Esquema de uma onda de evaporação com a formação de uma estrutura de onda de choque..... 21
- Figura 1.15 - Gráficos que ilustram o comportamento da temperatura de estagnação das gotículas durante a expansão do jato de água com temperatura e pressão de injeção de 30,3 °C, 100 kPa, respectivamente e, pressão da câmara de 0,63 kPa. O primeiro corresponde à temperatura em função da distância axial destacando o ponto onde

- ocorreu a interrupção da continuidade do filete líquido e, o ponto “C” seria o início da estabilização da temperatura das gotículas com o ambiente. O segundo indica as temperaturas em função da distância radial apenas para o jato Tipo 3 (Peter e outros, 1994). 22
- Figura 1.16 - Simulação numérica feita para o ensaio 2349100, cujas condições de injeção eram de 250 kPa e 76 °C. A linha contínua indica o comportamento da pressão, a linha tracejada corresponde o título da mistura e a linha traço-ponto indica o número de Mach. São indicadas as posições da onda de evaporação e da onda de choque (Simões-Moreira e outros, 2002). 24
- Figura 1.17 - A mesma simulação numérica da Fig. 1.16 acrescentando o comportamento da temperatura com ênfase para regiões à montante e à jusante da onda de choque. Outra informação importante deste gráfico pode ser feita na observação do salto de propriedades na posição da onda de choque, considerando a hipótese de modelo homogêneo. 24
- Figura 1.18 - (a) Fotografia do jato de R134a descarregado no ambiente proveniente de um bocal de 1 mm. As torres verticais são os termopares dispostos a uma distância de 50 mm entre eles. (b) Fotografia termográfica do jato do bocal de 1 mm. (c) Gráfico da temperatura em função da posição axial de afastamento do bocal. Foram testados 3 bocais com diâmetros, D_b , de 1, 2 e 4mm. 27
- Figura 1.19 - Fotografias obtidas pelo método “Schlieren” com jatos de gás Hélio em uma câmara contendo gás nitrogênio. As fotografias acima se referem a um jato descarregado em uma câmara cuja pressão é 10 vezes menor que a pressão de injeção, enquanto a segunda fileira, esta relação é de 3 vezes (Lacerda, 1986). 28
- Figura 1.20 - Evolução de um jato de gás subexpandido com a formação do disco de Mach. Segundo Lacerda (1986), a frente de onda já não aparece porque ela assumiu uma dimensão maior que o quadro da fotografia. 29
- Figura 1.21 - Evolução de um jato supersônico de óleo diesel emergente de um bocal de 1mm. O intervalo de tempo entre cada fotografia foi de 22 μs , 41 μs e 64 μs , respectivamente. 29
- Figura 1.22 - Esquema do escoamento de um jato de gás subexpandido. 30
- Figura 1.23 - Gráfico que compara a vazão superficial mássica teórica em função da pressão a jusante com aquela obtida experimental de uma placa de orifício. Refere-se a um escoamento de água saturada com pressão à montante de 145 psia (1000 kPa). O cálculo teórico, que Benjamin e Miller (1941) se embasaram, assume que a mínima pressão é de 135 psia, ou 930,8 kPa. 32
- Figura 1.25 - Gráfico que ilustra a vazão em função da diferença de pressão entre a jusante e à montante, $\Delta P = P_1 - P_2$, sendo P_1 igual a 100 psia, C_v , o coeficiente da válvula igual 6,6, C_f , o coeficiente para a condição de bloqueio da válvula globo igual a 0,74 (Baumann, 1963). Entre a

região de transição, que corresponde um escoamento suscetível à cavitação da válvula globo (em destaque), à esquerda existe a curva que respeita o regime hidráulico, e à direita, assume um regime de vazão crítica.	33
Figura 1.25 - Medições do fluxo mássico: - - -, cálculo para incompressível (através da equação de Bernoulli); _____, modelo de cálculo; *, resultados experimentais. $P_0 = 15$ bar e $P_\infty = 10$ mbar (Kurschat e outros, 1992).	35
Figura 1.26 - Fotografia com (a) tempo de exposição de $1/250$ s com iluminação lateral e, (b) tempo de 20 ns com iluminação por detrás de um jato de água a uma temperatura de 146 °C e pressão de injeção de 697 kPa descarregado em ambiente atmosférico (Reitz, 1990).	36
Figura 2.1 - Gráficos com dados relevantes do líquido saturado iso-octano em função da temperatura. Os dados são: volume específico, viscosidade dinâmica e pressão de vapor (Vargaftik, 1996).	41
Figura 2.2 - Diagrama T-s de uma substância SCME (n-dodecano e iso-octano) e uma substância simples (água).	43
Figura 2.3 - Representação da região metaestável de um fluido em diagrama temperatura - volume específico (Simões-Moreira, 1994).	45
Figura 2.4 - Taxa de densidade de nucleações, J_n , em função do grau de metaestabilidade, Π , do iso-octano.	46
Figura 2.5 - Volume de controle englobando uma onda de evaporação. Estado “1” é o líquido metaestável e o estado “2” é a mistura bifásica.	48
Figura 2.6 - Representação das curvas de Rankine-Hugoniot ($R-H$) e de Rayleigh (R) em uma evaporação. O ponto “C” corresponde à condição de Chapman-Jouguet referente ao estado “1”.	49
Figura 2.7 - Representação do comportamento da razão de pressões à jusante e à montante da onda de evaporação em função do grau de metaestabilidade do iso-octano.	51
Figura 2.8 - Representação das curvas de P_2/P_1 em função de Π , para diversos fluidos apresentados na legenda. A linha contínua é a solução analítica proposta e os símbolos vêm da solução numérica da Tab. 2.4.	55
Figura 2.9 - Representação do comportamento da razão de pressões à jusante e à montante da onda de evaporação em função do grau de metaestabilidade do líquido para a iso-octano com temperatura inicial de 56 °C com pressão inicial de 750 kPa.	57
Figura 2.10 - Representação esquemática do jato à esquerda e, à direita, está em destaque a geometria da onda de evaporação com suas componentes de velocidade, em um plano coincidente ao eixo central.	58
Figura 2.11 - Ângulo de giro como função do ângulo de onda parametrizado pela razão entre os volumes específicos à jusante e à montante relativos à onda de evaporação (Simões-Moreira, 1999).	60

Figura 2.12 - Explicação para o comportamento termodinâmico do jato evaporativo.....	62
Figura 3.1 - Esquema geral da bancada experimental.	66
Figura 3.2 - Fotografia da câmara de baixa pressão, painel de controle e mesas ópticas com lentes, espelhos parabólicos e filtro espacial.	67
Figura 3.3 - Fotografia da bomba de vácuo e do painel com mano-vacuômetro de mercúrio e vacuômetro analógico de precisão.	68
Figura 3.4 - Esquema do sistema de vácuo.	69
Figura 3.5 - Esquema do sistema de aquecimento.	71
Figura 3.6 - Esquema da linha de injeção.	71
Figura 3.7 - Esquema do corpo de injeção mediante acionamento pneumático da haste, o líquido é subitamente expandido para fora do bocal. A temperatura inicial é obtida através da circulação de óleo aquecido no espaço anular.....	72
Figura 3.8 - A primeira figura é um esquema das dimensões gerais de um bocal. A segunda figura mostra os dois bocais usinados com diâmetro de saída de 0,3 e 0,8 mm, respectivamente. Ao lado está a vista do orifício de saída do jato de um bocal. A quarta fotografia mostra o inserto de vidro utilizado, cujo diâmetro de saída é de 0,35 mm. Seu comprimento é de 12 mm, diferente dos outros dois que possuem uma cota de 8 mm, como na imagem “a”.	73
Figura 3.9 - Arranjo de medição instantânea da vazão através do nível de líquido no tubo de vidro graduado.	75
Figura 3.10 - Sinais típicos adquiridos no ensaio. É possível observar os sinais de pressão e temperatura de injeção, com um ruído representado por um desvio padrão de 2,9 kPa e 0,3 °C. Estão representados também os sinais da pressão da câmara, do sensor de posição da haste do injetor que indica o tempo de duração da injeção e do sensor de nível de líquido que indica os intervalos de deslocamento do volume a cada 1,90 mL, representado por t_a , t_b e t_c	76
Figura 3.11 - Geometria do aparato óptico.	78
Figura 3.12 - Equipamentos: espelhos, lâmpada, lente convergente e filtro espacial.....	78
Figura 3.13 - Equipamento: espelhos, filtro espacial e câmara CCD.	79
Figura 3.14 - Sistema de aquisição de dados, onde o canal "0" dispara o injetor e o canal "1" dispara a aquisição das imagens.	80
Figura 3.15 - Esquema dos sinais de saída. A linha vermelha corresponde ao sinal do acionamento do injetor, ou canal “0”, e a linha azul corresponde ao sinal de disparo para a aquisição das imagens, canal “1”.	81
Figura 3.16 - Comparação dos tempos dos sinais de saída e de entrada. O	

- primeiro sinal representa o sinal para a câmara CCD habilitar a aquisição das imagens na rampa de descida, indicada pelas setas. O segundo sinal apenas apresenta o tempo em que o computador habilitou a abertura do injetor. Estes dois sinais não possuem a representação da voltagem em sua amplitude. O terceiro e o quarto sinal são as representações típicas de um sinal adquirido da pressão de injeção e do sinal de posição da haste, respectivamente. Neles constam as coincidências dos transitórios devido à abertura e fechamento da injeção. 82
- Figura 3.17 - A primeira fotografia, corresponde à imagem original obtida na câmara CCD. As duas imagens seguintes, b) e c), correspondem ao campo das linhas ímpares e pares da original, respectivamente. Com esta decomposição, é possível notar as descontinuidades no jato devido à evaporação. 84
- Figura 3.18 - Sequência de fotografias obtidas em um único ensaio conforme os intervalos de 0,10 , 0,50 , 2,50 e 4,50 segundos, após a abertura do injetor. 85
- Figura 3.19 - Fotografia da mesa óptica que possui a fonte de luz. No caso, esta imagem mostra o “flash” empregado que possui um tempo de exposição de 2 μ s. 86
- Figura 3.20 - Interface do programa computacional “Aqjatos” projetado e programado para adquirir as imagens dos jatos desta bancada. Nele se regula o tempo de exposição da câmara CCD (Sync Master), quantidade de imagens adquiridas no ensaio, duração do ensaio e, utilização de uma segunda câmara. 87
- Figura 3.21 - Esquema dos sinais que fazem o sincronismo entre a lâmpada de “flash” e a câmara CCD. 88
- Figura 3.22 - Exemplo de sequência de imagens adquiridas em um único ensaio. Observa-se que as imagens do lado esquerdo possuem os dois campos, enquanto as outras estão com um único campo, e por isso estão mais escuras. 89
- Figura 3.23 - Planta esquemática da disposição das câmaras CCDs. 90
- Figura 3.24 - Comparação de duas imagens de um mesmo ensaio. a) A primeira foi obtida pelo método “Schlieren” que destaca bastante a movimentação e evaporação do fluido em volta do jato e b) a outra foi adquirida pela segunda câmara CCD que destaca a trajetória das gotículas. A primeira imagem possui um tempo de exposição de 2 μ s e a segunda de 1000 μ s. O líquido foi injetado a uma pressão de injeção de 750 kPa, temperatura de injeção de 56°C e pressão do reservatório é a metade da pressão de saturação da substância, iso-octano, que é de 25 kPa. 91
- Figura 3.25 - A primeira é a fotografia sem o jato e a seguinte contém o jato. A subtração da segunda fotografia pela fotografia sem o jato resulta na última imagem com um jato visualmente mais evidente. 92

Figura 4.1 - Representação gráfica das condições de injeção e a pressão da câmara onde é descarregado o jato pelo bocal de 0,3 mm, rugoso.	98
Figura 4.2 - Representação dos parâmetros geométricos relevantes de um experimento típico.....	98
Figura 4.3 -Vazão mássica em função da razão da pressão da câmara e a pressão de injeção. A pressão de injeção é de 125 kPa.....	99
Figura 4.4 -Vazão mássica em função da razão da pressão da câmara e a pressão de injeção. A pressão de injeção é de 250 kPa.....	100
Figura 4.5 -Vazão mássica em função da razão da pressão da câmara e a pressão de injeção. A pressão de injeção é de 500 kPa.....	100
Figura 4.6 -Vazão mássica em função da razão da pressão da câmara e a pressão de injeção. A pressão de injeção é de 750 kPa.....	101
Figura 4.7 - Comportamento do comprimento de extinção do núcleo líquido, L_E , em função da temperatura de injeção. São diferenciados os ensaios com pressão de injeção de 125 kPa, 250 kPa, 500 kPa e 750 kPa (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro).	102
Figura 4.8 - Representação das dimensões medidas na estrutura da onda de choque.	102
Figura 4.9 - O comprimento representativo, r_1 (no primeiro gráfico) e r_2 são indicados em função da pressão da câmara para os ensaios cuja pressão de injeção é 125 kPa (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro). ..	103
Figura 4.10 - O comprimento representativo, r_1 (no primeiro gráfico) e r_2 são indicados em função da pressão da câmara para os ensaios cuja pressão de injeção é 250 kPa (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro). ..	104
Figura 4.11 - O comprimento representativo, r_1 (no primeiro gráfico) e r_2 são indicados em função da pressão da câmara para os ensaios cuja pressão de injeção é 500 kPa (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro). ..	105
Figura 4.12 - O comprimento representativo, r_1 (no primeiro gráfico) e r_2 são indicados em função da pressão da câmara para os ensaios cuja pressão de injeção é 750 kPa (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro). ..	106
Figura 4.13 - Sequência de duas imagens de um mesmo ensaio onde a pressão e temperatura de injeção é de 500 kPa e 76 °C e, o R_p é de 50, praticamente, pois a pressão da câmara variou de 0,90 a 0,99 kPa, respectivamente, em um intervalo de 1 s.	107
Figura 4.14 - Sequência de imagens de um mesmo ensaio onde a pressão de injeção é de 250 kPa e temperatura de 56 °C e o R_p é de 500, praticamente. No entanto, a pressão da câmara, desde a primeira imagem elevou de 0,05, 0,09 e, por último, 0,14 kPa em um intervalo de tempo de 1s entre cada imagem obtida.	107
Figura 4.15 - Representação gráfica das condições de injeção e a pressão da câmara onde é descarregado o jato pelo bocal rugoso de 0,8 mm - Série R08. Um desenho do bocal é visto no detalhe da figura.....	108

Figura 4.16 -Vazão mássica em função da razão da pressão da câmara e a pressão de injeção obtida dos ensaios com o bocal de aço de diâmetro 0,8 mm.....	109
Figura 4.17 - Comportamento do comprimento de extinção do núcleo líquido em função da temperatura de injeção. São diferenciados os ensaios com pressão de injeção de 125 kPa e 250 kPa (bocal rugoso com 0,8 mm de diâmetro).	110
Figura 4.18 - Os comprimentos, r_1 (no primeiro gráfico) e r_2 são representados nos gráficos acima que contêm todos os ensaios da série R08 (bocal rugoso com 0,8 mm de diâmetro).	111
Figura 4.19 - Gráfico dos dados coletados do ensaio com pressão de injeção de 125 kPa e temperatura de 56 °C (ensaio R08\1056500). A duração do regime permanente é indicada para o intervalo com temperatura de injeção constante.	112
Figura 4.20 - Representação gráfica das condições de injeção e a pressão da câmara onde é descarregado o jato pelo bocal de vidro de 0,35 mm - Série V03. Um desenho do inserto de vidro é visto no detalhe da figura.	113
Figura 4.21 -Vazão mássica em função da razão da pressão da câmara e a pressão de injeção obtida dos ensaios com pressão de injeção de 125 kPa e bocal de vidro de diâmetro 0,35 mm.	114
Figura 4.22 -Vazão mássica em função da razão da pressão da câmara e a pressão de injeção obtida dos ensaios com pressão de injeção de 250 kPa e bocal de vidro de diâmetro 0,35 mm.	115
Figura 4.23 -Vazão mássica em função da razão da pressão da câmara e a pressão de injeção obtida dos ensaios com pressão de injeção de 500 kPa e bocal de vidro de diâmetro 0,35 mm.	115
Figura 4.24 - Comportamento do comprimento de extinção do núcleo líquido em função da temperatura de injeção. São diferenciados os ensaios com pressão de injeção de 125, 250 e 500 kPa (bocal de vidro com 0,35 mm de diâmetro).	116
Figura 4.25 - Os comprimentos, r_1 (no primeiro gráfico) e r_2 são representados nos gráficos acima que contêm os ensaios da série V03 (bocal rugoso com 0,35 mm de diâmetro) com pressão de injeção de 125 kPa.	117
Figura 4.26 - Os comprimentos, r_1 (no primeiro gráfico) e r_2 são representados nos gráficos acima que contêm os ensaios da série V03 (bocal rugoso com 0,35 mm de diâmetro) com pressão de injeção de 250 kPa.	118
Figura 4.27 - Os comprimentos, r_1 (no primeiro gráfico) e r_2 são representados nos gráficos acima que contêm os ensaios da série V03 (bocal rugoso com 0,35 mm de diâmetro) com pressão de injeção de 500 kPa.	119
Figura 5.1 - Alguns ensaios de valores de injeção nominais $P_0 = 250$ kPa e $T_0 = 76$ °C ($P_{\text{sat}} = 54$ kPa).....	122

Figura 5.2 - Alguns ensaios de valores de injeção nominais $P_0 = 250$ kPa e $T_0 = 130$ °C ($P_{\text{sat}} = 220$ kPa).....	122
Figura 5.3 - Alguns ensaios de valores de injeção nominais $P_0 = 500$ kPa e $T_0 = 130$ °C ($P_{\text{sat}} = 220$ kPa).	123
Figura 5.4 - Alguns ensaios de valores de injeção nominais $P_0 = 500$ kPa e $T_0 = 162$ °C ($P_{\text{sat}} = 440$ kPa).	123
Figura 5.5 - Caso típico de um comportamento da vazão. Os pontos correspondem aos ensaios realizados a uma pressão e temperatura de injeção de 250 kPa e 95 °C, respectivamente. A linha vertical contínua se refere à pressão de vapor de 90 kPa a outra linha contínua corresponde à vazão mássica estimada através da Eq. 4.3.....	125
Figura 5.6 - Gráfico que mostra as condições de injeção dos ensaios feitos para o bocal de aço com 0,3 mm de diâmetro (R03) e a pressão metaestável alcançada pelo ensaio.....	126
Figura 5.7 - Gráfico que mostra o grau de metaestabilidade em função da pressão de injeção.	129
Figura 5.8 - Gráfico que mostra a razão de pressões (R_p) em função da razão entre a pressão de saturação e de injeção. Dependendo da pressão de injeção, ensaios acima da curva possuem a condição de máxima vazão..	129
Figura 5.9 - Jato com pressão e temperatura de injeção de 250 kPa e 95 °C. A pressão da câmara é de 174 kPa e a razão entre as pressões de saturação e câmara é de 0,5 (método “Schlieren”).	130
Figura 5.10 - Jato com pressão e temperatura de injeção de 250 kPa e 95 °C. A pressão da câmara é de 90 kPa e a razão entre as pressões de saturação e câmara é igual a 1. A primeira imagem foi adquirida pela câmara CCD que utiliza o recurso de “iluminação por detrás” e a segunda imagem, referente ao mesmo jato, foi obtida pelo método “Schlieren”. ..	131
Figura 5.11 - Jato com pressão e temperatura de injeção de 124 kPa e 93 °C. A pressão da câmara é de 44 kPa ($R_p = 1,9$). A primeira imagem foi adquirida pela câmara CCD que utiliza o recurso de “iluminação por detrás” e a segunda imagem, referente ao mesmo jato, foi obtida pelo método “Schlieren”. O detalhe da primeira imagem comprova a continuidade do filete do jato.....	133
Figura 5.12 - Ensaio 2368002: Jato com pressão e temperatura de injeção de 250,3 kPa e 95,3 °C. A pressão da câmara é de 45 kPa ($R_p = 2,0$). Imagem obtida pelo método “Schlieren”.	134
Figura 5.13 - Ensaio 7368001: jato com pressão e temperatura de injeção de 750 kPa e 95 °C. A pressão da câmara é de 93,3 kPa e a razão entre as pressões de saturação e câmara é igual a 1. A primeira imagem foi adquirida pela câmara CCD que utiliza o recurso de “iluminação por detrás” e a segunda imagem, referente ao mesmo jato, foi obtida pelo método “Schlieren”.	136

- Figura 5.14 - Ensaio 2393002: jato com pressão e temperatura de injeção de 250 kPa e 120 °C. A pressão da câmara é de 89,9 kPa e a razão entre as pressões de saturação e câmara é igual a 1,9. Imagem obtida pelo método “Schlieren”. 137
- Figura 5.15 - Ensaio 7349002: jato com pressão e temperatura de injeção de 750 kPa e 76 °C. A pressão da câmara é de 24,9 kPa e a razão entre as pressões de saturação e câmara é igual a 2,0. Imagem obtida pelo método “Schlieren”. No canto superior esquerdo, na mesma escala de tamanho, a imagem obtida pelo método de “iluminação por detrás”. Este retrata uma grande dispersão de gotículas. 138
- Figura 5.16 - Ensaio 2349005: jato com pressão e temperatura de injeção de 250 kPa e 76 °C. A pressão da câmara é de 10,1 kPa e a razão entre as pressões de saturação e câmara é igual a 5,1. Imagem obtida pelo método “Schlieren”. 139
- Figura 5.17 - Ensaio 2404005: jato com pressão e temperatura de injeção de 250 kPa e 131 °C. A pressão da câmara é de 43,7 kPa e a razão entre as pressões de saturação e câmara é igual a 5,1. Imagem obtida pelo método “Schlieren”. O destaque foi obtido em 0,5 s após adquirir a fotografia principal..... 140
- Figura 5.18 - Ensaio 2404010: jato com pressão e temperatura de injeção de 250 kPa e 131 °C. A pressão da câmara é de 24,0 kPa e a razão entre as pressões de saturação e câmara é igual a 9,5. Imagem obtida pelo método “Schlieren”. A imagem menor no detalhe foi obtida em 0,5 s após esta fotografia principal. 140
- Figura 5.19 - Ensaio 7349050: jato com pressão e temperatura de injeção de 749,2 kPa e 76,8 °C. A pressão da câmara é de 1,0 kPa e a razão entre as pressões de saturação e câmara é igual a 51,3. Imagem obtida pelo método “Schlieren”. O destaque se refere à imagem obtida pelo outro método, na mesma escala. 142
- Figura 5.20 - Ensaio 7435100: jato com pressão e temperatura de injeção de 749,3 kPa e 161,8 °C. A pressão da câmara é de 4,6 kPa e a razão entre as pressões de saturação e câmara é igual a 96,8. Imagem obtida pelo método “Schlieren”. O destaque se refere a imagem obtida pelo outro método, na mesma escala. 142
- Figura 5.21 - Jato com pressão e temperatura de injeção de 744 kPa e 132,1 °C. A pressão da câmara é de 0,10 kPa. A primeira imagem foi uma filtragem da imagem original obtida pelo método “Schlieren” que está no canto superior esquerdo dela, assim como, a fotografia obtida pela iluminação por detrás está no outro canto. Neste pequeno quadro a lâmina está projetada atrás do jato e por isso não é visível. A segunda imagem também é outra filtragem do original com um mapa de cores diferente (“prism”). 143
- Figura 5.22 - A primeira corresponde à imagem original do jato do ensaio 5435m10c. Em seguida, são imagens filtradas e processadas

- matematicamente da original onde as imagens *b* e *c* foram submetidas a um filtro subtrativo que realça o campo de densidade do escoamento enquanto que, a quarta, foi processada para destacar o núcleo líquido e as ondas de choque. A última imagem se refere à fotografia obtida pelo método de iluminação por detrás. 146
- Figura 5.23 - Imagens originais do jato do ensaio 5349500, com condições de injeção de 497,6 kPa, 76,9 °C e a pressão da câmara de 0,09 kPa. A primeira obtida pelo método “Schlieren” e a outra pela “Iluminação por detrás”. 148
- Figura 5.24 - Imagens filtradas do jato do ensaio 5349500 da Fig. 5.23a. 149
- Figura 5.25 - Imagens originais do jato do ensaio 5329050, com condições de injeção de 501,6 kPa, 56,6 °C e a pressão da câmara de 0,50 kPa. A primeira obtida pelo método “Schlieren” e a outra pela “Iluminação por detrás”. 151
- Figura 5.26 - Imagens originais do jato do ensaio 5329100, com condições de injeção de 501,6 kPa, 56,6 °C e a pressão da câmara de 0,31 kPa. A primeira obtida pelo método “Schlieren” e a outra pela “Iluminação por detrás”. 152
- Figura 5.27 - Imagens originais do jato do ensaio 5329500, com condições de injeção de 504,1 kPa, 57,1 °C e a pressão da câmara de 0,12 kPa. A primeira obtida pelo método “Schlieren” e a outra pela “Iluminação por detrás”. 153
- Figura 5.28 - Comparação do comprimento de extinção do núcleo líquido, L_E , em função da razão da pressão de saturação e de injeção. Uma curva de ajuste para estes dados pode ser escrita através da seguinte equação: $L_E = 2,04.(P_{sat}/P_0)^{-0,6}$. O destaque no gráfico se refere à diferença de comprimento esperada nestes ensaios. 154
- Figura 5.29 - Imagens originais do jato do ensaio 1329050, com condições de injeção de 122,1 kPa, 56,4 °C e a pressão da câmara de 0,49 kPa. A primeira obtida pelo método “Schlieren” e a outra, que indica o atraso da onda de evaporação, pela “Iluminação por detrás”. 156
- Figura 5.30 - Imagens originais do jato do ensaio 1329500, com condições de injeção de 123,0 kPa, 56,5 °C e a pressão da câmara de 0,10 kPa. A primeira obtida pelo método “Schlieren” e a outra, que indica o atraso da onda de evaporação, pela “Iluminação por detrás”. 157
- Figura 5.31 - Os comprimentos representativos r_1 (em “a”) e r_2 em função da pressão da câmara. Aqui, todos com os ensaios possuem a pressão de injeção de 125 kPa (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro). 158
- Figura 5.32 - Os comprimentos representativos r_1 (em “a”) e r_2 em função da pressão da câmara. Aqui, todos com os ensaios possuem a pressão de injeção de 750 kPa (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro). 159
- Figura 5.33 - Os comprimentos representativos r_1 (em “a”) e r_2 em função da

- pressão da câmara. Aqui, todos com os ensaios possuem a temperatura de injeção de 56 °C (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro). 159
- Figura 5.34 - Os comprimentos representativos r_1 (em “a”) e r_2 em função da pressão da câmara. Aqui, todos com os ensaios possuem a temperatura de injeção de 95 °C (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro). 160
- Figura 5.35 - Gráfico que mostra a influência do comprimento do núcleo líquido na distância axial da onda de choque. Nele, a razão do comprimento característico r_2 pelo raio do bocal r_b está em função da pressão da câmara corrigido pelo fator de proporcionalidade do comprimento do núcleo líquido. As linhas tracejadas são os limites de erro encontrados em função da incerteza na medição desta razão (+/- 3,3) e da pressão da câmara (+/- 0,07). 161
- Figura 5.36 - Jatos com pressão e temperatura de injeção de 250 kPa e 22 °C. A pressão da câmara é a atmosférica e a razão entre as pressões de saturação e câmara é igual a 0,05. A primeira é um jato do bocal R08 e a outra do bocal de vidro V03. Os destaques nos cantos superiores das imagens são imagens adquiridas pela câmara CCD que utiliza o recurso de “iluminação por detrás”. As imagens principais foram obtidas pelo método “Schlieren” (ensaios feitos na calibração do C_D). ... 163
- Figura 5.37 - Ensaios com as condições de injeção de $P_0 = 125$ kPa, $T_0 = 56$ °C e $P_\infty = 0,150,07$ kPa. Cada imagem se refere aos bocais R03, R08 e V03, respectivamente. 164
- Figura 5.38 - Ensaios com as condições de injeção de $P_0 = 125$ kPa, $T_0 = 56$ °C e $P_\infty = 0,450,07$ kPa. Cada imagem se refere aos bocais R03, R08 e V03, respectivamente. 164
- Figura 5.39 - Ensaios com as condições de injeção de $P_0 = 125$ kPa, $T_0 = 95$ °C e $P_\infty = 0,240,07$ kPa. Cada imagem se refere aos bocais R03, R08 e V03, respectivamente. 165
- Figura 5.40 - Ensaios com as condições de injeção de $P_0 = 250$ kPa, $T_0 = 120$ °C e $P_\infty = 0,420,07$ kPa. Cada imagem se refere aos bocais R03, R08 e V03, respectivamente. 165
- Figura 5.41 - Comparativo das máximas vazões superficiais alcançadas pelos bocais com relação à seção de saída. Os símbolos da legenda representam a pressão de injeção e a cor do símbolo se refere ao bocal experimentado. 166
- Figura 5.42 - Comparativo das máximas razões de pressão de saturação e da câmara (R_P) para alcançar a máxima vazão. Os símbolos da legenda representam a pressão de injeção e a cor do símbolo se refere ao bocal experimentado. 167
- Figura 5.43 - Comparativo do grau de metaestabilidade em função da pressão de injeção. Os símbolos da legenda representam a pressão de injeção e a cor do símbolo se refere ao bocal experimentado. 168
- Figura 5.44 - Comparativo do comprimento de extinção do núcleo líquido

- normalizado em função da razão da pressão de saturação e de injeção. Uma curva de ajuste para estes dados pode ser escrita através da seguinte equação: $L_E/D_b = 13,643.(P_{sat}/P_0)^{-0,607}$. O tracejado se refere ao limite inferior e superior de erro desta curva em função da precisão na medição deste comprimento que é de 3,3 para o bocal de 0,30 mm ($\Delta L_E/D_b = \pm 1,0/D_b$). 170
- Figura 5.45 - Imagens do jato do ensaio V03\1329m10, com condições de injeção de 121,7 kPa, 56,5 °C, pressão da câmara de 0,35 kPa e velocidade de 17,2 m/s. Nela existe a indicação do atraso da onda de evaporação, pela “Iluminação por detrás”. 171
- Figura 5.46 - Imagens do jato do ensaio V03\1349500, com condições de injeção de 249,9 kPa, 74,8 °C, pressão da câmara de 1,70 kPa e velocidade de 24,9 m/s. Nela existe a indicação do atraso da onda de evaporação, pela “Iluminação por detrás”. 171
- Figura 5.47 - Imagens do jato do ensaio V03\2393m10, com condições de injeção de 250,4 kPa, 120,1 °C, pressão da câmara de 0,60 kPa e velocidade de 23,8 m/s. Nela não existe um atraso da onda de evaporação perceptível..... 172
- Figura 5.48 - O comprimento representativo, r_1 (a primeira imagem) e r_2 dos bocais estudados são comparados com os ensaios cuja pressão e temperatura de injeção são de 125 kPa e 56 °C. 173
- Figura 5.49 - O comprimento representativo, r_1 (a primeira imagem) e r_2 dos bocais estudados são comparados com os ensaios cuja pressão e temperatura de injeção são de 125 kPa e 95 °C. 173
- Figura 5.50 - O comprimento representativo, r_1 (a primeira imagem) e r_2 dos bocais estudados são comparados com os ensaios cuja pressão e temperatura de injeção são de 250 kPa e 95 °C. 174
- Figura 5.51 - O comprimento representativo, r_1 (a primeira imagem) e r_2 dos bocais estudados são comparados com os ensaios cuja pressão e temperatura de injeção são de 250 kPa e 120 °C. 174
- Figura 5.52 - A razão do comprimento característico r_1 pelo raio do bocal r_b em função da razão da pressão de saturação e da câmara corrigido pelo fator de proporcionalidade do comprimento do núcleo líquido. As linhas tracejadas são os limites da correlação (r_1/r_b 50%). No trabalho de Crist e outros (1966), para um escoamento de compressíveis de diversos gases foi obtida a correlação de $r_1/r_b \cong 0,373 * (P_0/P_\infty)^{0,523}$ enquanto a curva que melhor se ajusta para estes resultados é igual a $r_1/r_b \cong 2,152 * [(P_{sat}/P_\infty).(P_0/P_{sat})^{0,6}]^{0,521}$ 176
- Figura 5.53 - Imagens do jato do ensaio V03\1329500 com pressão e temperatura de injeção de 123,5 kPa e 56,7 °C e, pressão da câmara de 0,27 kPa. A primeira é a imagem original obtida pelo “Schlieren” e a segunda foi obtida pela “iluminação pro detrás”. A última imagem é

filtrada matematicamente da primeira e mostra a onda de choque a distância de 0,8 mm da saída do bocal.....	177
Figura 5.54 - Imagens do jato do ensaio V03\2368500 com pressão e temperatura de injeção de 250,8 kPa e 94,4 °C e, pressão da câmara de 0,34 kPa. A primeira é a imagem original obtida pelo “Schlieren”, a segunda e a terceira foram filtradas desta original. A última imagem foi obtida pela “iluminação pro detrás”.	177
Figura 5.55 - Imagens do jato do ensaio V03\2393m10 com pressão e temperatura de injeção de 255,4 kPa e 120,6 °C e, pressão da câmara de 0,53 kPa. A primeira é a imagem original obtida pelo “Schlieren” e tanto a segunda como a terceira foram filtradas desta original. A última imagem foi obtida pela “iluminação pro detrás”.	178
Figura 5.56 - Imagens dos jatos dos ensaios V03\1368100 e V03\1368500, respectivamente. Suas pressões de injeção eram de 123,2 e 123,7 kPa, temperatura de 94,4 °C e 95,0 °C e, pressões da câmara de 0,86 e 0,23 kPa. As pressões metaestáveis calculadas eram de 23,2 e 22,5 kPa e a incerteza associada é de 5 kPa.	179
Figura 6.1 - Comparação do comprimento do núcleo de líquido experimental e o calculado do bocal R03.	183
Figura 6.2 - Comparação do ângulo de giro experimental e o calculado do bocal R03.	183
Figura 6.3 - Exemplo de medição do ângulo de giro do jato do ensaio 7349500. Este ângulo corresponde à tangente da trajetória do fluido quando parte da onda de evaporação. Devido à técnica de “iluminação por detrás”, este procedimento envolve um erro demasiado.....	184
Figura 6.4 - Comparação do comprimento do núcleo de líquido experimental e o calculado do bocal R08.	185
Figura 6.5 - Comparação do comprimento do núcleo de líquido experimental e o calculado do bocal V03.....	186
Figura 6.6 - Gráfico que mostra as condições de injeção dos ensaios feitos para o bocal de aço com 0,3 mm de diâmetro (R03) e a pressão metaestável alcançada pelo ensaio. Nele são indicados os ensaios com atraso da onda de evaporação.	187
Figura 6.7 - Ilustração esquemática da geometria das ondas de choque que ocorrem próxima da saída do bocal. A parte escurecida da expansão do esquema, entre a onda de choque oblíqua e o núcleo de líquido, pode apresentar ondas de choque reflexivas e oblíquas, internamente a esta região. O diâmetro do núcleo de líquido também pode aumentar após a saída do bocal.....	189
Figura 6.8 - Ilustração esquemática da geometria das ondas de choque que ocorrem próxima da saída para o bocal de vidro, semelhante ao explicado na Fig 6.7.	190

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tabela comparativa das propriedades termodinâmicas de alguns líquidos.....	42
Tabela 2.2 - Valores da tensão superficial em função da temperatura. Os valores para as temperaturas de 20 e 90 °C são obtidos por Vargaftik (1996), e para temperaturas acima, são estimados através de polinômio.....	42
Tabela 2.3 - Propriedades termodinâmicas dos fluidos para temperatura inicial de 40 °C e para determinação da constante B a 20 °C através da Eq. (2.14).	54
Tabela 2.4 - Comparação dos resultados obtidos através de uma solução numérica e analítica para a razão das pressões de uma onda de evaporação em função do grau de metaestabilidade, Π	54
Tabela 3.1 - Incertezas relativas às medições realizadas.	95
Tabela 5.1 - Em função das categorias das condições de injeção, P_{inj} e T_{inj} , respectivamente, são mostrados a média da pressão de saturação, a pressão metaestável média das categorias de ensaio e seu desvio, vazão superficial mássica e as razões entre a pressão de saturação e a pressão de injeção, assim como, a pressão de saturação e a pressão metaestável do líquido. Finalmente, é apresentado o grau de metaestabilidade médio alcançado em cada série de experimentos. O desvio de $2\sigma_{P_{lm}}$ é duas vezes o desvio padrão da amostra coletada de cada categoria de ensaio.....	127
Tabela 5.2 - Determinação dos dados médios obtidos, sob a condição de máxima vazão, exemplificada para a categoria com $P_{inj} = 750$ kPa e $T_{inj} = 162^\circ\text{C}$	128
Tabela 5.3 - Em função das categorias das condições de injeção, P_{inj} e T_{inj} , estão os valores do desvio da amostra e das incertezas de P_{lm} (UP1). Esta última incerteza depende da vazão medida e é calculada conforme deduzida no Apêndice I.....	128
Tabela 5.4 - Representação do comprimento do núcleo líquido, LE , para a série de ensaios com pressão e temperatura de injeção de 500 kPa e 56 °C, respectivamente.....	150
Tabela 5.5 - Alguns ensaios de Athans (1995) com um bocal de 0,864 mm de diâmetro utilizando iso-octano.....	169
Tabela 5.6 - Ensaio de Athans (1995) com dimensões da onda de choque para o bocal de 0,864 mm de diâmetro utilizando iso-octano.	175
Tabela 6.1 - Resultados experimentais médios obtidos pelas séries de ensaios do bocal R03.	181
Tabela 6.2 - Resultados calculados das séries de ensaios do bocal R03 a jusante da onda de evaporação.	182

Tabela 6.3 - Resultados experimentais médios obtidos pelas séries de ensaios do bocal R08 (de aço com 0,8 mm de diâmetro) e bocal V03 (de vidro com diâmetro de 0,35 mm).	184
Tabela 6.4 - Resultados calculados, a jusante da onda de evaporação, das séries de ensaios do bocal R08 (de aço com 0,8 mm de diâmetro) e bocal V03 (de vidro com diâmetro de 0,35 mm).	185
Tabela B.1 - Tabela com os ensaios da série “RUN1” (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro).	198
Tabela B.2 - Tabela com os ensaios da série “RUN2” (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro).	199
Tabela B.3 - Tabela com os ensaios da série “RUN3” (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro).	200
Tabela B.4 - Relação do comprimento do núcleo líquido de cada ensaio (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro).	202
Tabela B.5 - Relação das dimensões da onda de choque formada como o raio, r_1 e a distancia axial, r_2 (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro).	205
Tabela C.1 - Tabela com os ensaios da série “R08” (bocal rugoso com 0,8 mm de diâmetro).	268
Tabela C.2 - Relação do comprimento do núcleo líquido de cada ensaio - Série R08 (bocal rugoso com 0,8 mm de diâmetro).	269
Tabela C.3 - Relação das dimensões da onda de choque formada como o raio, r_1 e a distancia axial, r_2 (bocal rugoso com 0,8 mm de diâmetro).	271
Tabela C.4 - Tabela com os ensaios da série “V03” (bocal de vidro com 0,35 mm de diâmetro).	280
Tabela C.5 - Relação do comprimento do núcleo líquido de cada ensaio - Série V03 (bocal de vidro com 0,35 mm de diâmetro).	281
Tabela C.6 - Relação das dimensões da onda de choque formada como o raio, r_1 e a distancia axial, r_2 (bocal de vidro com 0,35 mm de diâmetro).	282

LISTA DE SÍMBOLOS

A	=	área na saída do bocal; ou constante da equação de saturação do fluido
A_L	=	área lateral do cone líquido
B	=	constante da equação de saturação do fluido; ou erro sistemático
c	=	velocidade do som
C_D	=	coeficiente de descarga
C_v	=	calor específico a volume constante
$\tilde{C}_v$	=	calor específico adimensional a volume constante
D_b	=	diâmetro do bocal
h	=	entalpia específica
J	=	vazão mássica superficial
J_n	=	taxa de nucleações do vapor crítico
Ja	=	número de Jacob , $Ja = \rho_L \cdot C_p \cdot \Delta T / [\rho_v \cdot (h_v - h_L)]$
k	=	constante de Boltzmann
L_d	=	extensão do atraso da evaporação
L_E	=	comprimento de extinção do núcleo de líquido
m	=	massa de uma simples molécula de líquido ($m=M/N_A$)
$\dot{m}$	=	vazão mássica experimental
$\dot{m}_e$	=	vazão mássica estimada
M	=	número de Mach; ou massa molecular
N_A	=	número de Avogadro ($6,02 \times 10^{26}$ moléculas/kg-mol)
N_0	=	número da densidade molecular do líquido ($N_0 = N_A / v_L M$)
P	=	pressão; ou limite de precisão
P_v	=	pressão interna da nucleação de vapor
P_∞	=	pressão da câmara onde é descarregado o jato
Q	=	vazão
r	=	raio
r_1	=	raio característico da estrutura da onda de choque
r_2	=	distância característica da estrutura da onda de choque
$\bar{R}$	=	constante universal dos gases
R	=	constante do gás
R_p	=	razão entre a pressão de saturação e a pressão da câmara, $P_{\text{sat}} / P_\infty$

Re	=	número de Reynolds , $Re = \rho.u.D_b/\mu$
s	=	entropia específica
t	=	tempo
T	=	temperatura
u	=	velocidade total do fluido
U	=	velocidade da onda; ou incerteza de uma medição
v	=	volume específico
V ou Vol	=	volume consumido na injeção
W	=	velocidade normal à onda do fluido
We	=	número de Weber , $We = D_b.\rho_v.u^2/\sigma$
x	=	título da mistura bifásica
Z	=	fator de compressibilidade
β	=	ângulo da onda de evaporação
γ	=	razão entre os calores específicos à pressão e volume constantes
μ	=	viscosidade dinâmica
θ	=	ângulo de giro em função da onda de evaporação
ρ	=	massa específica
σ	=	tensão superficial; ou desvio padrão
Δ	=	diferença entre a propriedade inicial e final
$\Phi(P_0)$	=	termo da solução proposta para onda de evaporação quando $P_0 \gg P_{sat}$
Π	=	grau de metaestabilidade, $\Pi = 1 - P_1/P_{sat}$

Subscritos:

0	=	estado inicial ou de injeção
1	=	à montante da onda de evaporação
2	=	à jusante da onda de evaporação
3	=	à montante da onda de choque
4	=	à jusante da onda de choque
b	=	bocal
C	=	ponto crítico
CJ	=	condição de Chapman-Jouguet
L	=	líquido

m = média

LV = diferença entre os valores da propriedade no estado vapor e no líquido

sat = estado de saturação

1. INTRODUÇÃO

A motivação principal dos estudos de jatos evaporativos foi a análise dos fenômenos de mudança de fase que ocorrem sob determinadas circunstâncias em dispositivos e equipamentos térmicos ainda não completamente elucidados. Para isso, utilizou-se nos experimentos o hidrocarboneto iso-octano (C_8H_{18}), também chamado de 2,2,4 tri-metil-pentano. Um experimento típico consistia em injetar uma amostra de líquido através de um bocal cilíndrico-convergente em uma câmara de baixa pressão cujo valor era menor que a pressão de saturação do líquido à temperatura de injeção. Como consequência, se estabelece uma condição de mudança de fase baseada no rebaixamento da pressão, o que é conhecido na literatura inglesa como “flashing”.

Figura 1.1 – A imagem se refere a um jato de iso-octano com pressão (P_0) e temperatura de injeção (T_0) de 250 kPa e 56°C, respectivamente. A pressão de saturação é 300 vezes maior que a pressão da câmara (P_∞) que é de 0,09 kPa.

Os experimentos foram documentados através de técnicas fotográficas especiais descritas adiante que permitiram registrar a presença de ondas de choque. A Fig. 1.1 ilustra a imagem típica de um jato inicialmente a uma pressão de injeção (P_0) e temperatura de injeção (T_0). Nesta figura são ilustradas as principais características dos jatos, como a formação de um núcleo de líquido junto à saída do bocal e uma estrutura de choque envolvendo aquele núcleo de líquido. Nela, estão ainda indicadas

as condições de injeção, isto é a pressão (P_0) e a temperatura (T_0), e a pressão da câmara onde é descarregado o jato (P_∞) cujo valor é menor que a pressão de saturação do líquido (P_{sat}) à temperatura de injeção. Essa primeira análise do fenômeno indica a complexidade do mesmo. A presença de ondas de choque indica que fenômenos compressíveis e supersônicos se fazem presentes. Interessante, também é notar que esses fenômenos estão localizados junto à saída do bocal onde existe uma grande quantidade de gotículas de líquido escoando em alta velocidade. Isto dificulta sobremaneira o registro fotográfico do fenômeno, o que fez com que esse comportamento bifásico-compressível passasse despercebido por muito tempo, exceto para um ou outro pesquisador.

1.1 Motivação

A evaporação de jatos está ligada às aplicações de combustão de líquido em motores de combustão interna, sistemas de propulsão de aeronaves, motores de propulsão de foguetes e incineradores de fornos (Ramamurthi e Nandakumar, 1994, Faeth e outros, 1995, Lin e Rietz, 1998 e Lasheras e Hopfinger, 2000). Nestes equipamentos, comumente o fluido absorve o calor da câmara de combustão tornando a pressão de saturação maior que a pressão da câmara onde são descarregados. Isto pode ser vantajoso quando a injeção seguida da atomização, em virtude da evaporação, melhora a mistura combustível-comburente trazendo vantagens na eficiência da queima e, muitas vezes, proporcionando uma diminuição na emissão de poluentes. Com este mesmo objetivo, Oza e Sinnamon (1983) e Oza (1984) realizaram estudos sobre o pré-aquecimento do combustível empregando os mesmos injetores eletromagnéticos que são utilizados em motores de combustão interna. Eles verificaram que elevadas temperaturas de injeção promoviam um maior espalhamento do jato por causa da evaporação, conforme os seus registros fotográficos.

Conhecido como crioterapia, na medicina, jatos de nitrogênio líquido, do tipo “spray”, são empregados no tratamento de câncer de pele entre outras lesões. O nitrogênio líquido oferece a vantagem de poder ser estocado e, quando aplicado, permite uma elevada taxa de transferência de calor em regiões bem definidas, além

de não reagir quimicamente na grande maioria dos casos. Na área biofarmacêutica, a estabilidade física e química de compostos orgânicos é um problema e, como solução, técnicas criogênicas são empregadas para o congelamento e conservação destas substâncias. Conhecer o comportamento da evaporação do nitrogênio líquido nestas aplicações criogênicas pode melhorar a eficiência do procedimento. Como exemplo, Yu e outros (2004) estudaram o congelamento de micropartículas nano-estruturadas de proteínas em nitrogênio líquido. Eles utilizaram micro-bocais para injetar a proteína no próprio nitrogênio líquido.

Micro-bocais são empregados em impressoras do tipo jato de tinta. Na pesquisa destes micro-dispositivos, são feitos estudos sobre a formação da bolha na câmara térmica que expulsa a quantidade desejada de líquido no jato. Este tipo de mecanismo produz uma ebulição controlada em um intervalo de $10\ \mu\text{s}$ permitindo uma frequência de injeção de 20 kHz (Okuyama e outros, 2004). Dentro desta linha de micro-dispositivos, existem micro-bombas que também possuem um princípio de funcionamento semelhante (Khoo e outros, 2005). São dispositivos que realizam uma evaporação quase instantânea, semelhante à rápida evaporação que é observada nos jatos aqui estudados.

Na indústria petroquímica, sistemas de injeção de petróleo pré-aquecido são empregados para separar os diferentes compostos em tanques. Gases nobres misturados são separados e as substâncias líquidas mais voláteis tendem a evaporar (Pinti e Marty, 1998). Os outros compostos decantam, pois a pressão de saturação é superior à pressão do tanque. Neste caso, o entendimento da evaporação dos compostos mais leves pode melhorar o rendimento deste sistema. Seguindo este mesmo princípio de funcionamento, o óleo cru proveniente do petróleo, é aquecido e injetado em tanques, porém sob a intensa temperatura do meio onde foi injetado, moléculas mais complexas de hidrocarbonetos se “quebram”, formando hidrocarbonetos com menor número de átomos de carbono, ou seja, mais voláteis que podem ser separados na parte superior do tanque onde ocorre este processo. Segundo Wang e outros (2004), a eficiência deste processo, conhecido como craqueamento cujo objetivo é obter gasolina entre outros derivados, depende da atomização e mistura do jato evaporativo do óleo aquecido, entre outros fatores.

Catastróficos desastres, conhecidos como BLEVE (“Boiling Liquid

Expanding Vapour Explosion”, ou explosão decorrente da expansão do vapor evaporado do líquido) podem ocorrer tanto no armazenamento de GLP (van den Berg e outros, 2004), quanto em outros processos industriais (Ogle e outros, 2004). O surgimento de uma onda de choque que se propaga, aumentando drasticamente a pressão, está relacionada à evaporação repentina de grande quantidade de líquido. Isto se deve ao fato de que a evaporação do líquido multiplica o volume do fluido na ordem de dezenas e até centenas de vezes, de forma quase instantânea. Comenta Ogle e outros (2004) sobre um acidente que ocorreu em uma planta de produção de PVC (policloreto de vinila). Um dos tanques continha resíduo líquido do cloreto de vinila não polimerizado que evaporou rapidamente na operação de descarga do reator. Isto provocou a ruptura do tanque, seguida de um incêndio. Estudos de BLEVE não envolvem apenas a evaporação por causa da despressurização, neste campo existem fatos sobre a explosão de tanque de armazenamento em virtude do aquecimento imprevisto do mesmo (Stawczyk, 2003). No empenho de evitar ou minimizar os prejuízos, estudos sobre o escoamento do fluido que evapora em válvulas de segurança e discos de ruptura são dedicados com a finalidade de melhor dimensionar o tamanho destes dispositivos para uma ocasião de pressão de trabalho além da projetada (Lenzing e outros, 1998, Attou e outros, 2000, Darby, 2004 e Leung, 2004).

Quando é necessário medir a vazão de líquidos na condição de saturação, pode haver imprecisão da medida. Tomando o exemplo de uma placa de orifício, o líquido pode passar pela restrição do dispositivo com uma pressão bem abaixo da pressão de saturação sem sofrer a mudança de fase, limitando a confiabilidade do procedimento (Benjamin e Miller, 1941). O contrário também ocorre, o líquido evapora na passagem do dispositivo não permitindo utilizar a hipótese de fluido incompressível. No caso da evaporação acontecer, quando tal consideração não foi feita no projeto, o fluxo através da placa de orifício poderá ser menor do que aquele dimensionado. Para estas ocasiões sujeitas à evaporação na passagem do fluido, a norma ISA-S75.01 (1995) recomenda a utilização de fatores de correção empíricos para o cálculo de dimensionamento das principais válvulas empregadas na indústria. Quando ocorre evaporação na válvula, freqüentemente o fenômeno de cavitação é encontrado, comprometendo a vida útil do dispositivo. A norma ISA-S75.01 (1995)

cita que a cavitação acontece quando a pressão a jusante está próxima da saturação do líquido. Em virtude da dificuldade de visualizar a evaporação nestes dispositivos, obter o conhecimento sobre o mecanismo da evaporação nos jatos pode trazer conclusões sobre a decorrência destes fenômenos nestes dispositivos e determinar com melhor precisão a pressão de evaporação, abaixo da saturação. Complementando, a cavitação não é um mero fato no escoamento de líquido saturado em dispositivos. Estudos são feitos com injetores de diesel, cuja pressão de injeção é bem maior que a pressão média de saturação, porém o transitório da abertura destes dispositivos proporcionam evaporação localizada nos dispositivos, promovendo a cavitação (Badock e outros, 1999 e Arcoumanis e outros, 2001).

Os jatos evaporativos aqui estudados simulam bem a evaporação em dispositivos de expansão empregados em ciclos de refrigeração. O refrigerante sub-resfriado passa pela válvula de expansão, ou pelo tubo de orifício, expandindo a jusante do mecanismo. Um estudo do escoamento na expansão do fluido pode beneficiar no projeto destes dispositivos, principalmente na questão do ruído que estes mecanismos geram em seu funcionamento (Simões-Moreira e Bullard, 2003).

Finalmente, o estudo do jato pode beneficiar no processo de dessalinização de água. O processo conhecido como, “Multi-stage flash”, utilizado em plantas industriais com esta finalidade, possui bocais que injetam a água salgada quente em câmaras de baixa pressão dispostas seqüencialmente, proporcionando a evaporação e separação do vapor dessalinizado da água decantada com alta concentração de sal em cada estágio, ou câmara. Estudos deste processo são dedicados por Ferro e outros (2002) e Jernqvist e outros (2001), por exemplo.

1.2 Revisão Bibliográfica

1.2.1 A Presença do Núcleo de Líquido

Vieira (1999) testou jatos de querosene líquido. Os experimentos foram conduzidos com um jato de líquido produzido em bocais cônico-convergentes. A pressão do ambiente onde o líquido era descarregado estava abaixo de sua pressão de vapor da mistura, permitindo a mudança de fase líquido-vapor. A Fig. 1.2 mostra

uma seqüência de imagens de jatos evaporativos que aqui serão discutidos. Em todos os casos, os jatos a uma pressão de injeção de 600 kPa eram descarregados em uma câmara de baixa pressão, da ordem de 1,5 kPa. Quatro diferentes testes com diversas temperaturas de injeção foram testadas, proporcionando um aumento sucessivo da pressão média de saturação do líquido, dando origem à seqüência (a-d) de imagens da Fig. 1.2. Na primeira imagem, a evaporação não é perceptível, resultando em uma configuração contínua e retilínea do jato e, depois, com o aumento de temperatura, se verifica que a taxa de evaporação aumenta significativamente, diminuindo a porção líquida do jato, podendo, com isto, haver o surgimento de uma estrutura de onda de choque, como pode ser visto na Figs. 1.2c e 1.2d.

Figura 1.2 – Seqüência de imagens de jatos evaporativos de querosene com pressão de injeção de 600 kPa, e pressão da câmara igual a 1,5 kPa. A temperatura de injeção é de 38, 95, 120 e 260 °C, respectivamente (Vieira, 1999).

O trabalho de Ramamurthi e Nandakumar (1994) ilustra o fenômeno de evaporação do jato pelo mero esquema da Fig. 1.3. Em conformidade, este esquema em muito se assemelha com as imagens das Figs. 1.2b e 1.2c. A motivação deles era associada ao processo de atomização na injeção de propelente líquido em câmaras de combustão de foguetes. Outros autores que também tinham o mesmo objetivo são

Faeth e outros (1995), Lin e Rietz (1998) e Lasheras e Hopfinger (2000). Todos eles realizaram ensaios com água, sendo que, Faeth e outros ilustram a evolução da formação do núcleo de líquido com as etapas da atomização em função da velocidade do jato. É interessante que todos demonstram que o mecanismo de fragmentação do jato se inicia na periferia da porção líquida, originando um formato cônico.

Figura 1.3 – Exemplo de jato líquido que sofre uma desintegração, tomando um formato cônico. Nesta representação D_b é o diâmetro do bocal, L_d é o atraso que ocorre na fragmentação do núcleo líquido e L_E é o comprimento do núcleo líquido (Ramamurthi e Nandakumar, 1994).

Nos ensaios de Athans (1994), realizados com iso-octano, é mostrado um núcleo de líquido que se estende na linha axial do jato. Uma das técnicas foi a iluminação por “laser sheet”, ou seja, uma lâmina de laser que traspassa pela seção central do jato lateralmente, tomando o observador como referência. Uma fotografia típica está indicada na Fig. 1.4. Mesmo com uma temperatura de injeção próxima ao ponto crítico, é possível ver esta estrutura bem definida com boa qualidade. Ao redor desta estrutura, devido à evaporação, as gotículas desprendidas assumem um escoamento quase perpendicular em relação ao eixo axial do jato.

Figura 1.4 – Imagem de jato de iso-octano com temperatura e pressão de injeção de 223 °C e 2068 kPa, respectivamente, obtidas pelo método de “laser sheet” (Athans, 1994).

É importante também saber se existe repetibilidade nesta estrutura líquida, verificando se não existem variações do comprimento axial do núcleo de líquido ou do perfil axissimétrico, durante um ensaio que se mantém em regime permanente. Vieira (1999) observou esta regularidade, repetindo vários experimentos de mesmas condições iniciais. Um ensaio típico que possui duas imagens adquiridas em um intervalo de 1 s de um único jato está indicado na Fig. 1.5. Juntamente com a análise dos outros ensaios, foi comprovado que o núcleo de líquido assumiu uma regularidade dimensional durante toda a injeção.

Figura 1.5 - As fotografias representam as imagens de uma única injeção de querosene com pressão inicial de 500 kPa e pressão da câmara de 0,6 kPa e temperatura de injeção de 150 °C, obtidas pelo método “Schlieren”. A primeira foi obtida 1 s após a abertura do injetor e, depois de 1 s, a segunda foi adquirida (Vieira, 1999).

A questão da extensão dimensional da porção líquida foi o principal tema abordado por Lienhard e Day (1970) que realizaram ensaios com água e nitrogênio líquido. Eles verificaram que este parâmetro está relacionado com o número de Reynolds e o número de Weber. As imagens de Kitamura e outros (1986) muito se assemelham com as imagens de Lienhard e Day (1970), mostradas na Fig. 1.6. Os autores (Kitamura e outros, 1986) versam que o fenômeno está associado ao número de Jacob, ao número de Weber e a razão entre os volumes específicos fluido do ambiente e do líquido.

Figura 1.6 – Imagens obtidas por Kitamura e outros (1986) que ilustram uma seqüência de jatos de água que foram submetidos a uma pressão da câmara menor que a pressão de vapor, de forma progressiva. Isto proporcionou o aumento da evaporação, por conseqüência, da pulverização. A velocidade do inicial do jato, a pressão de injeção, e diferença entre a temperatura de injeção do fluido e a temperatura de saturação em função da pressão da câmara, são respectivamente: a) 8,5 m/s, 760 mmHg, valor negativo ; b) 8,65 m/s, 22 mmHg, 28,5 °C ; c) 8,22 m/s, 23 mmHg, 45,4 °C ; d) 8,22 m/s, 20 mmHg, 48 °C.

Wildgen e Straub (1989), da mesma forma que Lienhard e Day (1970) e, Kitamura (1986) e outros, identificaram formas de nucleações que acontecem no núcleo de líquido em jatos evaporativos. Eles observaram jatos que apresentavam uma pulverização ao redor de um cone líquido proporcionando uma configuração similar ao observado por Ramamurthi e Nandakumar (1994), Fig. 1.3, e jatos que apresentavam descontinuidade do filete líquido em pontos discretos (Fig. 1.6b). Eles atribuem esta diferença de configuração à origem da ocorrência da nucleação, ou

seja, a nucleação poderia iniciar na parede do bocal ou pelas partículas diluídas no fluido ou na superfície do jato. Se a nucleação heterogênea ocorrer na parede do bocal, ou devido às partículas suspensas no líquido, haverá uma frequência de bolhas que levará a ocorrência da quebra do filete líquido, conforme visto na Fig. 1.6b. O surgimento destas bolhas somente teria início imediato na região interna ao bocal, se a causa da nucleação fosse a existência de particulados. No entanto, se o jato está submetido a altas pressões e altas temperaturas de injeção, a configuração se aproxima daquela vista na Fig. 1.3. Neste caso, pode haver um atraso no surgimento da bolha, após a saída do bocal. Uma síntese de resultados do estudo é visto no gráfico mostrado na Fig. 1.7. Nele, existem os tipos de evaporação que os jatos estão sujeitos em função da pressão e temperatura de injeção. O jato é descarregado na atmosfera.

Figura 1.7 – Tipos de evaporação do jato de água descarregado na atmosfera emergente de um bocal com diâmetro de 0,5 mm. Suas características estão em função da pressão e temperatura de injeção. Na região “a” não existe nucleação. Na região “b”, a nucleação está na superfície do jato. Na região “c”, o jato é totalmente pulverizado com a presença do núcleo de líquido. Nucleações provenientes da parede interna do bocal ou pela presença de partículas estão na região inferior do gráfico e tem a mesma configuração de jato (em destaque).

1.2.2 A Condição de Líquido Metaestável

Também é comum que estes jatos evaporativos estejam associados ao fenômeno de metaestabilidade, ou seja, o líquido pode estar submetido a uma pressão abaixo de sua pressão de saturação sem que o mesmo mude para o estado de vapor. Quando o líquido assume esta condição, é dito que ele está superaquecido ou metaestável. Neste caso, é importante destacar este fenômeno e as consequências desta evaporação em líquidos metaestáveis, que possui características diferentes da evaporação comum. A energia interna acumulada durante o processo de metaestabilidade pode levar o líquido até a uma evaporação muito rápida, ou até mesmo explosiva sob determinadas situações. Reid (1976) cita que, longe de ser uma curiosidade experimental, a possibilidade de acidentes no meio industrial é muito grande. Um exemplo da potencialidade de acidentes está na manipulação de hidrocarbonetos leves, como o propano, cuja temperatura de ebulição é $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$, à pressão atmosférica. Sob determinadas condições, esta substância pode atingir uma temperatura de até $53\text{ }^{\circ}\text{C}$, à pressão atmosférica sem sofrer a vaporização. Isto se pontos de nucleação de vapor forem inibidos. Considerando agora o seguinte, se o propano se misturar acidentalmente com água, que esteja em uma faixa de temperatura de 55 a $71\text{ }^{\circ}\text{C}$, a evaporação deste hidrocarboneto se tornará explosiva. Esse tipo de fenômeno também foi constatado em outros hidrocarbonetos leves.

Assim como Lienhard e Day (1970), os ensaios de Kitamura e outros (1986) já associam o fenômeno da metaestabilidade no líquido injetado à queda repentina de pressão neste processo. A Fig. 1.6 ilustrou um jato que sofre a desintegração de seu filete líquido (caso *d*) em função da energia acumulada no processo de superaquecimento do líquido. Estes colocam em destaque esta energia interna armazenada pelo líquido durante o processo de superaquecimento representado pelo número de Jacob e associam ao número de Weber. Eles encontraram uma correlação para os ensaios. Aqueles pontos que estão acima da linha sólida sofreriam “flashing” (ou seja, tem a tendência de evaporar devido ao processo de metaestabilidade, como nos casos *b*, *c* e *d* da Fig. 1.6), como pode ser visto na Fig. 1.8.

Figura 1.8— Através da correlação feita por Kitamura e outros (1986), foi verificado que sofrem “flashing” aqueles ensaios que se encontram acima da linha sólida. No gráfico, a abscissa é o número de Weber, $We = \rho_v . D_b . u^2 / \sigma$ e, na ordenada o número de Jacob, $Ja = \rho_L . C_{pL} . \Delta T / (\rho_v . \Delta h_{LV})$, sendo ρ a massa específica do fluido, u a velocidade do jato, σ a tensão superficial do líquido, C_{pL} o calor específico do líquido, Δh_{LV} a entalpia de vaporização e, ΔT é a diferença entre a temperatura do líquido e a temperatura de saturação à pressão ambiente onde é descarregado o jato. Os subscritos “L” e “V” se referem às fases líquida e vapor.

1.2.3 A Formação da Onda de Evaporação

A evaporação de líquidos metaestáveis não acontece apenas de maneira explosiva, conforme foi visto pelo exemplo de Reid (1976). Simões-Moreira e outros (1993) indicam que os líquidos metaestáveis podem sofrer uma “evaporação rápida”, em contraposição à “evaporação explosiva”, que foi anteriormente exemplificada. No caso da evaporação rápida, a mudança de fase ocorre via uma onda de evaporação. Essa onda de evaporação avança sobre o líquido metaestável, formando uma descontinuidade ou frente de evaporação que transforma o líquido metaestável em uma mistura bifásica de alta velocidade. Simões-Moreira (1994) observou o fenômeno em experimentos unidimensionais e documentou o fenômeno de forma fotográfica como aquela fotografia da Fig. 1.9. Nessa figura, uma onda de evaporação se propaga de cima para baixo em n-dodecano líquido e metaestável.

Figura 1.9 - Onda de evaporação em n-dodecano metaestável.

Condições: A temperatura do líquido é de 230 °C, a pressão abaixo da onda é de 59 kPa, a pressão acima da onda de evaporação é de 37 kPa e velocidade da onda sob o líquido estacionário é de 47,2 cm/s (Simões Moreira, 1994).

De uma forma geral, os experimentos com ondas de evaporação indicam que, quando uma interface de líquido-vapor é exposta de forma súbita a um ambiente de baixa pressão, se observa a formação de uma onda de evaporação (Hill, 1991; Simões-Moreira, 1994, entre outros), a qual é caracterizada por uma queda significativa da pressão e uma evaporação circunscrita a uma região interfacial discreta e observável. Dentre alguns autores, é possível também destacar o trabalho de Emrich (1985) que observou a onda de evaporação em experimentos com CO₂ líquido cuja expansão ocorria de forma unidimensional em direção radial.

Kurschat e outros (1992) conduziram experimentos com jatos evaporativos e assumiram a hipótese de que o líquido emergente do bocal se encontra no estado metaestável em função da observação experimental de sua documentação fotográfica (Fig. 1.10) e do comportamento da vazão, a qual era limitada. Eles conjecturaram que o fenômeno obedeceria às condições de salto evaporativo entre o líquido e a região

de expansão bifásica que circunda esta porção seria uma onda de evaporação. A substância utilizada foi o C_6F_{14} (n-perfluorohexano, cujas propriedades termodinâmicas do ponto crítico são: $T_c=178\text{ }^\circ\text{C}$, $P_c=1,87\text{ MPa}$ e $v_c=1,58\text{ l/kg}$).

Figura 1.10 – Imagem do núcleo de líquido de um jato (Kurschat, 1992).

No trabalho anterior do autor (Vieira, 1999), foram apresentados ensaios de jatos evaporativos com substâncias como querosene, óleo diesel e, apenas três ensaios com n-dodecano ($C_{12}H_{26}$). O querosene compreendeu 80% de todos ensaios daquele trabalho, e teve por objetivo, obter dados iniciais do uso de n-dodecano que é uma substância de alto custo (aproximadamente US\$ 30,00 para cada 100 ml, sem as taxas de importação), assim como, é feita a aplicação de substâncias puras como indolene e ou iso-octano (C_8H_{18}) que simulam o comportamento da gasolina. Porém, o fato do querosene não ser uma substância pura, dificultou a parametrização do comportamento termodinâmico dos ensaios com a pressão de injeção ou pressão da câmara onde é descarregado o jato, pois não se tem um valor fixo de pressão de vaporização a uma certa temperatura de injeção destes fluidos. Assim como no trabalho de Kurschat e outros (1992), as imagens do trabalho anterior do autor (Fig. 1.2) que mostram a presença do núcleo líquido também corroboram para a hipótese da existência de uma onda de evaporação sobre o núcleo de líquido.

1.2.4 A Configuração do Jato Evaporativo

Oza (1984) realizou um estudo de “flashing” em mecanismos de injeção de combustíveis. Ele utilizou substâncias puras como o metanol (CH_3OH) e o indolene (C_6H_9N) em injetores que permitiam o pré-aquecimento do líquido. Ele também utilizou propano (C_3H_8) e verificou que, quanto maior a razão entre as pressões de injeção e da câmara onde foi feita a injeção destas substâncias, maior seria o ângulo

do cone de dispersão do jato pulverizado.

Em uma visão geral, existe uma caracterização dos tipos de jatos conforme a temperatura inicial de injeção e a pressão do ambiente onde é descarregado o jato, principalmente, como visto por Kurschat (1992) e Peter e outros (1994). Jatos descarregados em ambientes com pressões pouco abaixo de sua pressão de saturação possuíam a forma de um filete líquido contínuo que ao longo do percurso se quebrava devido às nucleações esporádicas (também chamado de "breakup points", na literatura inglesa), tal como observou Lienhard e Day (1970). Diminuindo ainda mais a pressão do ambiente em relação à pressão de vapor, também se verificava o aumento da dispersão do jato. No caso de Peter e outros (1994), a temperatura e o tamanho das gotículas dispersas de água também foram dados coletados no ensaio. A câmara onde expandia o jato alcançava uma pressão mínima de 600 Pa o que proporcionava ao jato de água de 19 °C uma grande dispersão das gotículas, enquanto Fuchs e Legge (1979), com praticamente as mesmas condições de injeção, mas com uma pressão de câmara muito menor, com valor de 0,1 Pa abs, conseguiram observar partículas de gelo devido ao congelamento das gotículas durante a expansão do jato. Neste último caso, estes simulavam a expulsão do condensado do vapor de água da atmosfera de dentro de cabines de naves espaciais em órbita.

Especificando melhor a classificação visual dos jatos de água realizada por Peter e outros (1994) tem-se que os jatos contínuos, do tipo 1, conforme ilustrado na Fig. 1.11, possuem o filete de líquido sem interrupção do mesmo e são jatos cuja pressão da câmara era ligeiramente menor que a pressão de saturação do líquido. Com o aumento da temperatura de injeção ou, alternativamente, pelo decréscimo da pressão da câmara, o jato se caracterizava pelo espalhamento das gotículas e um núcleo líquido definido (Fig. 1.11, tipo 2), cujo ângulo de espalhamento aumentava quando se acentuavam estes parâmetros (tipo 3). Como exemplo, no jato de água (Tipo 2), a razão entre a pressão de saturação e a pressão da câmara era igual a 3,1 com uma temperatura de injeção de 52,6 °C e, o outro tipo possuía uma temperatura de injeção 30,2 °C, e uma razão de pressões no valor de 6,8 (Tipo 3). Em estágios de maior temperatura de injeção ou menores pressões da câmara, o jato assumia uma pulverização quase completa na saída do bocal. Fica evidente que os autores descrevem um jato com uma porção contínua da parte líquida após a saída do bocal,

como mostrados pelo segundo e terceiro tipo da Fig. 1.11, caracterizando a existência de um núcleo de líquido.

Figura 1.11 – Perfis de jatos de água (Peter e outros, 1994). O primeiro jato tem uma baixa taxa de evaporação no filete do jato. O segundo tipo, com um pequeno acréscimo da razão entre as pressões de saturação e da câmara, já possui uma dispersão de gotículas devido à evaporação na periferia do núcleo líquido. Na seqüência, o terceiro jato tem um núcleo de líquido mais definido que o anterior com uma acentuada taxa de evaporação. No último caso, por causa da elevada razão entre as pressões de saturação e da câmara, o jato possui uma elevada taxa de evaporação proporcionando a dispersão imediata das gotículas logo na saída do bocal.

Resultados semelhantes dos diversos perfis de jatos evaporativos foram publicados por Kurschat e outros (1992) e podem ser vistos na Fig. 1.12. Porém, em suas observações, os ensaios com baixíssimas pressões na câmara, configuravam um jato com a presença do núcleo líquido que, imediatamente após passar pela onda de evaporação, se expandia em um escoamento supersônico que terminava por meio de ondas de choque registradas em suas fotografias, como aquelas vistas nas Figs. 1.12(d-f). Eles avaliaram os diversos tipos de jato em função do parâmetro H ou $R_p = P_{\text{sat}}(T_0)/P_{\infty}$. Como nota, este parâmetro H foi denominado como grau de superaquecimento pelos pesquisadores, e neste trabalho o símbolo R_p é empregado. O ensaio consistia na injeção do fluido que estava a pressão e temperatura iniciais de

reservatório constante. O bocal tinha um perfil cônico convergente, com um semi-ângulo de 10° , diâmetro de saída de 0,35 mm e comprimento de 5,7 mm. A injeção era feita em uma câmara de vácuo. A documentação fotográfica foi feita pelos métodos de “shadowgraph” e de interferometria, sendo este último utilizado para conseguir observar ondas de choque na condição de baixas pressões da câmara. No primeiro quadro, Fig. 1.12a, tem-se um jato de líquido subresfriado, ou seja, $R_p < 1$, sem a ocorrência de mudança de fase. Com a diminuição da pressão da câmara, abaixo da pressão de saturação, dá-se início a pontos de nucleação heterogênea, de onde a evaporação começa (Fig. 1.12b). Na sequência, foi diminuída ainda mais a pressão da câmara que teve como consequência uma mudança radical na estrutura do jato (Figs. 1.12c e seguintes). Em seguida, visualiza-se um núcleo líquido circundado por uma região supersônica terminada em um choque de forma mais ou menos elipsóide e estacionária, como exemplificado na Fig. 1.12d. A Fig. 1.12e mostra o núcleo líquido do jato. E na Fig. 1.12f é mostrada uma evaporação com altíssima razão, R_p .

Figura 1.12 - Jatos de diferentes tipos dependentes do parâmetro R_p (Kurschat e outros, 1992). Imagens obtidas pela técnica de interferometria. O primeiro jato não possui evaporação. No segundo, existem nucleações esporádicas quebrando a continuidade do jato. O jato apresentado em “c” pulveriza-se totalmente, com o acréscimo da razão da pressão de vapor e da câmara, R_p . A imagem seguinte, com um elevado valor de R_p , apresenta a formação da onda de choque. A penúltima imagem (“e”) mostra um jato semelhante ao anterior, porém destaca a presença do núcleo de líquido, além da onda de choque. Por último, um jato contendo um núcleo de líquido menor que o anterior e, uma onda de choque menor, embora a pressão da câmara seja a mesma comparada ao anterior, porém a temperatura de injeção é maior.

1.2.5 *O Escoamento a Jusante da Onda de Evaporação*

Existindo uma onda de evaporação circundando o núcleo de líquido, é importante verificar como é o comportamento do escoamento do fluido após esta onda. Segundo Kurschat e outros (1992), com elevadas razões entre pressão de saturação e pressão da câmara eles observaram um escoamento supersônico associado à formação de ondas de choque. Em seus estudos, verificaram que quanto menor a pressão da câmara, maior era a dimensão do diâmetro da estrutura da onda de choque, com formato cilíndrico, semelhante ao fenômeno de formação de um disco de Mach, que ocorre em escoamento de jatos de gás subexpandidos (ver próxima seção). Em seu modelo matemático unidimensional para a simulação do fenômeno, os mesmos adotaram as hipóteses simplificadoras como: o líquido estaria na condição de metaestável após sair pelo bocal; o escoamento após a onda de evaporação sofria uma expansão isentrópica e supersônica na direção perpendicular do eixo principal do jato, ou seja, apenas no sentido radial em coordenadas cilíndricas e, a pressão imediatamente após a onda de choque era a pressão da câmara. Sendo assim, foi possível determinar a pressão metaestável do líquido e os processos termodinâmicos que o fluido sofreu em todo o escoamento em função do diâmetro da estrutura da onda de choque obtida pela fotografia do ensaio. No entanto, suas imagens não proporcionam conclusões de como seria o escoamento após a onda de evaporação. Com o objetivo de esclarecer estes pontos, o autor desta tese utilizou o sistema “Schlieren” como método óptico, já que o mesmo proporciona uma visualização do gradiente de densidade do fluido no escoamento, e assim, oferecia uma idéia do comportamento do fluxo após a onda de evaporação (Vieira, 1999). Na Fig. 1.13, a primeira imagem é o registro fotográfico do jato adquirido pelo método “Schlieren” que possui a informação do gradiente de densidade através da intensidade de luz registrada na imagem. Desta imagem são obtidas as outras duas, através de processamento matemático. A primeira destaca bem o núcleo de líquido, algo que também pode ser visto nas outras duas imagens. Do núcleo de líquido, há um escoamento bifásico cuja terceira imagem da figura revela que, próximo do núcleo, a variação de densidade do fluido é maior que a variação ocorrida na região próxima a montante da onda de choque, pois é mostrada uma

grande concentração de iso-densidades próxima do núcleo. Além disso, as iso-linhas de densidade do fluido desta imagem apresentam um escoamento assumindo uma forma um pouco mais complexa do que propriamente radial. Por fim, a segunda imagem mostra a onda de choque resultante deste escoamento supersônico.

Figura 1.13 - Imagens de um jato com elevada taxa de evaporação. A primeira é a fotografia original e as outras correspondem às imagens filtradas e processadas matematicamente (Vieira, 1999).

Retomando ao trabalho de Athans (1994), é interessante observar na Fig. 1.4 que as linhas quase horizontais que se originam da visualização da trajetória das gotículas que saem do núcleo de líquido. Em virtude desta observação, Simões-Moreira (1999) introduziu a teoria das ondas de evaporação oblíquas, cujo tratamento matemático é semelhante ao das ondas de choque oblíquas da teoria clássica de escoamento de gases. De acordo com esta teoria, o fluido sofre um desvio angular ao passar por uma frente de evaporação. Esta frente de evaporação ocorre na superfície do cone de líquido, conforme esquema da Fig. 1.14. Na figura, a superfície do cone representaria a onda de evaporação cujo ângulo entre a geratriz e o eixo de simetria é denominado de β (ângulo da onda). O líquido metaestável, com velocidade u_1 , passa pela base do cone, que seria a seção de saída do bocal, alcança a onda de

evaporação oblíqua, sofrendo um desvio de direção cujo ângulo de giro está representado por θ , assumindo a velocidade u_2 . Conforme Simões-Moreira (1999) este giro, θ , é função da razão dos volumes específicos do líquido metaestável e da mistura líquido-vapor imediatamente após a onda de evaporação e, do ângulo da onda de evaporação, β .

Figura 1.14 – Esquema de uma onda de evaporação com a formação de uma estrutura de onda de choque.

Peter e outros (1994) fizeram medições da temperatura da mistura bifásica que expande do núcleo de líquido. Estes ensaios eram feitos com água emergente de um bocal cilíndrico de vidro com diâmetro de 1 mm. A pressão de injeção era atmosférica e o líquido era descarregado em uma câmara de baixa pressão criando condições para a evaporação. Na Fig. 1.15a, é mostrado um gráfico com a temperatura das gotículas em função da distância ao longo do eixo central e, tomando como exemplo o terceiro tipo de jato (conforme visto na Fig. 1.11), é observada uma temperatura quase constante e igual à temperatura de injeção do líquido até 3 mm, onde ocorre o “breakup point”, ou seja, o ponto onde o filete contínuo da parte líquida do jato é rompido. Logo após, existe uma queda abrupta da temperatura até alcançar a distância de 29 mm desta distância axial e, em seguida, existe uma estabilização. O tipo 2 e tipo 4 também apresentavam semelhante comportamento relativo ao terceiro tipo, porém era menos perceptível. Fazendo

Figura 1.15 – Gráficos que ilustram o comportamento da temperatura de estagnação das gotículas durante a expansão do jato de água com temperatura e pressão de injeção de 30,3 °C, 100 kPa, respectivamente e, pressão da câmara de 0,63 kPa. O primeiro corresponde à temperatura em função da distância axial destacando o ponto onde ocorreu a interrupção da continuidade do filete líquido e, o ponto “C” seria o início da estabilização da temperatura das gotículas com o ambiente. O segundo indica as temperaturas em função da distância radial apenas para o jato Tipo 3 (Peter e outros, 1994).

menção à temperatura de injeção, que é de 30,3 °C, é observado neste gráfico que a temperatura já sofre uma queda, com valor de 28,7 °C, logo na saída do bocal.

Provavelmente isto ocorreu devido à influência da inserção do termopar neste local ou problemas de condução de calor, proporcionando a evaporação. No segundo gráfico da Fig. 1.15b, a temperatura das gotículas está em função da distância radial cujas curvas referem-se a regiões afastadas do bocal, perpendicularmente ao eixo axial. Nele também se observa a queda abrupta da temperatura e depois a estabilização. Os autores identificaram apenas como uma região que sofria uma forte vaporização das gotículas, mesmo porque, eles não possuíam os meios para visualização da onda de choque e do escoamento supersônico.

Simões-Moreira e outros (2002) conduziram uma simulação numérica do escoamento da mistura bifásica que ocorre depois onda de evaporação. Um estudo deste comportamento das propriedades de temperatura e pressão foi feito e está exemplificado na simulação do ensaio 2349100, nº 16, cujos dados experimentais estão apresentados na Tab. B.1 do Anexo B. Resumidamente, seu modelo matemático compunha o jato de líquido metaestável, com valores de temperatura e pressão obtidos experimentalmente. A expansão da mistura bifásica após passar pela onda de evaporação possuía velocidade supersônica, até alcançar a onda de choque. A jusante da onda de choque, a mistura assumia um escoamento subsônico que se equilibrava com a pressão do ambiente. O modelo era unidimensional de expansão radial em coordenadas esféricas com a hipótese de um escoamento bifásico homogêneo. Na Fig. 1.16, um dos gráficos ilustra o campo de pressões em todo o escoamento, assim como, outras grandezas importantes como o título, x , e o número de Mach, M , calculados de acordo com este modelo 1-D simplificado. Neste mesmo ensaio, 2349100, a Fig. 1.17 descreve o comportamento de distribuição de temperatura.

Figura 1.16 – Simulação numérica feita para o ensaio 2349100, cujas condições de injeção eram de 250 kPa e 76 °C. A linha contínua indica o comportamento da pressão, a linha tracejada corresponde o título da mistura e a linha traço-ponto indica o número de Mach. São indicadas as posições da onda de evaporação e da onda de choque (Simões-Moreira e outros, 2002).

Figura 1.17 – A mesma simulação numérica da Fig. 1.16 acrescentando o comportamento da temperatura com ênfase para regiões a montante e a jusante da onda de choque. Outra informação importante deste gráfico pode ser feita na observação do salto de propriedades na posição da onda de choque, considerando a hipótese de modelo homogêneo.

Como observação, é importante salientar que estes trabalhos experimentais (Lienhard e Day, 1970, Kitamura e outros, 1986 e, Peter e outros, 1994) assumem que a metaestabilidade alcançada pelo líquido é função apenas da temperatura de injeção do líquido e da pressão do ambiente onde é descarregado o jato, dispensando qualquer análise do campo de pressões na região circunvizinha da parte líquida do jato. Pelos trabalhos experimentais de Kurschat e outros (1992), Athans (1994), Vieira (1999) e Simões-Moreira e outros (2002) ficou comprovado que a pressão na saída do bocal é diferente da pressão da câmara onde são descarregados devido à presença da onda de evaporação e de um escoamento compressível supersônico com presença de ondas de choque. Simões-Moreira e outros (2002) e de Angelo (2004) também são trabalhos que comprovaram isto. Eles empregaram a teoria das ondas de evaporação oblíquas e conduziram uma solução bidimensional para esta expansão da mistura bifásica, obtendo bons resultados como será mostrado no capítulo seguinte.

Yildiz e outros (2003), de forma experimental, fez um levantamento do comportamento da temperatura após a evaporação do jato de R134a. O refrigerante foi armazenado com pressão e temperatura iniciais de 700 kPa e 22 °C (Fig 1.18). Este fluido é descarregado ao ambiente atmosférico através de bocais de 1, 2 e 4 mm. Injetado em condições de regime permanente, ou seja, à pressão e temperatura constantes, imediatamente a montante do bocal foi introduzido um termopar que mede a temperatura do fluido igual ao valor da temperatura do tanque de armazenamento do R134a. Eles usaram duas técnicas para a medição do comportamento da temperatura do jato. A primeira técnica (Fig. 1.18b), não intrusiva, é feita por intermédio de uma imagem termográfica obtida de uma câmara sensível ao infravermelho. A outra técnica de medição foi feita através de termopares dispostos ao longo do jato em intervalos de 5 cm. O exemplo da Fig. 1.18a mostra um jato emergindo de um bocal com diâmetro de saída de 1 mm. Pelas duas técnicas (Fig. 1.18b e 1.18c), eles verificaram que a temperatura do jato salta de +22 para -20 °C ($P_{\text{sat}} = 132,8 \text{ kPa}$), imediatamente a jusante do bocal. Neste instante, o fluido evolui para uma mistura líquido-vapor, corroborando para a hipótese da onda de evaporação. Esta mistura, enquanto se expande, poderia escoar deixando cair a sua temperatura para -26,7 °C, que é sua temperatura de saturação a pressão ambiente de 1 atm. Porém, ao longo do jato, na distância de 500 mm, as gotículas do fluido

alcançaram a temperatura mínima de $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Durante este percurso, se houvesse significativa influência da temperatura do meio ($+25\text{ }^{\circ}\text{C}$), o jato expandido com uma temperatura de $-26,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ tenderia a aumentar a sua temperatura para entrar em equilíbrio térmico com o meio, em contraposição, foi observado que a temperatura diminuiu para este patamar mínimo. Isto corrobora para o fato de que houve uma diminuição da pressão após a onda de evaporação, decorrente de um escoamento supersônico, porque proporcionalmente a temperatura diminuiu para este patamar mínimo, como ocorre com escoamentos supersônicos. A pressão de equilíbrio da mistura para $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ é de 21,9 kPa, cinco vezes menor que a atmosférica.

Figura 1.18 – (a) Fotografia do jato de R134a descarregado no ambiente proveniente de um bocal de 1 mm. As torres verticais são os termopares dispostos a uma distância de 50 mm entre eles. (b) Fotografia termográfica do jato do bocal de 1 mm. (c) Gráfico da temperatura em função da posição axial de afastamento do bocal. Foram testados 3 bocais com diâmetros, D_b , de 1, 2 e 4 mm (Yildiz e outros, 2003).

1.2.6 Considerações sobre o Efeito Transitório e o Comportamento do Jato em Regime Permanente

Em regimes transitórios de expansão de um jato de gás, nos instantes iniciais, é observada uma onda de choque à frente do jato, que na literatura inglesa é chamada de “bow shock”. Tomando dois ensaios feitos por Lacerda (1986) com razões entre pressão de reservatório (P_0) e pressão da câmara (P_∞) iguais a 10 e 3, são obtidas uma seqüência de imagens que consta a evolução da formação da frente de onda de choque do jato (Fig. 1.19). Os intervalos de tempo de aquisição de cada imagem segue com os valores de 0,020, 0,040, 0,100, 0,500, 1,000 e 5,000 ms. Esta frente de onda se destaca até o instante de 0,100 ms. Já no instante de 5,0 ms, o jato assume um formato que se configura no regime permanente.

Figura 1.19 – Fotografias obtidas pelo método “Schlieren” com jatos de gás hélio em uma câmara contendo gás nitrogênio. As fotografias acima se referem a um jato descarregado em uma câmara cuja pressão é 10 vezes menor que a pressão de injeção, enquanto a segunda fileira, esta relação é de 3 vezes (Lacerda, 1986).

O mesmo autor obteve registros fotográficos com jato de gás SF_6 (hexafluoreto de enxofre) também descarregado em um ambiente do mesmo gás com razão de pressões igual a 20. Neste ensaio, as imagens obtidas após o transitório inicial do jato demonstram a formação do disco de Mach que se refere a uma onda de choque normal do jato subexpandido de um gás. Sua formação ocorre internamente ao “bow shock” e se mantém durante o regime permanente em um formato regular.

A Fig. 1.20 mostra um exemplo de jato subexpandido típico. Como observação, na Fig. 1.19 também existe este fenômeno, no entanto, seu diminuto tamanho tornou-o imperceptível nestas imagens.

Figura 1.20 – Evolução de um jato de gás subexpandido com a formação do disco de Mach. Segundo Lacerda (1986), a frente de onda já não aparece porque ela assumiu uma dimensão maior que o quadro da fotografia.

Envolvendo a questão do transitório de um jato supersônico de líquido que é pulverizado na câmara onde é descarregado, a presença do frente de onda de choque, ou “bow shock”, também é observada. Pianthong e outros (2002) registraram a sua presença fotograficamente. As imagens da Fig. 1.21 mostram o desenvolvimento desta frente de onda de choque expandindo em uma escala de tempo na ordem de microssegundos.

Figura 1.21 – Evolução de um jato supersônico de óleo diesel emergente de um bocal de 1mm. O instante de aquisição de cada fotografia foi 22 μs , 41 μs e 64 μs , respectivamente (Pianthong e outros, 2002).

A formação do Disco de Mach é vista nos gases de exaustão do motor de um foguete que atinge grandes altitudes. Os produtos de combustão, a alta pressão, passam através de um bocal cuja pressão de saída do bocal é muito maior que a pressão ambiente, sofre uma expansão rápida (jato subexpandido). A Fig. 1.22 ilustra um esquema do fenômeno. Logo, na borda do bocal, se forma um leque de expansão (expansão de Prandtl-Meyer), fazendo com que o fluxo se expanda radialmente para a região de baixa pressão. O contorno do jato tangencia o máximo ângulo do leque, v_j , se estendendo adjacente às ondas de choque reflexivas que, em seguida, rumam quase paralelamente a onda de choque que detém a região hipersônica ($M \gg 1$), conforme o esquema. Devido ao formato e a permanência desta formação de onda de choque durante a toda a injeção, Kurschat e outros (1992) assemelharam este fenômeno do disco de Mach ao que ocorre nos jatos evaporativos.

Figura 1.22 – Esquema do escoamento de um jato de gás subexpandido.

É necessário colocar que os casos de estudo desta tese são em regime permanente e não houve a preocupação com transitórios como ocorreu nos ensaios de Lacerda ou Pianthong e outros. Os fenômenos estudados por eles ocorreram no período inicial máximo de 0,5 ms, intervalo por demais pequeno para que a instrumentação aqui apresentada pudesse registrá-lo, de forma sequencial.

A regularidade do formato da onda de choque nas imagens adquiridas na bancada deste trabalho foi exemplificada na Fig. 1.5. As imagens, geralmente, são obtidas em 0,2 s após a abertura do injetor. Imagens subsequentes à primeira, obtidas em intervalos de 0,5 s, comprovam que o núcleo de líquido se mantém constante e a onda de choque não se expande, conservando praticamente o seu tamanho. A Fig. 1.5 não foi um mero teste, nos demais ensaios de Vieira (1999) também foram adquiridas quatro imagens de um único jato, durante o intervalo de abertura e fechamento do injetor. Esta regularidade da forma e tamanho do núcleo de líquido e da onda de choque, em função das condições de injeção, foi mantida em todos os ensaios, comprovando que os experimentos foram conduzidos na condição de regime permanente.

1.2.7 A Questão da Vazão

Para a parte de expansão do líquido dentro do bocal é bastante razoável assumir a hipótese de fluido incompressível. De forma que a vazão pode ser determinada através da equação de descarga para bocais. De forma recíproca, a medição da vazão experimental em conjunto com as condições de injeção (P_0 e T_0) e o coeficiente de descarga, C_D , é possível determinar a pressão do líquido na seção de descarga. Verifica-se que o líquido vai adentrar na condição de metaestabilidade para os casos estudados neste trabalho.

Benjamin e Miller (1941) propõem um cálculo de seleção de placas de orifício para medição de vazão de água saturada com seus gráficos orientativos levantados experimentalmente. Um comportamento do fluxo de água saturada nestes dispositivos pode ser visto na Fig. 1.23. A condição de fluxo experimental assume uma vazão maior que o cálculo teórico que admite a vaporização do fluido na seção da placa de orifício. Isto é atribuído, conforme eles visualizaram nos jatos em seus registros fotográficos, ao fato da não evaporação da água na passagem da restrição da placa de orifício. Baseado nos resultados destes pesquisadores, Burnell (1947) também propõe que o fluido tem comportamento incompressível e adota uma correlação que a pressão na passagem de restrição, ou seja, a pressão metaestável, é função da pressão de vapor, da tensão superficial e de dados experimentais do dispositivo, no caso, um bocal ou placa de orifício.

Figura 1.23 – Gráfico que compara a vazão superficial mássica teórica em função da pressão a jusante com aquela obtida experimentalmente com uma placa de orifício. Refere-se a um escoamento de água saturada com pressão a montante de 145 psia (1000 kPa). O cálculo teórico, que Benjamin e Miller (1941) se embasaram, assume que a mínima pressão é de 135 psia, ou 930,8 kPa.

Atualmente, a norma ISA-S75.01-1985 (1995) apresenta um método para a determinação de uma vazão crítica, para escoamento de líquidos que são submetidos a uma pressão abaixo da pressão de saturação a jusante de uma válvula. Se existe a vaporização, a pressão a jusante usada para o cálculo é igual à pressão de saturação do líquido multiplicado por um fator da válvula que é função da tensão superficial. Além disso, a vazão encontrada é multiplicada por outro fator que tem valor entre 0,5 e 0,9 (Anexo D da Norma). Baumann (1963), que é uma das referências desta norma, conduziu alguns estudos experimentais da bloqueio da vazão em função da diferença de pressão. Um exemplo típico está na Fig. 1.24. É utilizada uma válvula globo para observação do comportamento da vazão em função da queda de pressão.

Figura 1.24 – Gráfico que ilustra a vazão em função da diferença de pressões entre a jusante e a montante, $\Delta P = P_1 - P_2$, sendo P_1 igual a 100 psia, C_v , o coeficiente da válvula igual 6,6, C_f , o coeficiente para a condição de blocagem da válvula globo igual a 0,74 (Baumann, 1963). Entre a região de transição, que corresponde um escoamento suscetível à cavitação da válvula globo (em destaque), à esquerda existe a curva que respeita o regime hidráulico, e à direita, assume um regime de vazão crítica.

Portanto, há dois casos: o primeiro em que existe a evaporação externa ao bocal resultando em um aumento contínuo da vazão, podendo alcançar uma condição máxima, mesmo que a pressão a jusante diminua para patamares abaixo da pressão de saturação do líquido, e em outra situação, a evaporação ocorre na restrição proporcionando uma condição de máxima vazão em estágios cuja pressão a jusante é um pouco maior que a pressão de vapor. Como exemplo, na Fig. 1.24, a vazão é de 74% daquela estimada pelo fluido na condição de incompressível com pressão a jusante igual à pressão de saturação do líquido.

Geralmente, conforme Wildgen e Straub (1989), esta condição de metaestabilidade é alcançada em bocais curtos cuja razão comprimento-diâmetro do bocal é menor que 1, ou seja, $L/D < 1$, relação comum encontrada nas placas de orifício e passagem de válvulas.

Labuntsov e Avdeev (1982a e 1982b) resolveram o caso de um escoamento de CO₂ (gás carbônico) líquido em um bocal, considerando a formação da onda de evaporação interna e externa ao bocal. A principal premissa para isto foi caracterizar que a mínima pressão metaestável era alcançada na curva espinodal (ver Capítulo 2). Seus cálculos forneceram bons resultados quando comparados aos casos experimentais que envolviam a expansão de líquido em bocais (Labuntsov e Avdeev, 1982b).

Alamgir e Lienhard (1981) versam que a máxima pressão metaestável é também função da pressão de injeção. Sua correlação motivada pela teoria cinética de nucleação alcançou bons resultados em escoamentos com um fluido possuindo uma temperatura de injeção entre 62 % e 93,5 % da temperatura crítica e uma taxa de despressurização no bocal entre 405,3 e 182689 MPa/s.

Uma análise indireta do valor da pressão metaestável foi feita por Kurschat e outros (1992). Seu modelo matemático, através da dimensão da onda de choque de seus registros fotográficos, determinava por meio indireto a pressão metaestável alcançada e, com isso, comparava com a vazão encontrada experimentalmente. Isto pode ser visto no gráfico da Fig. 1.25. A vazão experimental ficou abaixo da esperada, quando tomados os dados da pressão de injeção e pressão da câmara e propriedades termodinâmicas utilizando a equação de descarga do bocal adaptada para um escoamento de fluido incompressível (linha tracejada da Fig. 1.25). Este modelo matemático sugerido, que tem como dado a dimensão da onda de choque, melhorou esta estimativa da vazão (indicado pela linha contínua).

Simões-Moreira (1999) especulou que a pressão metaestável alcançada pelo fluido é obtida em um ponto de máximo quando é levantado o aumento de entropia multiplicado pelo fluxo superficial mássico da onda de evaporação. Sua análise foi baseada no fato de que ondas de evaporação apresentam uma solução singular conhecida como condição de Chapman-Jouguet (ver Capítulo 2), a qual também é um ponto de máximo local de entropia. No entanto, novos experimentos indicaram que a máxima geração de entropia para casos de jato evaporativo é apenas uma aproximação sem uma confirmação experimental definitiva.

Nos experimentos apresentados no Capítulo 4 uma proposta de análise será feita determinando se existe a bloqueio da vazão com a diminuição progressiva da

pressão da câmara, conforme o exemplo da Fig. 1.25, pois através da máxima vazão mássica é possível determinar a pressão metaestável que o líquido alcançou na saída do bocal ou mesmo, verificar se houve uma nucleação interna ao bocal.

Figura 1.25 – Medições do fluxo mássico: - - -, cálculo para incompressível (através da equação de Bernoulli); —, modelo de cálculo; *, resultados experimentais. $P_0 = 15$ bar e $P_\infty = 10$ mbar (Kurschat e outros, 1992).

1.2.8 Técnicas de Visualização Empregadas em Experimentos Anteriores

O método óptico de interferometria usado por Kurschat e outros (1992) revelou imagens que destacaram principalmente a estrutura das ondas de choque, e o método "shadowgraph" (também usado por Kurschat e outros, 1992) destacava o comportamento das gotículas. O tempo de exposição de $10 \mu\text{s}$ foi realizado em ambos os métodos. Conforme assinalado por Reitz (1990), o tempo de exposição da fotografia é fundamental para registrar a estrutura dos jatos evaporativos e, devido a isso, ele contesta as conclusões de Oza e Sinnamon (1983) que registraram o fenômeno com imagens de fotografias com tempo convencional de exposição, conseqüentemente, configuram uma pouca nitidez da estrutura do jato evaporativo.

Reitz comparou fotografias de jatos evaporativos de água com intervalos de exposição de $1/250\text{ s}$ (Fig. 1.26a) e 20 ns de exposição (Fig. 1.26b). As condições de ensaio são as mesmas, porém, o caso "b", é mais nítido, sendo possível observar um núcleo líquido e o desprendimento de gotículas, enquanto o primeiro caso oferece uma imagem com pouca nitidez. Isso leva a conclusão que a exposição de $1/250\text{ s}$ é um intervalo por demais grande para que a imagem possa captar detalhes dos processos de evaporação, e no segundo caso podem ser observadas imagens bem definidas que melhor registram o núcleo de líquido. Além de Reitz, Athans (1994) e Athans e Hirs (1995) usaram o método de visualização de iluminação lateral do evento, conhecido na literatura inglesa de "side-lighting". Nesta, a fonte de luz incide na lateral e perpendicularmente ao eixo de visualização do jato. O método de iluminação por detrás do evento do jato em relação ao observador ("back-lighting") também foi empregado por eles. Athans e Hirs também utilizaram o método de "laser sheet" que nada mais é que o método de iluminação lateral com o feixe luminoso de uma fonte "laser" em formato de lâmina que corta a seção do jato paralela ao eixo do mesmo (Fig. 1.4). Seus experimentos tinham um intervalo de exposição de $0,65\text{ }\mu\text{s}$ para o método de iluminação por detrás do jato e de 5 ns para os métodos de iluminação lateral e por lâmina de "laser".

Figura 1.26 – Fotografia com (a) tempo de exposição de $1/250\text{ s}$ com iluminação lateral e, (b) tempo de 20 ns com iluminação por detrás de um jato de água a uma temperatura de $146\text{ }^{\circ}\text{C}$ e pressão de injeção de 697 kPa descarregado em ambiente atmosférico (Reitz, 1990).

1.3 Objetivos

Este trabalho experimental tem por objetivo principal o estudo de jatos evaporativos de líquidos superaquecidos expandindo em um ambiente de baixa pressão de forma que as condições de evaporação por rebaixamento de pressão, ou “flashing”, fossem estabelecidas. Dentre os trabalhos que tratam sobre os jatos evaporativos, poucos observaram fenômenos compressíveis, como ondas de choque, porque isto só é permitido mediante o uso de técnicas especiais de visualização como o “Schlieren”. Entretanto, nos poucos trabalhos existentes, se observa a existência de um núcleo de líquido, a partir do qual a evaporação ocorreria. Poucas informações ou mesmo análise sobre o comportamento deste núcleo foram efetuadas. Nessas observações também foi notada a condição de vazão mássica máxima, o que caracteriza a bloqueio do escoamento.

Para o presente estudo, foi feita a escolha de um líquido de testes adequado às condições de pressões e temperaturas de trabalho. Além disto, optou-se por uma substância de complexidade molecular elevada, SCME, que pode alcançar uma taxa de evaporação maior que os demais fluidos comuns, como será visto na Subseção 2.1.1. Dentro destes requisitos, será utilizado o iso-octano, que é uma substância SCME, cujo grande potencial de evaporação permite uma documentação fotográfica do fenômeno com maior nitidez, especificamente, para os fenômenos como o núcleo de líquido e o escoamento supersônico.

Partindo destas considerações de um estudo experimental de jato evaporativo que preza pela visualização dos fenômenos de escoamento compressível e do núcleo líquido tem-se por objetivo:

- 1) documentar os diversos tipos ou regimes de jatos com registros fotográficos e analisá-los, verificando a influência das condições de injeção como: pressão inicial, temperatura inicial e pressão da câmara onde é descarregado o jato. A literatura indica que o jato de líquido assume um formato retilíneo, quando não há evaporação, sendo este um regime puramente hidrodinâmico. À medida que a pressão da câmara é ligeiramente abaixo da pressão de saturação existe a formação de pontos de nucleação quebrando o filete do líquido. Em estágios mais avançados, existe a formação de um núcleo de líquido a partir do qual a

evaporação ocorre. Finalmente, em situações extremas de baixa pressão do ambiente em que o jato é descarregado, são visíveis ondas de choque. Objetiva-se estudar estes últimos dois regimes. Também é de interesse deste trabalho verificar peculiaridades pertinentes de cada tipo de jato, apresentando-as e descrevendo através de imagens fotográficas representativas;

- 2) certificar-se da estabilidade do núcleo de líquido, ou seja, através dos registros fotográficos, é verificada a repetibilidade do perfil axissimétrico do núcleo de líquido comprovando a inexistência de nucleações internas ao núcleo;
- 3) através do método “Schlieren”, além de visualizar ondas de choque, tem-se por objetivo registrar o gradiente de densidade no escoamento após a evaporação do núcleo de líquido. A confirmação da presença de um núcleo de líquido com formato estável e o registro fotográfico da abrupta queda de densidade do fluido próximo do núcleo comprovam a existência de uma onda de evaporação seguida de um escoamento supersônico. É de interesse analisar de forma paramétrica as dimensões da onda de choque em função das condições de ensaio (P_0 , T_0 e P_∞);
- 4) aplicar o método de iluminação por detrás (ou “backlightening”) que visualiza com mais nitidez o núcleo de líquido e pode registrar a direção do escoamento das gotículas a partir da superfície do núcleo líquido. A observação da trajetória das gotículas compõe importante informação para a análise da modelagem da onda de evaporação na periferia do núcleo. Para o método “Schlieren” o tempo de exposição será de $2 \mu s$ e para o método de iluminação por detrás, será de $1000 \mu s$. Filtragem matemática das imagens do jato através de processamento matemático serão utilizados para melhor destacar os fenômenos envolvidos em cada tipo de jato;
- 5) fazer um estudo do comportamento da vazão em função da pressão da câmara, para determinadas condições de injeção. Sob a análise de um escoamento incompressível internamente ao bocal, ou seja, sem uma evaporação nesta região de expansão, é provável que o líquido alcance a

condição metaestável. E, através das condições de injeção, e da pressão metaestável calculada pela vazão mássica medida, pode-se calcular as condições a jusante da onda de evaporação. Com o uso da teoria de ondas de evaporação oblíquas, pretende-se aplicar os cálculos da onda de evaporação nestes jatos e estimar o comprimento de extinção do núcleo de líquido. Além disso, este trabalho realizará um estudo da pressão a jusante da onda de evaporação em virtude da influência do grau de metaestabilidade e da temperatura inicial do fluido será analisado e para tal fato, a seção seguinte propõe uma solução analítica para explicar a influência destes parâmetros;

- 6) apresentar um diagrama termodinâmico que indique todos os estados que o fluido obteve durante a injeção na câmara, em virtude da observação de uma expansão incompressível no interior do bocal, com a existência de um núcleo de líquido que possui uma evaporação em sua superfície, seguida de uma expansão bifásica com velocidade supersônica e a formação de uma onda de choque, como observado experimentalmente;
- 7) testar bocais de materiais distintos. Verificar a influência do acabamento superficial interno do bocal com o objetivo de analisar a possibilidade de nucleação interna nas paredes do bocal. Um bocal de material “liso”, como o vidro reflete a preocupação da verificação da influência ou não de pontos de nucleação interna. Os outros bocais de aço podem apresentar uma evaporação interna ao bocal em virtude das ranhuras obtidas pelo acabamento da usinagem. Além disso, dimensões distintas das seções de saída dos bocais convergentes também devem ser analisadas.

1.4 Divisão do trabalho

O presente capítulo de introdução tem por objetivo discutir sobre o tema aqui estudado e fazendo uma revisão bibliográfica, colocando o problema em perspectiva.

No Capítulo 2, faz-se uma revisão teórica de assuntos pertinentes ao tema

como: o comportamento dos líquidos (substâncias SCME), a influência do grau de metaestabilidade dos mesmos, o equacionamento de uma onda de evaporação e sua aplicação em jatos evaporativos através da teoria das ondas de evaporação oblíquas e, finalmente, é discutido sobre todo o processo termodinâmico associado a estes jatos evaporativos.

O Capítulo 3 apresenta uma descrição de todo o arranjo experimental, abordando a instalação, equipamentos, registro de dados e procedimentos nos ensaios.

O Capítulo 4 tem por objetivo mostrar dados obtidos e gráficos relevantes dos ensaios. A completa apresentação de dados e registros fotográficos de todos os ensaios pode ser vista nos Anexos B e C desta tese. Como observação, o Anexo A expõe as propriedades termodinâmicas do iso-octano nos estados de líquido e vapor saturados.

Uma análise mais aprofundada dos resultados obtidos é feita no Capítulo 5. Dos jatos obtidos são mostrados e comparados os perfis, as vazões, pressões metaestáveis, núcleo de líquido e onda de choque formada.

O Capítulo 6 descreve sobre a aplicação da teoria de ondas de evaporação nestes jatos, comparando os dados calculados com os resultados experimentais.

O Capítulo 7 versa sobre as possibilidades de continuidade deste trabalho e as conclusões gerais e específicas deste trabalho.

Após estes capítulos, estão em sequência os três anexos já mencionados. Em seguida, está a lista de referências deste trabalho.

Em seguida é apresentada a análise de incerteza no Apêndice I. No Apêndice II, é mostrado o processamento de filtragem das imagens do jato. O Apêndice III apresenta o desenvolvimento de uma solução analítica para a onda de evaporação. O desenvolvimento do programa de aquisição de imagens da bancada experimental e algumas tentativas de técnicas ópticas são apresentados no Apêndice IV. Finalmente, alguns desenhos esquemáticos e fotografias da bancada experimental foram inseridos no Apêndice V.

2. TEORIA

2.1 A substância iso-octano

A substância iso-octano, também chamada de 2,2,4 tri-metil-pentano, é um hidrocarboneto cuja fórmula química é representada por C_8H_{18} . As principais propriedades termodinâmicas e de transporte do líquido saturado, como volume específico, viscosidade dinâmica e pressão de vapor, que foram utilizadas ao longo deste trabalho, podem ser visualizados na Fig. 2.1. Outras propriedades como: massa molecular (M), pressão crítica (P_c), temperatura crítica (T_c), volume crítico (v_c) e fator de compressibilidade crítica (Z_c) e, finalmente, temperatura de ebulição à pressão normal de 101,325 kPa (T_b), estão mostradas na Tab. 2.1, respectivamente.

Figura 2.1 – Gráficos com dados relevantes do líquido saturado iso-octano em função da temperatura. Os dados são: volume específico, viscosidade dinâmica e pressão de vapor (Vargaftik, 1996).

Tabela 2.1 – Tabela comparativa das propriedades termodinâmicas de alguns líquidos.

Substância	Fórmula	M (g/gmol)	P_c (MPa)	T_c (°C)	v_c (m ³ /kg)	Z_c	T_b (°C)
Iso-octano	C ₈ H ₁₈	114,2	2,58	271,0	0,004219	0,259	99,2
Metano	CH ₄	16,0	4,61	-82,9	0,006147	0,287	-162,2
Água	H ₂ O	18,0	22,1	374,1	0,003155	0,235	100,0
N-dodecano	C ₁₂ H ₂₆	170,3	18,3	385,1	0,004216	0,238	216,4

Tabela 2.2 – Valores da tensão superficial em função da temperatura. Os valores para as temperaturas de 20 e 90 °C são obtidos por Vargaftik (1996), e para temperaturas acima, são estimados através de polinômio.

Temperatura	20 °C	90 °C	180 °C
Tensão Superficial (N/m)	0,0188	0,0127	0,00546

A Tab. 2.2 tem o objetivo de mostrar os valores da tensão superficial do iso-octano líquido e saturado que possui um comportamento de proporcionalidade linear com a temperatura.

Uma tabela mais completa sobre as propriedades termodinâmicas do iso-octano, na condição de saturação, está no Anexo A.

2.1.1 Comportamento da Substância SCME

A possibilidade de uma completa mudança de fase, de forma quase adiabática, está intimamente relacionada a certos fluidos denominados SCME – Substância de Complexidade Molecular Elevada (na literatura inglesa é chamado de “retrograde”, Thompson e Sullivan, 1975), que apresentam uma grande potencialidade de armazenar energia interna devido ao seu elevado calor específico adimensional, conforme definido por Thompson e Sullivan (1975) e indicado a seguir. Tomando como exemplo o n-dodecano, esta substância possui um alto valor de calor específico adimensional e, com isto, seu comportamento se diferencia das substâncias simples comuns, como a água, como é mostrado no diagrama temperatura-entropia específica da Fig. 2.2. Pode-se notar que o ramo de vapor da curva de saturação é inclinado para a direita.

Experimentos foram realizados no sentido de simular este processo com estes

fluidos. Simões Moreira (1994) e Simões Moreira e Shepherd (1993 e 1999), demonstraram a possibilidade da completa evaporação em n-dodecano, uma substância SCME.

Um parâmetro que caracteriza estas substâncias é o calor específico adimensional $\tilde{c}_v$ que é a razão de $c_v/\bar{R}$ cujo numerador refere-se ao calor específico a volume constante e $\bar{R}$ é a constante universal dos gases. O limiar entre uma substância SCME e um fluido comum é dado por $\tilde{c}_v = 11$ (Lambrakis, 1972), que é a condição em que existe uma porção vertical da linha de saturação de vapor do diagrama temperatura – entropia específica, como ocorre com a substância iso-octano. Observando a Fig. 2.2, nota-se que o fluido no estado inicial de líquido pode, através de um processo isoentrópico, sofrer uma evaporação completa. Estudos de Shepherd e outros (1989), determinaram que os fluidos com o valor de $\tilde{c}_v > 33$ podem em princípio, sofrer esta completa evaporação de forma adiabática. A substância iso-octano também possui esta característica, como se vê na Fig. 2.2.

Figura 2.2 – Diagrama T-s de uma substância SCME (n-dodecano e iso-octano) e uma substância simples (água).

Neste trabalho, foi utilizada a substância iso-octano (C_8H_{18}), que é uma substância SCME. Isto é interessante porque a possibilidade de uma taxa elevada de

evaporação do jato oferece a oportunidade de uma melhor visualização da porção líquida que está em seu eixo axial, além da análise da estrutura de escoamento e a presença de ondas de choque.

2.1.2 O Limite de Metaestabilidade do Líquido

Pelo equilíbrio termodinâmico estável em uma interface líquido-vapor plana, uma substância pura alcançando a linha de saturação iniciaria um processo de mudança de fase. No entanto, por exemplo, uma substância no estado líquido saturado pode ter sua temperatura aumentada a uma pressão constante, adentrando na região de saturação, e, ainda assim, permanecer no estado de líquido, que é o que caracteriza a metaestabilidade. Tal comportamento ocorre em sistemas simples devido à ausência de forças externas ou efeitos de superfície. O estado metaestável pode ser alcançado por vários processos, como, por exemplo: no processo isobárico o líquido metaestável sofre um aumento de temperatura a uma pressão constante. No processo isotérmico um decréscimo de pressão é realizado mantendo a sua temperatura constante. Finalmente, para o processo adiabático reversível, existe um decréscimo de temperatura onde a sua entropia se mantém constante.

A metaestabilidade tem um limite, também conhecido como limite de superaquecimento. Sob o critério termodinâmico, este limite de metaestabilidade se encontra quando

$$\left. \frac{\partial P}{\partial v} \right|_T = 0, \quad (2.1)$$

ou seja, sob uma linha isotérmica do fluido quando a derivada da pressão (P) em função do volume específico (v) é nulo. Este limite é chamado de limite de estabilidade mecânica.

Isto também acontece no fluido no estado de vapor. Neste caso, o vapor metaestável é também chamado de vapor subresfriado. O conjunto dos pontos que consistem no limite de metaestabilidade das várias isotérmicas formam a curva espinodal, no diagrama de P - v . A Fig. 2.3 ilustra um diagrama pressão-volume específico com a curva de saturação característica. A região escura destacada representa a região de estado metaestável, delimitado pela curva de saturação e a curva espinodal, sendo, a região esquerda associada à metaestabilidade de líquido e a

direita ao subresfriamento do vapor.

Figura 2.3 – Representação da região metaestável de um fluido em diagrama temperatura - volume específico (Simões-Moreira, 1994).

Para que não haja nucleação homogênea, é necessário conhecer o máximo grau de metaestabilidade que o líquido alcançou e, se esta condição não coincide com o ponto espínodal. Para o cálculo do limite de metaestabilidade do líquido, aqui é utilizada a teoria cinética clássica de nucleação. O limite cinético de metaestabilidade é associado com a probabilidade de formação de nucleação homogênea em todo o volume do líquido. Pela teoria cinética de nucleação (Carey, 1994), define-se a taxa de nucleações do vapor crítico por unidade de volume J_n , como

$$J_n = N_0 \left(\frac{3\sigma}{\pi m} \right)^{1/2} \exp \left(\frac{-16\pi\sigma^3}{3kT(P_v - P_L)^2} \right), \quad (2.2)$$

sendo, N_0 é o número da densidade molecular do líquido ($N_0 = N_A / v_L M$), N_A é o número de Avogadro ($6,02 \times 10^{26}$ moléculas/kg-mol), M é a massa molecular (kg/kg-mol), v_L é o volume específico do líquido (m^3/kg), σ é a tensão superficial (N/m), m é a massa de uma simples molécula de líquido ($m = M/N_A$), k é a constante de Boltzmann ($1,3805 \times 10^{-23}$ J/K), P_v é a pressão interna da nucleação de vapor (Pa), P_L

é a pressão do líquido, e T é a temperatura do líquido (K). Usando a hipótese de gás perfeito para a fase vapor, pode-se mostrar (Carey, 1994) que

$$P_V \cong P_{sat}(T) \exp\left(\frac{v_L(P_L - P_{sat}(T))}{RT}\right), \quad (2.3)$$

onde R é constante do gás ($R = \bar{R} / M$), e $\bar{R}$ é a constante universal dos gases (8,314 J/mol.K). Carey (1994) sugere que valores de J_n acima de 10^{12} nucleações.s⁻¹.m⁻³ promovem a nucleação homogênea.

Figura 2.4 – Taxa de densidade de nucleações, J_n , em função do grau de metaestabilidade, Π , do iso-octano.

Fazendo um estudo da taxa de nucleação de vapor em função do grau de metaestabilidade, Π , definido por

$$\Pi = \frac{P_{sat} - P_1}{P_{sat}} \quad (2.4)$$

sendo P_{sat} , a pressão de saturação e P_1 é a pressão metaestável da iso-octano, é verificada uma curva desta taxa de nucleação de vapor em função do grau de

metaestabilidade representada pelo gráfico da Fig. 2.4. Na figura verifica-se que não é esperada uma nucleação homogênea em temperaturas abaixo de 210°C do líquido, conseqüentemente, também não devem ocorrer nos ensaios aqui realizados, pois se encontram com temperaturas abaixo de 180 °C (83% da temperatura crítica). Em alguns ensaios de Athans (1995), que são citados, a temperatura máxima de injeção alcançou o valor de 226 °C, que está a 92% da temperatura crítica.

2.2 Ondas de Evaporação

Esta seção tem o objetivo de apresentar a teoria de ondas de evaporação. Na modelagem deste tipo de evaporação, é assumido que o fenômeno é uma descontinuidade no escoamento como acontece em reações químicas de combustão do tipo de deflagração.

Aqui é imaginado o líquido no estado metaestável adentrando uma onda de evaporação estacionária, à sua montante (índice “1”). Após o líquido passar pela onda, assume outro estado termodinâmico (índice “2”) em um processo parcial de evaporação adiabático. As equações de continuidade, de conservação de quantidade de movimento e de energia, para o modelo de volume de controle unidimensional da Fig. 2.5, são:

$$[J] = 0, \quad (2.5)$$

$$\left[P + \frac{W^2}{v}\right] = 0, \text{ e} \quad (2.6)$$

$$\left[h + \frac{1}{2}W^2\right] = 0, \quad (2.7)$$

onde, o termo J significa a vazão mássica superficial ($J = W/v$); P é a pressão; v é o volume específico; h é a entalpia específica e W é a velocidade relativa do fluido, em seus respectivos estados. Os colchetes representam a diferença da propriedade entre os estados a jusante e a montante da grandeza inclusa, isto é, $[f] = f_2 - f_1$.

Figura 2.5 – Volume de controle englobando uma onda de evaporação. Estado “1” é o líquido metaestável e o estado “2” é a mistura bifásica.

Combinando as equações (2.5), (2.6) e (2.7), pode-se obter as equações clássicas de Rankine-Hugoniot (Eq. 2.8) e Rayleigh (Eq. 2.9).

$$[h] = \frac{1}{2}(v_1 + v_2).[P], \text{ e} \quad (2.8)$$

$$J^2 = -\frac{[P]}{[v]}. \quad (2.9)$$

A representação da curva de Rankine-Hugoniot a partir de um estado (1) metaestável é a curva da Fig. 2.6, com a identificação *R-H*. A curva de Rayleigh é uma linha reta, e está representada pela curva genérica *R*, que possui os pontos *A* e *B* na intercepção da curva *R-H* ilustrado na Fig. 2.6. A inclinação desta linha corresponde ao valor do quadrado da vazão mássica que encontra seu valor máximo quando a reta da linha de Rayleigh tangencia a curva de Rankine-Hugoniot, no ponto *C*, representada pela reta *R'*, cuja solução é chamada de condição de Chapman-Jouguet (ou simplesmente, *CJ*), e corresponde à condição sônica em fenômenos de combustão. Soluções encontradas à direita do ponto *C* são condições supersônicas e são descartadas em experimentos unidimensionais. Hill e Sturtevant (1990) e Simões-Moreira (1994), confirmaram a existência do ramo subsônico e verificaram a ocorrência da existência do ponto *C*, em experimentos com ondas evaporativas.

Figura 2.6 – Representação das curvas de Rankine-Hugoniot ($R-H$) e de Rayleigh (R) em uma evaporação. O ponto “C” corresponde à condição de Chapman-Jouguet referente ao estado “1”.

A condição de Chapman-Jouguet aqui assume fundamental importância como solução chave para explicar a existência do escoamento supersônico na evaporação do núcleo. Assim como ocorre em um bocal convergente-divergente que possui em sua entrada um escoamento inicialmente subsônico alcançando a velocidade sônica na restrição podendo assumir um escoamento supersônico, dependendo da pressão a jusante, a mistura bifásica com velocidade sônica também provém da onda de evaporação. Esta velocidade sônica da mistura é determinada pela condição de Chapman-Jouguet e, por analogia, a superfície evaporativa do núcleo de líquido seria a área de restrição do bocal convergente-divergente.

Como visto, a solução de Chapman-Jouguet depende das condições de injeção (P_0 e T_0) e da pressão metaestável (P_1). A Fig. 2.6 também mostra esquematicamente uma solução de Chapman-Jouguet para uma pressão menor que o estado 1 (ponto 1’). Pela Eq. (2.9), a tangente da curva corresponde à própria vazão superficial e, na figura, a curva de Rayleigh, R'' , deste novo ponto é menos inclinada que a curva R' , mostrando esquematicamente a diminuição da vazão mássica superficial sônica, J_{CJ} , com o aumento do grau de metaestabilidade. Esta diminuição da vazão superficial foi comprovada através dos resultados obtidos por Simões-

Moreira (1999) e Simões-Moreira e Bullard (2003). O primeiro trabalho conduz simulações da onda de evaporação com iso-octano, e o segundo utiliza fluidos refrigerantes como: R22, R134a e R600a.

Quando a evaporação não é completa, algo comum para a grande maioria dos casos, é conveniente reescrever a equação de Rankine-Hugoniot (Eq. 2.8) para isolar o título (x_2) da mistura e deixá-lo dependente das propriedades termodinâmicas iniciais e de saturação após a onda (Simões-Moreira, 1999), logo

$$x_2 = \frac{2(h_1 - h_{L2}) + (P_2 - P_1)(v_1 + v_{L2})}{2h_{LV2} - (P_2 - P_1)v_{LV2}}, \quad (2.10)$$

onde os índices “L” e “V” indicam as fases líquida e vapor e o índice “LV” é denominado para a diferença de valor da propriedade entre a fase vapor e a fase líquida.

Através da Eq. (2.10) e da condição de Chapman-Jouguet da Eq. (2.9), foi realizado um levantamento da curva da razão de pressões a jusante e a montante da onda de evaporação em função do grau de metaestabilidade (Eq. 2.4), como está exposto na Fig.2.7. Todas as curvas estão em função da temperatura inicial, T_0 , do líquido. A pressão de estagnação, P_0 , é igual à pressão de saturação, $P_{\text{sat}}(T_0)$. As informações das propriedades termodinâmicas da saturação obtidas para o cálculo destas curvas estão no Anexo A. Todas as propriedades foram determinadas por interpolação.

Na Fig. 2.7, é visto que as curvas estão muito próximas permitindo a conclusão que a temperatura tem um efeito relativamente fraco sobre a intensidade da onda. Embora não estejam apresentadas neste gráfico, temperaturas de 0 e 220 °C também estariam dentro da tendência mostrada por estas curvas. Neste caso, foram representadas aquelas utilizadas nos experimentos.

As temperaturas de 162 e 178 °C são as únicas daquelas apresentadas no gráfico que podem ter evaporação completa com graus de metaestabilidade elevado, iguais a 0,99 e 0,96, respectivamente, para uma razão de pressões igual a 0,50, praticamente. Simões-Moreira (1998) realizou cálculos com ondas cujos fluidos teriam a completa evaporação quando a razão entre as pressões era

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{1 + \gamma}, \quad (2.11)$$

onde γ é a razão entre os calores específicos à pressão e à volume constantes. Para o iso-octano, este valor é de 1,035. Necessariamente, esta regra é válida quando o vapor tem um comportamento de gás perfeito, pois esta igualdade é encontrada quando se substitui da velocidade sônica do gás perfeito (c) na Eq. (2.9), com a expressão

$$J_{CJ} = \frac{c_2}{v_2} = \frac{\sqrt{\gamma \cdot P_2 \cdot v_2}}{v_2}. \quad (2.12)$$

Por outro lado, sob uma temperatura inicial de 56 °C, quando seu grau de metaestabilidade se aproxima do valor unitário, o título de vapor não é maior que a 55,05 %.

Figura 2.7 – Representação do comportamento da razão de pressões a jusante e a montante da onda de evaporação em função do grau de metaestabilidade do iso-octano.

2.3 Solução Analítica Proposta para Determinação da Pressão a Jusante em Função do Grau de Metaestabilidade

A semelhança das curvas existente no gráfico da Fig. 2.7 estimulou este estudo do comportamento da razão das pressões a jusante e montante da onda em função do grau de metaestabilidade. Inicialmente, aproximou-se a curva de saturação pela seguinte expressão simplificada de Clausius-Clapeyron na forma integrada:

$$\ln(P_{sat}) = A - \frac{B}{T_0}, \quad (2.13)$$

sendo A e B constantes, a derivada da pressão de saturação em função da temperatura para esta equação é:

$$\left(\frac{dP}{dT} \right)_{sat} = B \frac{P_{sat}}{T_{sat}^2} \quad (2.14)$$

Como hipótese simplificadora, a jusante da onda, o fluido forma uma mistura bifásica ou, pelo menos, está na condição de vapor saturado para completa evaporação, e nesta condição, a temperatura a jusante pode ser escrita como: $T_2 = B/(A - \ln(P_2))$. Segundo Abbot (1989), utilizando a equação de Clapeyron,

$$\left(\frac{dP}{dT} \right)_{sat} = \frac{\Delta h_{LV}}{T_{sat} \cdot \Delta v_{LV}}, \text{ na Eq. (2.14), tem-se:}$$

$$\frac{\Delta h_{LV2}}{\Delta v_{LV2}} = B \frac{P_2}{T_2} \quad (2.15)$$

Simões-Moreira (1994) sugere o emprego do calor específico do líquido (C_{pL}), na condição de saturado. Aplicando este parâmetro, a diferença entre as entalpias a jusante e a montante pode ser reescrita como:

$$h_2 - h_1 = C_{pL}(T_2 - T_0) + x_2 \cdot \Delta h_{LV2} = C_{pL}(T_2 - T_0) + \frac{v_2 - v_{2L}}{\Delta v_{LV2}} \cdot \Delta h_{LV2} \quad (2.16)$$

Para a equação anterior também foi admitido que a temperatura inicial é igual a temperatura a jusante da onda. Se admitir que o volume específico do líquido a jusante e a montante são iguais ($v_{2L} = v_1$), substituindo a Eq. (2.15) em (2.16), substituindo as temperaturas envolvidas através da expressão da Eq. (2.13), e aplicando-as na equação de Rankine-Hugoniot, o volume específico a jusante será:

$$v_2 = \frac{Cp_L B(\ln(P_{sat}) - \ln(P_2))}{P_2(A - \ln(P_{sat}))(A - \ln(P_2)) \left((A - \ln(P_2)) + \frac{1}{2} \frac{P_1}{P_2} - \frac{1}{2} \right)} + \frac{\left((A - \ln(P_2)) - \frac{1}{2} \frac{P_1}{P_2} + \frac{1}{2} \right)}{\left((A - \ln(P_2)) + \frac{1}{2} \frac{P_1}{P_2} - \frac{1}{2} \right)} v_1 \quad (2.17)$$

Para pequenos graus de metaestabilidade, o fator que multiplica v_1 , no segundo termo da soma desta equação, é praticamente igual a 1. Quando se aumenta o grau de metaestabilidade, este fator decresce pouco e o primeiro termo da expressão, cresce exponencialmente. Para maiores detalhes, o Apêndice III detalha melhor o comportamento destes dois termos. É interessante que a equação é dependente apenas da pressão, P_2 , e ela pode ser reescrita como:

$$v_2 \cong \frac{Cp_L B(\ln(P_{sat}) - \ln(P_2))}{P_2(A - \ln(P_{sat}))(A - \ln(P_2)) \left((A - \ln(P_2)) + \frac{1}{2} \frac{P_1}{P_2} - \frac{1}{2} \right)} + v_1 \quad (2.18)$$

Aplicando a equação de Rankine (Eq. 2.9), para a condição de Chapman-Jouguet ($d\mathcal{F}^2 = 0$), é desenvolvida a seguinte identidade:

$$\frac{dv_2}{dP_2} = \frac{v_2 - v_1}{P_2 - P_1} \quad (2.19)$$

Combinando esta última expressão com a Eq. (2.18) e sua derivada, e sabendo que $P_1 = P_{sat} \cdot (1 - \Pi)$, é obtida a seguinte expressão:

$$1 - 2 \frac{P_2}{P_1} - \frac{1 - \frac{P_2}{P_1}}{\ln(1 - \Pi) + \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)} - \frac{1 - \frac{P_2}{P_1}}{\frac{B}{T_0} - \ln(1 - \Pi) - \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)} + \frac{\left(1 - \frac{P_2}{P_1}\right) \left(-1 - \frac{1}{2} \frac{P_1}{P_2}\right)}{\frac{B}{T_0} - \ln(1 - \Pi) - \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{P_1}{P_2}} = 0 \quad (2.20)$$

Como estudo desta solução, serão estudados os fluidos: iso-octano, água, R22, R134a e R600a (iso-butano). Os três últimos foram pesquisados por Simões-Moreira e Bullard (2003). Todos usam a pressão inicial igual à pressão de saturação a uma temperatura inicial de 40 °C ($T_0 = 313,2$ K). A constante B será calculada

através da Eq. (2.15) e dos dados de saturação à temperatura de 20 °C apresentados na Tab. 2.3.

Tabela 2.3 – Propriedades termodinâmicas dos fluidos para temperatura inicial de 40 °C e para determinação da constante B a 20 °C através da Eq. (2.14).

Fluido	P_{sat} (40 °C) [Pa]	v_1 (40 °C) [m ³ /kg]	P_{sat} (20 °C) [Pa]	v_V (20 °C) [m ³ /kg]	v_L (20 °C) [m ³ /kg]	Δh_{LV} (20 °C) [kJ/kg]	B (20 °C) [K]
iso-octano	12959	0,001480	5150	4,4444	0,001444	309,4	4234,4
água	7384	0,001008	2339	57,7900	0,001002	2501,4	5795,1
R22	1534000	0,000886	910300	0,025978	0,000826	187,5	2564,5
R134a	1017100	0,000873	572100	0,035969	0,000816	182,3	2838,6
R600a	5286000	0,001882	302000	0,126423	0,001798	334,7	2784,8

A Tab. 2.4 apresenta os resultados obtidos de P_2/P_1 através de um cálculo numérico e da solução analítica em função do grau de metaestabilidade, dentro da curva de saturação. Da tabela, a diferença entre o resultado numérico e o resultado analítico aqui proposto não foi maior que 2,7%. O gráfico da Fig. 2.8 ilustra os resultados desta tabela.

Tabela 2.4 – Comparação dos resultados obtidos através de uma solução numérica e analítica para a razão das pressões de uma onda de evaporação em função do grau de metaestabilidade, Π .

	iso-octano		água		R22		R134a		R600a	
Π	$\frac{P_2}{P_1}$	$\frac{P_2}{P_1}$	$\frac{P_2}{P_1}$	$\frac{P_2}{P_1}$	$\frac{P_2}{P_1} *$	$\frac{P_2}{P_1}$	$\frac{P_2}{P_1} *$	$\frac{P_2}{P_1}$	$\frac{P_2}{P_1} *$	$\frac{P_2}{P_1}$
	numérico	analítico	numérico	analítico	numérico	analítico	numérico	analítico	numérico	analítico
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0,1	0,767	0,788	0,790	0,792	0,768	0,776	0,770	0,779	0,771	0,778
0,2	0,704	0,726	0,729	0,730	0,700	0,710	0,703	0,713	0,703	0,712
0,3	0,693	0,685	0,686	0,689	0,654	0,665	0,657	0,670	0,657	0,669
0,4	0,655	0,652	0,655	0,658	0,619	0,632	0,623	0,636	0,622	0,635
0,5	0,604	0,626	0,629	0,632	0,590	0,604	0,595	0,609	0,594	0,607
0,6	0,590	0,603	0,607	0,609	0,566	0,580	0,570	0,585	0,569	0,583
0,7	0,564	0,581	0,585	0,588	0,544	0,558	0,548	0,563	0,547	0,561
0,8	0,540	0,561	0,564	0,567	0,524	0,537	0,528	0,542	0,527	0,541
0,9	0,524	0,539	**	**	0,504	0,516	0,507	0,521	0,507	0,519

* dados compilados de Simões-Moreira e Bullard (2003).

**um grau de metaestabilidade acima de 0,81 congela a água, ou seja, $T_2 < 0^\circ\text{C}$.

Figura 2.8 – Representação das curvas de P_2/P_1 em função de Π , para diversos fluidos apresentados na legenda. A linha contínua é a solução analítica proposta e os símbolos vêm da solução numérica da Tab. 2.4.

Quando a pressão inicial não coincide com a pressão de saturação, diferente do que foi desenvolvido até o momento, é necessário acrescentar a energia interna devido a esta compressão, ou seja, $h_1 \cong h_{1L} + v_1(P_0 - P_{sat})$. Inserindo este termo na Eq. (2.18), tem-se:

$$v_2 \cong \frac{Cp_L B (\ln(P_{sat}) - \ln(P_2) + \Phi(P_0))}{P_2 (A - \ln(P_{sat})) (A - \ln(P_2)) \left((A - \ln(P_2)) + \frac{1}{2} \frac{P_1}{P_2} - \frac{1}{2} \right)} + v_1, \quad (2.21)$$

onde,

$$\Phi(P_0) = \frac{v_1 (P_0 - P_{sat}) \left(\frac{B}{T_0} - \ln(1 - \Pi) - \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \right)}{Cp_L \cdot T_0} \quad (2.22)$$

A Fig. 2.9 representa um estudo numérico de uma onda de evaporação em um

fluido a 750 kPa e temperatura inicial de 56 °C ($P_{\text{sat}} = 25$ kPa). A figura mostra a importância da energia acumulada devido à compressão para o salto das propriedades termodinâmicas quando o grau de metaestabilidade é próximo de zero. Esta afirmação é vista neste gráfico, pois a razão de pressões é de 0,9, para um grau de metaestabilidade quase nulo.

No desenvolvimento da expressão final, o parâmetro, $\Phi(P_0)$, foi considerado constante apenas na Eq. (2.21). Isto simplifica todo o procedimento para a obtenção da solução final, como o que foi efetuado para a determinação da Eq. (2.20), principalmente para encontrar a derivada de v_2 . Com esta simplificação, a expressão é escrita como:

$$\begin{aligned}
 & 1 - 2 \frac{P_2}{P_1} + \frac{1 - \frac{P_2}{P_1}}{\Phi(P_0) - \ln(1 - \Pi) - \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)} - \frac{1 - \frac{P_2}{P_1}}{\frac{B}{T_0} - \ln(1 - \Pi) - \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)} \\
 & + \frac{\left(1 - \frac{P_2}{P_1}\right) \left(-1 - \frac{1}{2} \frac{P_1}{P_2}\right)}{\frac{B}{T_0} - \ln(1 - \Pi) - \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{P_1}{P_2}} = 0
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

Aplicando esta equação para o caso da Fig. 2.9, cuja pressão de injeção (750 kPa) é 30 vezes maior que a pressão de saturação ($P_{\text{sat}} = 25$ kPa), o maior desvio não passou de 2,1 %, ou seja, praticamente coincidiram os resultados numéricos e analíticos. Este desvio ocorreu quando o grau de metaestabilidade é igual a 0,26 fornecendo resultados iguais a 0,683 e 0,697, respectivamente para a análise numérica e a proposta. No cálculo, o calor específico do iso-octano na condição de saturado, C_{pL} , é de 2,4 kJ/kg.K.

Figura 2.9 – Representação do comportamento da razão de pressões a jusante e a montante da onda de evaporação em função do grau de metaestabilidade do líquido para a iso-octano com temperatura inicial de 56 °C com pressão inicial de 750 kPa.

É interessante que esta última expressão (Eq. 2.23), mostra a razão das pressões envolvida tendendo ao valor de 0,5 quando o grau de metaestabilidade se aproxima de 1, sem necessariamente haver completa evaporação. Como exemplo, a água a 310 °C (89% da temperatura crítica) e pressão inicial igual à saturação (9820 kPa), assumindo um grau de metaestabilidade de 0,99, alcança um título de vapor no valor de 44,6%, a uma temperatura de 80 °C e pressão de 48 kPa (cálculo numérico). Pelo cálculo sugerido nesta seção, considerando o valor de B da Tab. 2.3, a pressão da mistura era de 49 kPa, ou seja, o erro é de 2%.

2.4 Ondas de Evaporação Oblíquas

Simões-Moreira (1999 e 2000) desenvolveu a hipótese da aplicação das ondas de evaporação oblíquas em jatos evaporativos. A teoria explanada nesta seção foi desenvolvida por ele baseada na teoria de ondas de choque oblíquas de escoamento em compressíveis, que pode ser vista em um livro texto de dinâmica de gases como, por exemplo, em Thompson (1998).

Figura 2.10 – Representação esquemática do jato à esquerda e, à direita, está em destaque a geometria da onda de evaporação com suas componentes de velocidade, em um plano coincidente ao eixo central.

A onda de evaporação oblíqua tem a direção da velocidade do líquido metaestável inclinada em relação à frente de evaporação, diferentemente do caso da onda de evaporação normal, em que a velocidade de propagação da onda é perpendicular a do líquido. A Fig. 2.10, à direita, apresenta o esquema da geometria da onda oblíqua. O modelo mostra uma onda de evaporação com velocidade U e o líquido metaestável com velocidade u_1 . A montante, o plano paralelo a frente evaporativa forma o ângulo β com a componente da velocidade relativa $u_1 - U$, e é chamado de ângulo da onda. As componentes de velocidades W_1 e W_2 são normais à onda e as componentes t_1 e t_2 são as componentes tangenciais. Após cruzar a onda, o fluido muda de direção, com uma inclinação de ângulo, θ , denominado ângulo de giro. Conforme Simões-Moreira (1999 e 2000) estas ondas possuem as seguintes

propriedades: a) as velocidades relativas $\mathbf{u}_1 - \mathbf{U}$ e $\mathbf{u}_2 - \mathbf{U}$ são coplanares com os vetores normais da onda, ou seja, estão no mesmo plano; b) as componentes da velocidade $\mathbf{t}_1$ e $\mathbf{t}_2$ tem mesma magnitude, ou seja, $\mathbf{t}_1 = \mathbf{t}_2$. Esta propriedade mostra que a adição de uma componente de uma velocidade tangencial em uma onda de choque normal transforma-a em uma onda oblíqua; c) a entalpia específica de estagnação é constante em uma onda oblíqua estacionária ($\mathbf{U} = 0$), isto é, $h_0 = h_1 + W_1^2/2 = h_2 + W_2^2/2$.

Da geometria da Fig. 2.10 é extraída a seguinte relação trigonométrica:

$$\tan \theta = \frac{\sin 2\beta}{2 \left(\sin^2 \beta + \frac{W_1}{[W]} \right)} \quad (2.24)$$

Aplicando a equação de conservação de massa (Eq. 2.1) a equação anterior pode ser escrita como:

$$\tan \theta = \frac{\sin 2\beta}{2 \left(\sin^2 \beta + \frac{1}{(v_2/v_1) - 1} \right)} \quad (2.25)$$

Obtendo, assim, uma relação entre os ângulos e a razão entre os volumes específicos envolvidos na onda. O gráfico da Fig. 2.11 apresenta a dependência do ângulo de giro com o ângulo da onda. As curvas estão parametrizadas para as diversas razões entre os volumes específicos, v_2/v_1 e, para cada curva, o ângulo de giro máximo é determinado pela seguinte expressão:

$$\tan \theta_{\max} = \frac{v_2/v_1 - 1}{2\sqrt{v_2/v_1}}. \quad (2.26)$$

E para este $\theta_{\max}$, é possível encontrar o $\beta_{\max}$ através de:

$$\sin \beta_{\max} = \frac{1}{\sqrt{v_2/v_1 + 1}}. \quad (2.27)$$

A combinação das duas equações anteriores (Eq. 2.26 e 2.27) resulta na seguinte relação:

$$\theta_{\max} = 90^\circ - 2\beta_{\max}. \quad (2.28)$$

Figura 2.11 – Ângulo de giro como função do ângulo de onda parametrizado pela razão entre os volumes específicos a jusante e a montante relativos à onda de evaporação (Simões-Moreira, 1999).

2.5 Formato de Cone do Núcleo de Líquido

A análise de muitas fotografias e jatos evaporativos indica a presença de um núcleo central de líquido (metaestável), a partir do qual a evaporação ocorre (Fig. 2.10a). Para modelar este núcleo de líquido, as seguintes hipóteses são adotadas:

- os efeitos viscosos são desprezíveis;
- o líquido no interior do núcleo líquido mantém constante a temperatura e igual à temperatura inicial de injeção;
- o líquido possui pressão uniforme na extensão do núcleo e coincidente com a pressão na saída do bocal;
- as duas fases da mistura partem da onda de evaporação com velocidades e temperaturas iguais;

- e. a evaporação ocorre sob a condição de Chapman-Jouguet e inicia imediatamente na saída do bocal;
- f. a onda de evaporação possui uma espessura desprezível e uniforme, e não se movimenta em relação ao bocal.

Os itens “b” até “d” constituem as hipóteses fundamentais para adotar um fluxo uniforme, sob a condição de Chapman-Jouguet, na superfície do núcleo. Dentro deste modelo, com um fluxo constante em toda a superfície uniforme, Simões-Moreira (1999) verificou que o núcleo líquido assume o formato de um cone cuja base coincide com a área de saída do bocal. Aplicando a lei de conservação de massa e adotando o cone como volume de controle:

$$A_b \cdot J_b = A_L \cdot J_{CJ} \quad \Rightarrow \quad \pi \cdot r_b^2 \cdot J_b = \pi \cdot r_b \sqrt{r_b^2 + L_E^2} \cdot J_{CJ}$$

$$\text{sen } \beta = \frac{J_{CJ}}{J_b}, \quad (2.29)$$

sendo, A_b e A_L as áreas do bocal e da lateral do cone, J_b e J_{CJ} [kg/m².s] os fluxos mássicos superficiais que ocorrem na base do cone e na lateral do cone, respectivamente, e β é o ângulo formado pela geratriz e o eixo central do cone e, conseqüentemente, é o mesmo ângulo gerado pela incidência do líquido na superfície da onda de evaporação por causa do formato cônico (Fig. 2.10).

2.6 Comportamento Termodinâmico do Jato

Através do modelo proposto por Kurschat e outros (1992), Angelo e Simões-Moreira (2004) aprimoraram o comportamento termodinâmico em seu estudo numérico dos jatos deste trabalho experimental. Pelo diagrama $P \times v$ da Fig. 2.12, pode-se tomar uma linha de corrente imaginária do jato partindo do estado de estagnação ou de injeção (0) e sofrendo uma expansão quase isentrópica, ao passar pelo bocal, até atingir o estado (1) na condição metaestável. Ao sair do bocal, continua como líquido metaestável até traspasar a superfície evaporativa, ou onda de evaporação oblíqua. O fluido, em virtude da evaporação, aumenta consideravelmente seu volume específico. Isto proporciona o aumento da velocidade, em contrapartida, sua pressão e temperatura diminuem. Este salto de propriedades decorrentes da onda evaporativa promove a condição sônica de velocidade da

mistura líquido-vapor neste imediato instante (estado 2). Nesta ocasião, devem ser acrescentados dois fatores: a mistura possui espaço para expandir e, sua pressão, P_2 , é maior que a pressão da câmara. A mistura bifásica comportando como um fluido compressível, sob tais fatores, é condicionada a elevar sua velocidade, em nível supersônico favorecendo a queda de sua pressão, conseqüentemente, a sua elevação do volume específico. Esta pressão, P_3 , torna-se menor que a pressão da câmara e, para o ajuste das pressões, o fluido sofre outro salto de propriedades através da formação de uma onda de choque, assumindo o estado (4) da figura. Se a onda de choque é normal ao escoamento, a pressão P_4 vem a ser menor que a pressão da câmara, e como o fluido ainda pode expandir, a estabilização de sua pressão é feita através de um escoamento subsônico.

Fotografia de um Jato Evaporativo

Representação esquemática do fenômeno

Estados Termodinâmicos :

- (0) Condição de injeção, P_0
- (1) Líquido metaestável, P_1
- (2) Mistura bifásica, P_2
- (3) Onda de choque (montante), P_3
- (4) Onda de choque (jusante), P_4
- (5) Pressão da câmara, P_∞

Figura 2.12 – Explicação para o comportamento termodinâmico do jato evaporativo.

Fica evidente que a formação desta onda de choque é uma comprovação do estabelecimento de uma velocidade supersônica. Porém, antes deste escoamento, o fluxo teve a sua velocidade sônica na onda de evaporação. Este fenômeno

evaporativo condiciona a máxima vazão na superfície do cone líquido através da condição de Chapman-Jouguet.

Destaque deve ser feito para o trabalho de Angelo (2004) que usando os resultados dos ensaios experimentais aqui expostos obteve excelentes resultados em seu estudo numérico. Angelo resolveu o problema numérico bidimensional axissimétrico para a região de expansão da mistura bifásica usando o método clássico de MacCormack com um esquema de captura de choque. A equação de estado de Lee-Kesler foi empregada com a hipótese de escoamento homogêneo bifásico. Um exemplo é mostrado na Fig. 2.13 que mostra o ensaio 2329500, com uma fotografia do jato e, ao lado, estão os resultados numéricos da pressão, temperatura, título e número de Mach, além da representação da localização da onda de choque e do traçado de duas linhas de correntes ($Lc1$ e $Lc2$). Pelo gráfico de campo de pressões da figura, estas linhas de correntes estão quase normais às faixas isobáricas e a $Lc1$ possui uma trajetória praticamente radial. Próximo do núcleo de líquido a pressão e a temperatura calculadas decrescem drasticamente. Inicialmente estão a 8487 Pa e 281 K (ou 7 °C) e, em um raio de 2 mm, assumem valores de 502 Pa e 242 K (-31 °C). Em contrapartida, o número de Mach que começa igual ao valor unitário, na evaporação, nesta mesma posição radial, alcança valores da ordem de 2,6, assim como, no cálculo do título, inicialmente a 0,18, assume um valor da ordem de 0,42, neste raio. As propriedades estimadas a montante da onda de choque como pressão, temperatura, título e número de Mach apresentam valores correspondentes a 1,8 Pa, 203 K (ou -70 °C), 0,53 e 3,70, respectivamente. Especificamente não está mostrado nesta figura, mas em seu trabalho é visto que a entropia, ao longo de uma linha de corrente é praticamente constante. A posição e formato da onda de choque calculada coincidiram com o resultado experimental mostrando que os fenômenos envolvidos estão condizentes a realidade, já que o autor desenvolveu seu código sob a hipótese do cone líquido com uma onda de evaporação na superfície.

Figura 2.13 – Simulação numérica do ensaio 2329500 com pressão de injeção de 250 kPa, temperatura de injeção de 56 °C e pressão da câmara de 0,090 kPa (Angelo, 2004).

3. ARRANJO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Um arranjo experimental foi construído para visualizar os jatos evaporativos com controle de pressão e temperatura de injeção constantes. Uma das condições importantes do arranjo era que o tempo de injeção fosse pequeno para se evitar o aumento exagerado da pressão do ambiente onde o jato é descarregado. Todo o experimento e a instrumentação foram dimensionados para que o regime permanente ocorresse muito rapidamente, na ordem de até 0,01 s. Uma visão geral deste arranjo experimental descrito neste trabalho está esquematizada na Fig. 3.1. O sistema de injeção foi projetado para manter constante e controlar a pressão de injeção durante o curto período de injeção. A temperatura do líquido de injeção é controlada por um sistema de aquecimento formado por óleo em circulação, como ilustra a Fig. 3.1. O jato é descarregado em uma câmara de baixa pressão que é controlada e mantida pelo sistema de vácuo e de pressurização, também indicado na Fig. 3.1. Durante a injeção são feitas medições da pressão e temperatura do fluido a montante do jato, junto ao bocal de injeção a fim de comprovar, através dos dados experimentais obtidos, a regularidade da condição de regime permanente do processo. Todas as medições, registros fotográficos e aquisições são feitas de forma automática pelos computadores. Isso inclui também o sincronismo dos eventos, como o tempo de injeção e aquisição das imagens do jato. E, por fim, têm-se os sistemas ópticos que são baseados no método “Schlieren” e no método de iluminação por detrás. Fotografias da bancada, de acessórios e das instalações podem ser vistas nas Figs. 3.2 e 3.3. Nas próximas seções cada um dos conjuntos do esquema da Fig. 3.1 será discutido de forma pormenorizada. Este arranjo experimental utilizado é o mesmo empregado por Vieira (1999) com algumas adaptações. Nas próximas subseções, cada uma das partes importantes do arranjo experimental é discutida com detalhes.

Figura 3.1 – Esquema geral da bancada experimental.

Figura 3.2 – Fotografia da câmara de baixa pressão, painel de controle e mesas ópticas com lentes, espelhos parabólicos e filtro espacial.

Figura 3.3 – Fotografia da bomba de vácuo e do painel com mano-vacuômetro de mercúrio e vacuômetro analógico de precisão.

3.1 Sistema de Pressurização e de Vácuo

Este sistema controla e proporciona uma condição de pressão quase constante do ambiente onde o jato será expandido. Ele consiste de um reservatório acoplado à seção de observação, cujo volume total conjugado é de aproximadamente 440 litros. Estimativas indicaram que esse volume é suficiente para proporcionar um ensaio de volume de até 12 cm^3 de líquido, sem que a pressão da câmara aumente significativamente.

Na operação deste sistema, deve-se despressurizar a câmara até que o sistema

alcança uma pressão absoluta de 0,1 mbar ou 100 Pa. Após este procedimento, o reservatório é pressurizado com gás nitrogênio até alcançar a pressão desejada de ensaio. Isso se faz por questões de segurança para evitar a exposição do vapor do líquido de teste com o ar, o que poderia acarretar em uma ignição espontânea devido às elevadas temperaturas envolvidas. Para realizar a operação de sucção do reservatório (“vácuo”), o laboratório dispõe de uma bomba de vácuo de 18 m³/h de fabricação BOC-Edwards, modelo E1M18. Isto dá uma capacidade de alcançar 10 mbar em cerca de 15 minutos, para o volume total do arranjo. O esquema da linha de vácuo está na Fig. 3.4. Instalou-se antes da bomba um condensador de vapores (também conhecido como “dedo frio” ou “vacuum trap”). Sua função é 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. Nitrogênio líquido é usado para condensar os vapores.

Figura 3.4 – Esquema do sistema de vácuo.

Na linha de vácuo, a medição de pressão é feita por um mano-vacuômetro de coluna de mercúrio, que abrange uma faixa de 220 kPa até 2,5 kPa (equivalente a 2,2 até 0,025 bar ou, 1650 até 18,75 mmHg) absoluto e, na faixa de 2500 Pa a 10 Pa (ou 25 a 0,1 mbar), um vacuômetro analógico de precisão da BOC-Edwards, modelo

CGK-16. As precisões destes equipamentos são de 67 Pa e 25 Pa (equivalente a 0,670 mbar e 0,250 mbar), respectivamente. Optou-se pela utilização destes dois equipamentos devido à melhoria da precisão de leitura e, principalmente, evitar riscos de contaminação ambiental de mercúrio na medição de pressões abaixo de 2500 Pa (a pressão de vapor do mercúrio a 20 °C é menor que 1 Pa). Nesta faixa menor de pressão, a coluna de mercúrio é desconectada da linha de vácuo e pressurizada até a pressão atmosférica por uma válvula de três vias. No entanto, em uma segunda etapa dos experimentos (séries RUN2 e RUN3), este sistema foi implementado com um sensor de vácuo de melhor precisão da marca BOC-Edwards, modelo APGX, tornando viável a aquisição eletrônica de dados desta medição.

Outra medida de segurança foi tomada utilizando filtros de descarga da bomba de vácuo, evitando a contaminação de vapores nocivos à saúde no laboratório, já que a descarga da mesma era voltada para dentro do laboratório.

3.2 Sistema de Aquecimento

Este sistema tem o objetivo de aquecer o líquido de teste até a temperatura desejada de injeção. A faixa de temperatura, que pode ser ensaiada situa-se entre 20 a 300 °C. Esquematizado na Fig. 3.5, o óleo é aquecido por uma resistência elétrica e, em seguida, dirigido para aquecer o conjunto de injeção.

A temperatura é regulada por um termostato que é ligado em série com a resistência elétrica. Após a passagem do óleo pelo conjunto de injeção, eventualmente, será resfriado a fim de que a sua temperatura seja compatível com a temperatura máxima da bomba de óleo. Na seqüência, tem-se a bomba que faz recircular este óleo para a resistência elétrica a qual aquecerá novamente, fechando o ciclo, conforme indicado na figura. O sistema cumprirá sua função quando o líquido de teste alcançar a desejada temperatura de ensaio.

Figura 3.5 – Esquema do sistema de aquecimento.

3.3 Sistema de Injeção

Compete a este sistema injetar o líquido de teste a uma pressão constante de injeção e em tempo determinado. No intervalo deve-se garantir que as vazões transitórias, entre a abertura e o fechamento do bocal, sejam amortecidas em condições de regime permanente.

Figura 3.6 – Esquema da linha de injeção.

Neste sistema, ilustrado na Fig. 3.6, estão contidos: (1) a linha de injeção que mantém a pressão constante durante a injeção e permite medir o volume injetado, (2) o corpo do injetor onde o volume de líquido de teste se encontra e, (3) o cilindro pneumático de acionamento da injeção.

Figura 3.7 – Esquema do corpo de injeção. Mediante acionamento pneumático da haste, o líquido é subitamente expandido para fora do bocal. A temperatura inicial é obtida através da circulação de óleo aquecido no espaço anular.

No corpo de injetor, ilustrado na Fig. 3.7, existem duas câmaras. A câmara central contém o líquido de teste. A segunda câmara consiste em uma cavidade anular e por onde circula o óleo de aquecimento que mantém a temperatura do líquido de teste no valor desejado. Para a abertura e fechamento do bocal de injeção, existe uma haste no centro do injetor que obstrui a passagem do fluido pelo bocal e é ligada axialmente a um cilindro de acionamento pneumático (marca Festo com diâmetro de 10 mm e curso de 10 mm). Um termopar do tipo T, AWG 30, marca Omega, indica a temperatura do líquido. Os bocais de injeção são do tipo cônico e convergente, feito de aço-carbono, com o perfil interno do canal usinado por eletroerosão e outro feito de vidro. Um desenho esquemático do bocal encontra-se na Fig. 3.8a. No detalhe desta figura, estão esquematizadas as dimensões internas do bocal onde consta que, 0,3 mm é o menor diâmetro, 3,0 mm é o outro diâmetro e 10°

de convergência entre a linha de centro e a geratriz do bocal. Sua fotografia está na Fig. 3.8b. Um outro bocal com as mesmas dimensões, praticamente, apenas se diferenciando com o diâmetro da saída, que é de 0,8 mm, está na Fig. 3.8c. Um terceiro bocal, feito de vidro, cujo diâmetro da saída é de 0,35 mm está na Fig. 8.3d. Nela é vista apenas o inserto, e a borda da seção de saída é toda arredondada, diferente dos bocais anteriores em que a borda forma um canto vivo.

Figura 3.8 – A primeira figura é um esquema das dimensões gerais de um bocal. A segunda figura mostra os dois bocais usinados com diâmetro de saída de 0,8 e 0,3 mm, respectivamente. Ao lado está a vista do orifício de saída do jato de um bocal. A quarta fotografia mostra o inserto de vidro utilizado, cujo diâmetro de saída é de 0,35 mm. Seu comprimento é de 12 mm, diferente dos outros dois que possuem uma cota de 8 mm, como na imagem “a”.

Quanto ao esquema de funcionamento da injeção tem-se o cilindro de gás nitrogênio e o reservatório de expansão (Fig. 3.6), com capacidade de cinco litros, que mantêm constante a pressão durante a injeção do jato. Em série com esses equipamentos está a pipeta graduada que indica o volume consumido pela injeção, através da leitura do nível de líquido antes e depois do ensaio. A linha da pipeta até o corpo do injetor é totalmente preenchida com o líquido de teste. Durante o ensaio, o volume consumido pela injeção proporcionará uma expansão do gás (processo quase isentrópico) que, para uma variação de volume igual a 0,01%, a pressão da linha varia em 0,02%, que é algo desprezível. Sabendo o volume deslocado na pipeta e o intervalo de abertura e fechamento do injetor, determina-se a vazão de líquido injetado. Além da medição do volume total deslocado durante a injeção pela simples leitura de níveis de líquido, também se pode obter valores próximos ao instantâneo usando o dispositivo de medição de vazão descrito a seguir. Esse dispositivo de medição da vazão da injeção contém seis pares de sensores ópticos instalados através da seção transversal do tubo de vidro graduado, separados a uma distância equivalente a um volume de 1,90 mL, conforme esquematizado na Fig. 3.9. Quando o nível do líquido passa pelo par emissor-fotodetector, existe a mudança do sinal no respectivo tempo registrado pelo sistema de aquisição, o que é detectado por um sistema eletrônico de lógica digital. Os seis sinais digitais são combinados em um único sinal digital e adquiridos pelo sistema de aquisição de dados. Ao final, pode-se ter valores precisos de vazão nos intervalos de tempo considerados. Verifica-se que a vazão permanece essencialmente constante nesse período, com pequenas variações em torno de 1 a 2% em vazão mássica, as quais são tratadas estatisticamente. Um exemplo de sinal adquirido está na Fig. 3.10. Neste gráfico, primeiramente, é mostrado o sinal da pressão de injeção. Os transitórios relativos a abertura e fechamento da injeção coincidem com o sinal do sensor que está solidário à haste (Fig. 3.7). Durante a injeção, foi obtido uma média da pressão de 505,5 kPa, com um desvio padrão de 2,9 kPa do sinal. A pressão da câmara aumenta de forma linear no intervalo da injeção, e sua pressão inicial de 0,22 kPa, elevou-se ao patamar de 0,44 kPa. As rampas de subida e descida do sinal do sensor de nível indicam os instantes que o líquido ultrapassou o caminho óptico de cada par emissor-receptor do sensor.

O intervalo de duas rampas corresponde a um volume injetado de 1,90 ml e, no caso do gráfico, existem dois intervalos entre os instantes $t_a = 3,834\text{ s}$, $t_b = 4,654\text{ s}$ e $t_c = 5,506\text{ s}$. Finalmente, a temperatura de injeção é indicada com um valor médio de 122,2 °C e um desvio padrão do sinal coletado de 0,3 °C.

Um transdutor de pressão, da marca Kulite, modelo XTE-190-250-A e com faixa de 0 a 750 kPa, é fixado na linha de injeção para descrever o comportamento durante o ensaio.

Figura 3.9 – Arranjo de medição instantânea da vazão através do nível de líquido no tubo de vidro graduado.

Figura 3.10 - Sinais típicos adquiridos no ensaio. É possível observar os sinais de pressão e temperatura de injeção, com um ruído representado por um desvio padrão de 2,9 kPa e 0,3 °C. Estão representados também os sinais da pressão da câmara, do sensor de posição da haste do injetor que indica o tempo de duração da injeção e do sensor de nível de líquido que indica os intervalos de deslocamento do volume a cada 1,90 ml, representado por t_a , t_b e t_c .

3.4 Sistema Óptico – Método “Schlieren”

Esse tradicional método “Schlieren” permite o registro do gradiente de densidade em torno do jato além de ser empregado para visualizar ondas de choque, entre outros fenômenos, que podem estar presentes na evaporação de líquidos metaestáveis. Em uma primeira etapa, foi obtida uma série de ensaios, denominada de “Run1”, com registros fotográficos através de uma câmara CCD (“Charge Coupled Device”, que corresponde ao dispositivo fotossensível deste tipo de câmara) com um tempo de exposição de 250 μs . Na etapa seguinte, foi realizada uma implementação do sistema óptico, introduzindo uma lâmpada do tipo “flash”, que possui um intervalo de tempo de iluminação de 2 μs , caracterizando uma imagem mais instantânea para a visualização no método “Schlieren”. Em adição, também foi implementada uma segunda câmara CCD que adquire imagens do jato evaporativo

concomitante com a primeira câmara, através do sistema de “iluminação por detrás” que, por sua vez, deu suporte para correlacionar as imagens obtidas pelos dois métodos de visualização. As imagens registradas digitalmente, através do método “Schlieren”, são submetidas às ferramentas matemáticas de processamento e filtragem e este procedimento é pormenorizado no Apêndice II. As substâncias como o óleo diesel e o querosene já foram utilizados como fluidos de teste (Vieira, 1999), nesta bancada. Em ensaios atuais, utilizou-se a substância pura iso-octano (C_8H_{18}), que também é uma substância SCME. É interessante notar que é uma vantagem utilizar uma substância SCME porque devido ao seu potencial de armazenamento de energia durante a metaestabilidade, maior será a taxa de evaporação, conseqüentemente, menor será a quantidade de gotículas oriundas da onda de evaporação proporcionando uma imagem mais nítida do núcleo de líquido.

O método "Schlieren" consiste de um feixe luminoso paralelo que atravessa a região do fenômeno e depois é focalizado por meio de um espelho parabólico ou lente sobre um filtro espacial, também chamado de faca, ou "pin-hole". 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 sensor de CCD. Caso contrário, o raio de luz que atravessa uma região com uma variação de densidade desprezível, não sofre desvio e, seu foco continua sendo o "pin-hole" que não bloqueia o raio, fazendo-o atingir o filme fotográfico ou o sensor CCD. As regiões onde o gradiente de densidade é elevado aparecem na imagem do filme como sombras em virtude do desvio do raio luminoso. Isso caracteriza a intensidade luminosa na imagem como algo inversamente proporcional ao gradiente da densidade.

A geometria do arranjo óptico está mostrada na Fig. 3.11. Na seqüência, as Figs. 3.12 e 3.13, são fotografias das mesas ópticas com os equipamentos ópticos. Vê-se que no esquema da Fig. 3.11, o feixe da fonte luminosa é concentrado ao passar pela lente convergente, coincidindo o foco do feixe com a posição do filtro espacial. Isso faz com que a fonte luminosa tome um caráter pontual, pois o diâmetro do "pin-hole" é de 0,28 mm. 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", atravesse a 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.

Uma descrição mais detalhada do sistema "Schlieren" utilizado encontra-se no trabalho realizado por Guimarães (1999).

Figura 3.11 - Geometria do aparato óptico.

Figura 3.12 - Equipamentos: espelhos, lâmpada, lente convergente e filtro espacial.

Figura 3.13 - Equipamento: espelhos, filtro espacial e câmara CCD.

Basicamente, nesta configuração, utiliza-se uma lâmpada halógena automotiva de 40 W (lâmpada de filamento de tungstênio preenchida com gás halógeno), cuja intensidade é regulada por um “variac”, dois espelhos parabólicos de diâmetro de 150 mm com 800 mm de foco, uma lente de 45 mm de foco, dois filtros espaciais ou “pin-hole”, dois espelhos planos com a primeira superfície reflexiva e uma câmara CCD com objetiva. Em uma outra configuração, no lugar da lâmpada convencional, foi empregada a utilização de uma lâmpada do tipo “flash”.

3.5 Sistema de Aquisição de Dados

Existe um computador (computador 1 da Fig. 3.14) que gerencia todo o ensaio obtendo os dados de pressão e temperatura iniciais, posição da haste do injetor, e sinais de saída para disparo da injeção e da aquisição das imagens. Este possui uma placa de aquisição de dados da marca Lynx com 16 canais, 2 saídas de expansão e resolução de 12 bits. São adquiridos dados: a) da temperatura do líquido através de um termopar do tipo “T”; b) da pressão da linha de injeção pelo transdutor de pressão, marca Kulite, modelo XTE-190-250-A; c) do posicionamento da haste do

cilindro pneumático através de um sensor óptico; d) do sensor de nível da pipeta graduada, e; e) da pressão da câmara onde é descarregado o jato. Se necessário, os dados são amplificados em um módulo de 8 canais, modelo MSC-1000-V2-8, da Lynx.

A aquisição de imagens é feita através de um outro computador (computador 2 da Fig. 3.14) que possui uma placa de aquisição de imagens. Este recebe o sinal de saída de expansão, canal "1" do computador "1" para capturar as imagens do jato. O outro sinal de expansão, canal "0" do computador "1", é dedicado para o acionamento da injeção. A imagem é obtida por uma câmara CCD, monocromática, com tamanho de sensor de 1/2 polegada, da marca Coastar, modelo CV-M50. A placa de processamento de imagens é da Data Translation, modelo DT-3152, e as bibliotecas do "Frame Grabber - SDK", da Data Translation, foram utilizadas para construir o programa computacional que controla esta aquisição de imagens. Na Fig. 3.14, está esquematizado o sistema.

Figura 3.14 - Sistema de aquisição de dados, onde o canal "0" dispara o injetor e o canal "1" dispara a aquisição das imagens.

O computador "1", conforme a Fig. 3.14, monitora a temperatura do fluido de teste e a linha da pressão de injeção. Quando os valores desejados dessas grandezas são alcançados para o ensaio, o sistema de aquisição de dados do computador 1 é acionado. Os dados de pressão, temperatura e posição da haste começam a ser coletados. Após 0,20 s, é obtida uma fotografia da seção sem o disparo efetivo do

jato, a qual será uma referência para posterior tratamento da imagem, que será visto mais adiante (Apêndice II). O instante de disparo da fotografia corresponde à descida de patamar de voltagem do canal "1". Depois são coletadas mais quatro imagens que se sucedem em intervalos de 0,20 s, durante o jato. A Fig. 3.15 mostra o sinal do canal "1" e também, exibe o gráfico do canal "0" que aciona o injetor durante o intervalo de 5 V do sinal, em função do tempo. Este canal, ao mesmo tempo em que energiza um relê de estado sólido, também aciona a válvula solenóide para o acionamento do cilindro pneumático, que movimenta a haste para a abertura do bocal do injetor. No intervalo de 0,20 s, após o início do ensaio, ele é disparado com uma defasagem de 0,08 s, aproximadamente, entre o tempo do disparo do canal "1" no computador e a efetiva injeção do fluido. Quanto à duração da injeção, neste exemplo, ficou em torno de 0,75 s, pois a defasagem entre o sinal e o fechamento da injeção é de 0,04 s, aproximadamente.

Figura 3.15 – Esquema dos sinais de saída. A linha vermelha corresponde ao sinal do acionamento do injetor, ou canal “0”, e a linha azul corresponde ao sinal de disparo para a aquisição das imagens, canal “1”.

A indicação do tempo destes sinais é repetida no gráfico da Fig. 3.16. Nele são ilustrados os sinais referentes ao transdutor que monitora a pressão da linha de injeção e o sinal referente ao sensor de posição da haste do injetor. O recuo da haste do injetor proporciona a abertura do bocal, efetuando a injeção. O sensor óptico de posicionamento do cilindro pneumático marca um sinal de 0 V quando o bocal está fechado, após a haste deslocar-se 1,0 mm, o sinal sobe para 5 V, depois retorna para

voltagem nula após deslocar-se 2,0 mm e com o deslocamento de 3,0 até 4,0 mm o sinal é de 5 V. A haste que obstrui o bocal está solidária aos dentes. Na medida que se movimenta a haste, o posicionamento dos dentes pode bloquear ou abrir o caminho óptico do sensor. Tomando o sinal do sensor, verifica-se que a rampa é bastante inclinada no fechamento da injeção. Isso acontece em virtude da inércia da energização do sensor e também pelo fato que a força aplicada para a abertura do injetor é menor que a força no encerramento da injeção no cilindro pneumático.

Figura 3.16 – Comparação dos tempos dos sinais de saída e de entrada. O primeiro sinal representa o sinal para a câmara CCD habilitar a aquisição das imagens na rampa de descida, indicada pelas setas. O segundo sinal apenas apresenta o tempo em que o computador habilitou a abertura do injetor. Estes dois sinais não possuem a representação da voltagem em sua amplitude. O terceiro e o quarto sinal são as representações típicas de um sinal adquirido da pressão de injeção e do sinal de posição da haste, respectivamente. Neles constam as coincidências dos transitórios devido à abertura e fechamento da injeção.

3.6 Implementação do Sistema Óptico

Em virtude da grande utilização da câmara CCD para a obtenção de imagens ou filmagens em nosso laboratório, já que esta técnica possibilita o processamento digital destas imagens, houve a necessidade de buscar um melhor entendimento do princípio de funcionamento do equipamento e alguns tópicos deste tema foram estudados, como:

- Característica do sinal da imagem e comparação entre NTSC, PAL e SECAM;
- Características do sensor CCD;
- Parâmetros ajustáveis à câmara CCD (tempo de exposição, ganho, sincronismo, entrelaçamento de campos, etc.);
- Características das placas de aquisição de imagens;
- Comunicação entre câmara CCD e Placa (cabeamento, sinais de sincronismo, sinais de disparo, RS170, etc.);
- Parâmetros ajustáveis aos softwares de aquisição;
- Tópicos para o desenvolvimento de um software de aquisição em função dos pacotes oferecidos pelos revendedores.

Tal estudo proporcionou verificar a estrutura atual das imagens obtidas que, devido à câmara CCD estar configurada para o modo “entrelaçado” (ou seja, primeiro a câmara obtém um campo das linhas ímpares e, após o intervalo de $1/60$ s, a câmara adquire o campo das linhas pares, que re combinadas, constituem um quadro), se observa uma defasagem de tempo entre os campos, dentro da imagem. Um exemplo disto está mostrado nas imagens que se seguem (Fig. 3.17). Nota-se a distinção dos eventos ilustrados nas Figs. 3.17b e 3.17c. Acrescentado a este fato, pode-se observar na região do jato da fotografia da Fig. 3.17a, uma seqüência de riscos horizontais, no filete líquido, concluindo a descontinuidade do jato.

Figura 3.17 – A primeira fotografia, corresponde à imagem original obtida na câmara CCD. As duas imagens seguintes, b) e c), correspondem ao campo das linhas ímpares e pares da original, respectivamente. Com esta decomposição, é possível notar as descontinuidades no jato devido à evaporação.

Cabe lembrar que as imagens já obtidas nos ensaios não perderam a sua integridade diante deste fato, pois, em cada ensaio, são registradas quatro fotografias do evento dando a característica de permanência do fenômeno como, por exemplo, posição da onda de choque e comprimento de extinção do líquido devido à evaporação. Um exemplo disto está mostrado na Fig. 3.18 onde estão as quatro imagens obtidas do ensaio com as seguintes condições: pressão de injeção de 500 kPa, pressão da câmara de 0,41 kPa e temperatura de injeção de 162 °C. Sequencialmente, a primeira imagem é obtida no intervalo de 0,1 s após a abertura da injeção, depois de 0,5 s tem-se uma nova aquisição e, as próximas duas imagens são obtidas em intervalos de 2 s a partir da segunda imagem obtida. Esta repetibilidade das imagens fornece uma segurança da regularidade do ensaio, agregado à análise dos dados de sinais que são adquiridos pelos sensores de vazão, pressão e temperatura de injeção. Alternativa para contornar isto foi a utilização de uma lâmpada de disparo rápido (“flash”) com o sincronismo do “shutter” da câmara CCD (Fig. 3.19).

Figura 3.18 – Seqüência de fotografias obtidas em um único ensaio conforme os intervalos de 0,10 , 0,50 , 2,50 e 4,50 segundos, após a abertura do injetor.

Figura 3.19 – Fotografia da mesa óptica que possui a fonte de luz. No caso, esta imagem mostra o “flash” empregado que possui um tempo de exposição de $2\ \mu\text{s}$.

A lâmpada halógena, que foi utilizada na série de ensaios “RUN1” (primeira etapa dos ensaios aqui apresentados), foi substituída e implementada por um sistema de sincronismo com lâmpada de “flash”, marca EG&G e modelo LS-1130, que consegue suprir as necessidades de iluminação do experimento, sem que a mesma câmara CCD possua o recurso de varredura “Progressive Scan”, ou seja, adquire os campos das linhas pares e ímpares no mesmo instante de tempo, sem a defasagem tradicional de $1/60\ \text{s}$. Com a utilização deste “flash”, foi possível adquirir uma imagem mais instantânea do jato, pois o mesmo possui um tempo de iluminação da ordem de $2\ \mu\text{s}$, enquanto, na configuração anterior, este tempo de exposição ficava em torno de $250\ \mu\text{s}$, portanto, há um ganho em termos de resolução temporal de cerca de 125 vezes. Resumindo, com uma câmara CCD que apenas possui a função de modo entrelaçado e com tempo de exposição de $250\ \mu\text{s}$, foi possível obter o recurso de “Progressive Scan” com um tempo de exposição de $2\ \mu\text{s}$.

Para tanto, foi elaborado um programa computacional (Fig. 3.20), em linguagem “Visual Basic”, que gerencia a placa de aquisição de imagens (marca Data Translation e modelo DT3152). O programa controla o tempo de exposição da câmara CCD (opção “Sync Máster”), a quantidade de imagens a serem adquiridas no

ensaio, a duração do ensaio e, oferece a opção de utilizar a segunda câmara. Cabe lembrar que a metodologia de filtragem matemática das imagens adquiridas pelo método “Schlieren” e o próprio método não foram alterados, pois a lógica de adquirir uma imagem antes do jato e quatro durante o jato, empregada pelo programa anterior de aquisição de imagens, desenvolvido por Guimarães (1999), foi mantida.

Figura 3.20 – Interface do programa computacional “Aqjatos” projetado e programado para adquirir as imagens dos jatos desta bancada. Nele se regula o tempo de exposição da câmara CCD (Sync Master), quantidade de imagens adquiridas no ensaio, duração do ensaio e, utilização de uma segunda câmara.

O seu maior diferencial, em relação ao programa anterior, está no sincronismo entre a câmara CCD e a lâmpada de “flash”. Como exemplo do seu funcionamento, na grande maioria dos ensaios, o sinal de controle do tempo de exposição da câmara CCD, ou “frequência de imagens”, é configurado para 10 Hz (o comum é 60 Hz). Simultaneamente, existe um sinal de 2 Hz que é originado pela placa de aquisição de dados. Estes dois sinais elétricos de controle, que variam de 0 a 5 volts, são combinados em uma porta lógica AND, do tipo CMOS, que origina um sinal de saída único para disparar a lâmpada de “flash” no instante em que o tempo

de exposição da câmara CCD está habilitado pelo sinal de 10 Hz de frequência. O esquema está ilustrado na Fig. 3.21.

Figura 3.21 – Esquema dos sinais que fazem o sincronismo entre a lâmpada de “flash” e a câmara CCD.

Conforme a Fig. 3.21, a placa de aquisição de imagens dirige um sinal controlador da câmara CCD de 10 Hz. Deste sinal, cada pico controla o tempo de exposição de cada campo da imagem, ou seja, a câmara CCD envia 5 imagens por segundo nesta configuração (10 Hz), pois cada imagem possui dois campos. Porém, não é possível saber em que instante o “flash” dispara para sensibilizar os dois campos da imagem, porque no primeiro pico, o sensor da câmara CCD pode ser sensibilizado nos dois campos, mas no segundo pico, ele apenas sensibiliza um campo. Para isto, existe a combinação de frequências de 10 Hz com a frequência de 2 Hz para que na seqüência de aquisição das imagens, possam obter intercaladas as imagens boas, que possui os dois campos, e as outras com apenas um campo, porque a cada 5 picos do sinal controlador da CCD, o “flash” dispara. Além disto, o intervalo de duração do pico é ajustado para que o “flash” dispare no instante que a CCD está disponível para adquirir os dois campos da imagem (ímpares e pares), ou apenas um deles (o campo das linhas pares), que não é desejável. Em um único ensaio, no mínimo, quatro imagens são obtidas para que haja pelo menos uma imagem com boa qualidade, ou seja, com os dois campos. Se não houvesse esta intercalação de imagens com um e dois campos, um único ensaio estava sujeito a

adquirir somente imagens boas ou, somente imagens com um campo. Na Fig. 3.22 estão ilustradas imagens obtidas em um ensaio de jato de iso-octano com temperatura e pressão de injeção de 95°C e 250 kPa, respectivamente, e pressão do reservatório 200 vezes menor que a pressão de vapor.

Figura 3.22 – Exemplo de seqüência de imagens adquiridas em um único ensaio. Observa-se que as imagens do lado esquerdo possuem os dois campos, enquanto as outras estão com um único campo, e por isso estão mais escurecidas.

O laboratório dispõe de uma segunda câmara CCD que foi implementada no experimento. Enquanto a primeira adquire as imagens pelo sistema “Schlieren”, a outra adquire a imagem, observando o jato iluminado por uma lâmpada que fica por detrás do evento que, no entanto, não está situado no campo de visão da câmara. A lâmpada ilumina de forma difusa, diferentemente do método “Schlieren” que a fonte luminosa gera feixes de luz que traspassam o jato de forma colimada. Isto está ilustrado na disposição da Fig. 3.23.

Figura 3.23 – Figura esquemática da disposição das câmaras CCDs.

Uma correlação das imagens obtidas pelas duas técnicas é possível de se fazer e extrair algumas conclusões importantes. No exemplo a seguir da Fig. 3.24, tem-se um único experimento realizado com injeção de iso-octano cuja pressão de saturação é duas vezes menor que a pressão no reservatório (12,4 kPa). A primeira imagem, pelo “Schlieren” com tempo de exposição de $2 \mu s$, mostra a movimentação e evaporação do líquido ao longo do jato. Pela segunda imagem, já se observa o ângulo de dispersão do jato devido ao espalhamento das gotículas. Neste caso, a iluminação foi feita pela lâmpada que incidia por detrás do evento e, em função desta incidência difusa, a intensidade luminosa é amplificada no filete de líquido. Como o tempo de exposição é bem maior, de $1000 \mu s$, existe a impressão de um jato uniforme, ou seja, não foi fragmentado em gotículas.

Figura 3.24 – Comparação de duas imagens de um mesmo ensaio. a) A primeira foi obtida pelo método “Schlieren” que destaca bastante a movimentação e evaporação do fluido em volta do jato e b) a outra foi adquirida pela segunda câmara CCD que destaca a trajetória das gotículas. A primeira imagem possui um tempo de exposição de $2\ \mu s$ e a segunda de $1000\ \mu s$. O líquido foi injetado a uma pressão de injeção de 750 kPa e temperatura de injeção de $56^{\circ}C$. A pressão do reservatório é a metade da pressão de saturação da substância, iso-octano, que é de 25 kPa.

3.7 Filtragem de Imagens

Esta seção tem o objetivo de mostrar um exemplo de filtragem de imagens de um jato. Maiores detalhes são obtidos no Apêndice II. O procedimento adotado requer a obtenção de uma imagem prévia, imediatamente anterior ao jato, para eliminar efeitos comuns às duas imagens. Após adquirir as imagens do jato, estas

podem ser subtraídas da imagem inicial, retirando aspectos visuais indesejados para tornar mais nítido os fenômenos envolvidos pelo jato. No exemplo a seguir, têm-se duas imagens, em que a primeira, Fig. 3.25a, foi realizada antes do jato e a outra, na Fig. 3.25b, durante a injeção. A terceira imagem (Fig. 3.25c) é o resultado da subtração dessas duas imagens anteriores. Claramente, se nota a qualidade superior da imagem tratada, já que os elementos comuns foram eliminados e, como consequência, somente os fenômenos de interesse ficam evidentes.

Figura 3.25 – A primeira é a fotografia sem o jato e a seguinte contém o jato. A subtração da segunda fotografia pela fotografia sem o jato resulta na última imagem com um jato visualmente mais evidente.

3.8 Procedimento do Ensaio

Um ensaio é feito tendo primeiramente o cuidado de carregar o condensador de vapor (“vapor trap”) com nitrogênio líquido ou gelo seco. Além disso, se a linha de injeção não estiver preenchida com o líquido de teste, também é feita a depressurização na linha de injeção, mantendo o bocal do injetor aberto. Alcançando a pressão absoluta de 0,1 mbar (ou 10 Pa), é fechado o bocal para que o líquido do reservatório preencha esta porção da linha depressurizada. Este fechamento acontece através da pressurização do pistão pneumático solidário à haste que faz a obstrução do bocal, isolando a comunicação entre o fluido contido no injetor e a câmara onde o jato é descarregado.

Novamente é feita a abertura do bocal nesta mínima pressão. O líquido contido no injetor tende a evaporar, isto promove a retirada de algum gás que esteja diluído no fluido. Após este procedimento de enchimento, é fechado o bocal e a linha de injeção é pressurizada até alcançar a pressão de injeção desejada. O computador monitora esta pressão através do transdutor instalado na linha de injeção.

A câmara de baixa pressão é pressurizada com gás nitrogênio até alcançar a pressão absoluta predeterminada pelo ensaio. Seu controle de medição é feito, principalmente, pelo mano-vacuômetro ou pelo vacuômetro analógico.

O sistema de aquecimento começa a funcionar com o acionamento da bomba de óleo e a conexão da resistência elétrica que vai aquecer o óleo de circulação. O controle da temperatura é feito pelo computador e a manutenção da temperatura fica sob o comando do termostato e do "variac", que estão ligados em série à resistência elétrica que aquece o óleo.

Antes do ensaio, os computadores devem estar preparados com os programas de gerenciamento de dados (Aqdados, da empresa Lynx) e de aquisição de imagens (Aqjatos, feito no laboratório utilizando as bibliotecas do programa computacional “DT Open Layer” da empresa Data Translation).

Sabendo que os valores desejados das pressões de injeção e da câmara de baixa pressão foram atingidos, e a temperatura do fluido foi alcançada, falta apenas anotar o nível inicial do volume do fluido. Em seguida, deve-se acionar o ensaio propriamente dito pelo computador principal, aquele que adquire as imagens. Este envia um sinal de disparo para o outro computador que faz a aquisição dos dados de

pressão, temperatura de injeção, posição da haste, nível do volume injetado e pressão da câmara. Automaticamente são feitos os comandos de abertura do injetor, aquisição de imagens com sincronismo da lâmpada de “flash”. 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 de injeção são analisados a média e o desvio padrão que fica na faixa de 1,7 kPa. Dos dados de temperatura também são registrados o desvio padrão e a temperatura média que costuma ser da ordem de 0,20 °C. Do sinal do sensor de posição da haste, são extraídos o tempo inicial e o tempo final de injeção, como visto na Seção 3.5. Do sinal do sensor de nível de volume injetado da coluna de vidro graduada, é obtida a informação da vazão. E finalmente, quando a pressão é menor que 20 mbar (ou 2 kPa), é possível registrar eletronicamente a pressão da câmara onde é descarregado o jato. Caso contrário esta medição é documentada através do mano-vacuômetro de coluna de mercúrio ou pelo vacuômetro analógico.

3.9 Faixas de Incertezas

Na Tab. 3.1 são apresentadas as faixas de medições de cada variável da bancada e as respectivas incertezas com 95% de confiabilidade. O levantamento completo das incertezas, bem como a sua propagação, estão no Apêndice I.

Tabela 3.1 - Incertezas relativas às medições realizadas.

Medições	Faixa	Incerteza
Pressão da câmara de vácuo	60 a 2000 Pa 2 a 100 kPa	± 54 Pa $\pm 0,1$ kPa
Pressão de injeção	0 a 700 kPa	$\pm 1,96$ kPa
Temperatura de injeção	20 a 300 °C	$\pm 1,2$ °C
Vazão experimental	0 a 3,5 m/s	$\pm 1,99$ %
Coeficiente de descarga	0,93	$\pm 0,0176$
Pressão do líquido metaestável:	para $(P_0 - P_1)$ entre:	a incerteza de P_1 é:
- depende da diferença entre a pressão	5 a 100 kPa	$\pm 4,99$ kPa
de injeção e a pressão metaestável	200	$\pm 8,76$
$(\Delta P = P_0 - P_1)$. Praticamente, a incerteza	300	$\pm 12,77$
da pressão metaestável é:	400	$\pm 16,85$
$U_{P1} \cong 0,042*(P_0 - P_1)$.	500	$\pm 20,96$
	600	$\pm 25,09$
	700	$\pm 29,22$
Dimensões nas imagens	1 a 150 mm	$\pm 0,1$ mm

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios. Primeiramente são apresentados os dados de vazão mássica, depois são mostrados os resultados do comprimento de extinção da parte líquida do jato e, em seguida, as dimensões características da estrutura da onda de choque formada. Tabelas detalhadas sobre os resultados conjuntamente com as principais imagens de cada ensaio estão no Anexo B e C deste trabalho.

4.1 Resultados Experimentais: Bocal de aço com 0,3 mm de diâmetro (séries: Run1, Run2 e Run3)

Nesta seção, são apresentados os dados experimentais do bocal rugoso, cônico-convergente com diâmetro de saída de 0,3mm, que será denominado para a série “Run1”, “Run2” e “Run3”, que apenas se diferenciam pela metodologia de aquisição das imagens em virtude das implementações feitas na bancada experimental. Deste bocal foram feitos ensaios em função da pressão de injeção (P_{inj}): 125, 250, 500 e 750 kPa. E as temperaturas de injeção (T_{inj}) foram: 56, 76, 95, 120, 130, 162 e 178 °C, cujas pressões de saturação são 25, 50, 90, 177, 230, 450 e 600 kPa, respectivamente. As pressões da câmara (P_{∞}) se situaram na faixa de 0,05 kPa até 200 kPa. O esquema gráfico da Fig. 4.1 ilustra a combinação destas condições iniciais e a faixa da pressão da câmara onde o jato é descarregado. Estas condições de pressão e temperatura de injeção e da pressão da câmara foram monitorados em todos os ensaios para se ter a garantia de que não ocorreu nenhuma variação destes parâmetros durante o processo de injeção, garantindo a condição de regime permanente, como foi discutido na Seção 3.3. Para cada ensaio, é feito o cálculo da análise da vazão, pelo método do volume total consumido pela injeção durante o intervalo de tempo correspondente registrado eletronicamente. Esta vazão medida é comparada com aquela obtida pelo sensor de nível do volume. Uma eventual desigualdade destas duas medições da vazão corresponde a uma injeção irregular ou, pode estar associada com a possibilidade de formação de bolhas no

interior do injetor. Caso não haja irregularidade da vazão mássica medida ($\dot{m}$), é possível obter a velocidade média do jato no bocal (u_1). Com esta velocidade e as propriedades do líquido à temperatura de injeção como a densidade, a viscosidade dinâmica, se obtém o número de Reynolds, Re , através de Eq. (4.1). O coeficiente de descarga (C_D) é determinado pela Eq. (4.2) que foi obtida experimentalmente cujo levantamento de dados está no Apêndice I. A equação de descarga do bocal (Eq. 4.3) calcula a vazão teórica estimada, $\dot{m}_e$, para uma pressão a jusante do bocal igual a pressão da câmara. E a pressão do líquido (P_1) na saída do bocal é calculada pela Eq. (4.4), através da vazão mássica experimental, $\dot{m}$, e considera que o escoamento do fluido é incompressível, ou seja, mantém a condição metaestável:

$$Re = \frac{\rho_l \cdot u \cdot D_b}{\mu}, \quad (4.1)$$

$$C_D = 0,9673 - 5,6682/\sqrt{Re}, \quad (4.2)$$

$$\dot{m}_e = C_D \cdot A_b \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_l \cdot (P_0 - P_\infty)}, \quad (4.3)$$

$$P_1 = P_0 - \frac{1}{2 \cdot \rho_l} \left(\frac{\dot{m}}{C_D \cdot A_b} \right)^2, \quad (4.4)$$

onde A_b é a área da seção transversal de saída do bocal.

Nas imagens adquiridas, conforme o tipo do jato observado, é possível obter os seguintes dados: comprimento de extinção do núcleo líquido do jato (L_E) e dimensões características das ondas de choque (r_1 e r_2). Todas estas características estão ilustradas na Fig. 4.2. Cabe lembrar que, conforme apresentado na Seção 3.3, Fig. 3.10, a pressão da câmara eleva-se durante a injeção. Assim, cada imagem do jato foi adquirida em um instante que possuía um determinado valor de pressão da câmara, que também era registrado. Da imagem, eram obtidos os valores de r_1 e r_2 , que eram associados com a pressão da câmara correspondente ao instante de aquisição da imagem.

Figura 4.1 – Representação gráfica das condições de injeção e a pressão da câmara onde é descarregado o jato pelo bocal de 0,3 mm, rugoso.

Figura 4.2 – Representação dos parâmetros geométricos relevantes de um experimento típico.

4.1.1 Resultados das Medidas das Vazões Mássicas

Os gráficos das Figs. 4.3 a 4.6 mostram o comportamento do jato em função da diminuição da pressão da câmara (P_∞), quando se mantém constante a pressão (P_0) e temperatura de injeção (T_0). Em todos estes gráficos, se constata que se alcança um patamar máximo de vazão em função da diminuição da pressão da câmara. A barra de desvio desta medição está em alguns pontos do gráfico, mas esta regra se estende aos demais dados, cujo valor é de $\pm 2,0$ % da vazão medida. Nos gráficos, também são indicados os pontos da pressão de saturação para a temperatura de injeção.

Os dados completos referentes a estes gráficos estão no Anexo B, nas Tabs. B.1, B.2 e B.3 que são relativas às séries de ensaio “Run1”, “Run2” e “Run3”, respectivamente, no entanto, a metodologia de coleta das vazões não é diferente em nenhuma destas séries.

Figura 4.3 – Vazão mássica em função da razão da pressão da câmara e a pressão de injeção. A pressão de injeção é de 125 kPa.

Figura 4.4 –Vazão mássica em função da razão da pressão da câmara e a pressão de injeção. A pressão de injeção é de 250 kPa.

Figura 4.5 –Vazão mássica em função da razão da pressão da câmara e a pressão de injeção. A pressão de injeção é de 500 kPa.

Figura 4.6 –Vazão mássica em função da razão da pressão da câmara e a pressão de injeção. A pressão de injeção é de 750 kPa.

4.1.2 Comprimento de Extinção do Núcleo Líquido

Um parâmetro medido nas imagens dos ensaios foi o comprimento de extinção do núcleo de líquido, L_E . Esta distância tem sua representação esquemática no detalhe inferior esquerdo da Fig. 4.7. É uma dimensão que se manifestou insensível à variação da pressão da câmara, quando a vazão está bloqueada. Na Tab. B.4, do Anexo B, são encontrados todos os valores desta dimensão em função das condições iniciais (P_0 e T_0) de cada ensaio. O gráfico da Fig. 4.7 é uma amostra deste comportamento do comprimento de extinção do líquido em função da temperatura e pressão de injeção. Cada classe de pressão de injeção foi diferenciada pelos respectivos símbolos representados na legenda deste gráfico. De imediato, é possível afirmar que quanto maior é a pressão de injeção maior será seu comprimento da parte líquida. Este comportamento se inverte com relação à temperatura de injeção.

Figura 4.7 – Comportamento do comprimento de extinção do núcleo líquido, L_E , em função da temperatura de injeção. São diferenciados os ensaios com pressão de injeção de 125 kPa, 250 kPa, 500 kPa e 750 kPa (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro).

4.1.3 Dimensões Características da Estrutura da Onda de Choque

A dimensão radial da onda de choque, r_1 , e sua distância axial em relação à saída do bocal, r_2 , foram as principais medidas tomadas das imagens adquiridas para caracterizar as dimensões principais da onda de choque, conforme indicados na Fig. 4.8. Os dados obtidos destas dimensões do bocal de 0,3 mm estão na Tab. B.5, do Anexo B. Na representação gráfica das Figs. 4.9 a 4.12 são mostrados os comportamentos destas dimensões características da onda de choque em função da pressão da câmara. Quanto menor é a pressão da câmara, maiores serão os valores de r_1 e r_2 .

Figura 4.8 – Representação das dimensões medidas na estrutura da onda de choque.

Figura 4.9 – O comprimento representativo, r_1 (no primeiro gráfico) e r_2 são indicados em função da pressão da câmara para os ensaios cuja pressão de injeção é 125 kPa (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro).

Figura 4.10 – O comprimento representativo, r_1 (no primeiro gráfico) e r_2 são indicados em função da pressão da câmara para os ensaios cuja pressão de injeção é 250 kPa (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro).

Figura 4.11 – O comprimento representativo, r_1 (no primeiro gráfico) e r_2 são indicados em função da pressão da câmara para os ensaios cuja pressão de injeção é 500 kPa (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro).

Figura 4.12 – O comprimento representativo, r_1 (no primeiro gráfico) e r_2 são indicados em função da pressão da câmara para os ensaios cuja pressão de injeção é 750 kPa (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro).

4.1.3.1 Influência da Pressão da Câmara sobre as Dimensões da Onda de Choque

Esta subseção indica a variação da onda de choque como função do aumento da pressão da câmara durante a injeção. A Fig. 4.13 possui duas imagens de um mesmo ensaio sendo o intervalo de tempo entre elas de 1 s. Nota-se que nestas duas imagens, não houve mudança dimensional no comprimento do núcleo líquido. O formato da onda de choque continuou axissimétrico e apenas o raio médio da onda de choque se contraiu quase imperceptivelmente, de 3,9 mm (Fig. 4.13a) para 3,6 mm (Fig. 4.13b). Um outro está mostrado na seqüência da Fig. 4.14, onde ilustram três imagens de um jato descarregando na câmara, cuja pressão aumentou ligeiramente, resultando em uma diminuição das dimensões da onda de choque. Mesmo assim, o jato não perdeu seu perfil axissimétrico e também manteve seu comprimento do núcleo líquido. Portanto, em função deste aumento da pressão da câmara, que é da ordem de 0,2 kPa por injeção, se tem o cuidado de associar a pressão da câmara ao instante de aquisição de cada imagem do ensaio.

Figura 4.13 – Sequência de duas imagens de um mesmo ensaio onde a pressão e temperatura de injeção é de 500 kPa e 76 °C e, o R_p é de 50, praticamente, pois a pressão da câmara variou de 0,90 a 0,99 kPa, respectivamente, em um intervalo de 1 s.

Figura 4.14 – Sequência de imagens de um mesmo ensaio onde a pressão de injeção é de 250 kPa e temperatura de 56 °C e o R_p é de 500, praticamente. No entanto, a pressão da câmara, desde a primeira imagem elevou de 0,05, 0,09 e, por último, 0,14 kPa em um intervalo de tempo de 1s entre cada imagem obtida.

4.2 Ensaio com o Bocal Rugoso de 0,8 mm de Diâmetro na Saída – Série R08

Na Seção 4.1, foram mostrados os resultados experimentais de um bocal cônico-convergente com diâmetro de saída de 0,3 mm (séries Run1, Run2 e Run3). Este foi caracterizado como rugoso pelo simples fato de seu acabamento superficial do canal é típico de um acabamento feito através de furação com broca. Outro bocal testado, apresentado neste capítulo, também possui este aspecto rugoso e seu diâmetro de saída é de 0,8 mm. A Fig 4.15 mostra as condições iniciais de injeção para este bocal. Suas pressões de injeção são de 125 e 250 kPa e as temperaturas de injeção são de 56, 95 e 120 °C. Um desenho ilustrativo deste bocal é visto no detalhe da figura.

Figura 4.15 – Representação gráfica das condições de injeção e a pressão da câmara onde é descarregado o jato pelo bocal rugoso de 0,8 mm – Série R08. Um desenho do bocal é visto no detalhe da figura.

4.2.1 Resultados das Medidas das Vazões Mássicas – Série R08

O gráfico da Fig. 4.16 classifica os dados da vazão em função da condição inicial (P_0 e T_0) e mostra este comportamento em função da pressão da câmara (P_∞) e. A barra de desvio desta medição é de $\pm 2,0$ % da vazão medida.

Os dados numéricos referentes a estes gráficos estão no Anexo C, nas Tabs. C.1, onde constam outras informações sobre cada ensaio desta série.

Figura 4.16 –Vazão mássica em função da razão da pressão da câmara e a pressão de injeção obtida dos ensaios com o bocal de aço de diâmetro 0,8 mm.

4.2.2 Comprimento de Extinção do Núcleo Líquido – Série R08

No gráfico da Fig. 4.17, o comprimento de extinção do líquido está representado em função da temperatura e pressão de injeção. Cada classe de pressão de injeção tem seu respectivo símbolo representado na legenda deste gráfico. A tabela informativa dos resultados referentes desta medição está na Tab. C.2, do Anexo C.

Figura 4.17 – Comportamento do comprimento de extinção do núcleo líquido em função da temperatura de injeção. São diferenciados os ensaios com pressão de injeção de 125 kPa e 250 kPa (bocal rugoso com 0,8 mm de diâmetro).

4.2.3 Dimensões Características da Estrutura da Onda de Choque – Série R08

A representação da tendência da dimensão radial da onda de choque, r_1 , e da distância axial em relação à saída do bocal, r_2 , desta série de ensaios, todos obtidos através de ensaios deste bocal de 0,8 mm, está mostrada no gráfico da Fig. 4.18. Conforme esperado, verifica-se que estas dimensões são maiores em pequenas pressões da câmara. As imagens principais dos ensaios desta série estão no Anexo C, Seção C.4, porém a tabela com os valores deste gráfico está na Seção C.3.

Figura 4.18 – Os comprimentos, r_1 (no primeiro gráfico) e r_2 são representados nos gráficos acima que contêm todos os ensaios da série R08 (bocal rugoso com 0,8 mm de diâmetro).

4.2.4 Considerações sobre o Regime Permanente da Série R08

Infelizmente, as vazões experimentais eram demasiadamente grandes por causa do diâmetro deste bocal. Neste ensaio (código V08\1056500) da Fig. 4.19, a temperatura, T_0 , sofre uma queda considerável, ou seja, alcança um valor de 50 °C para uma temperatura que inicialmente era de 56 °C. Esta diminuição da temperatura compromete a análise dos dados. Por exemplo, a pressão de saturação de 25 kPa cai para 20 kPa ou 20 % menos. Para que não haja desconsideração destes ensaios, foram coletados aqueles dados que estão dentro deste padrão de regime permanente, ou seja, com temperatura de injeção constante, como indicado nesta figura. Os outros dados como pressão de injeção, P_0 , pressão da câmara, P_∞ , e sinal do sensor de nível, dentro deste intervalo, tiveram o comportamento esperado, semelhante ao que foi visto na Fig. 3.10 da Seção 3.3.

Figura 4.19 – Gráfico dos dados coletados do ensaio com pressão de injeção de 125 kPa e temperatura de 56 °C (ensaio R08\1056500). A duração do regime permanente é indicada para o intervalo com temperatura de injeção constante.

4.3 Ensaaios com o Bocal de Vidro de 0,35 mm de Diâmetro na Saída – Série V03

O terceiro e último tipo de bocal foi feito de vidro, com formato cônico-convergente e seu diâmetro na saída de 0,35 mm. Diferente dos demais, este bocal possui os cantos arredondados na borda da saída do jato. Além disso, o vidro possui uma superfície bastante lisa, o que dificulta possíveis nucleações heterogêneas nas paredes internas do bocal. A Fig 4.20 mostra as condições iniciais de injeção dos ensaios com este bocal. Suas pressões de injeção foram 125, 250 e 500 kPa e as temperaturas de injeção foram de 56, 76, 95 e 120 °C. No detalhe desta figura é indicado um desenho ilustrativo deste bocal.

Figura 4.20 – Representação gráfica das condições de injeção e a pressão da câmara onde é descarregado o jato pelo bocal de vidro de 0,35 mm – Série V03. Um desenho do inserto de vidro é visto no detalhe da figura.

4.3.1 Resultados das Medidas das Vazões Mássicas – Série V03

Todos os ensaios realizados com este bocal estão com a pressão da câmara muito abaixo da pressão de saturação, com valores 20 vezes menores. Para uma visão geral, nesta seção são apresentados os valores da vazão em função da razão entre a pressão de injeção e pressão da câmara (Fig. 4.21 a 4.23). Os dados deste gráfico podem ser encontrados no Anexo C, Tab. C.4.

Figura 4.21 –Vazão mássica em função da razão da pressão da câmara e a pressão de injeção obtida dos ensaios com pressão de injeção de 125 kPa e bocal de vidro de diâmetro 0,35 mm.

Figura 4.22 –Vazão mássica em função da razão da pressão da câmara e a pressão de injeção obtida dos ensaios com pressão de injeção de 250 kPa e bocal de vidro de diâmetro 0,35 mm.

Figura 4.23 –Vazão mássica em função da razão da pressão da câmara e a pressão de injeção obtida dos ensaios com pressão de injeção de 500 kPa e bocal de vidro de diâmetro 0,35 mm.

4.3.2 Comprimento de Extinção do Núcleo Líquido – Série V03

No gráfico da Fig. 4.24, o comprimento de extinção do líquido, L_E , está representado em função da temperatura e pressão de injeção. Cada classe de pressão de injeção foi diferenciada pelos respectivos símbolos representados na legenda deste gráfico.

Figura 4.24 – Comportamento do comprimento de extinção do núcleo líquido em função da temperatura de injeção. São diferenciados os ensaios com pressão de injeção de 125, 250 e 500 kPa (bocal de vidro com 0,35 mm de diâmetro).

4.3.3 Dimensões Características da Estrutura da Onda de Choque – Série V03

Foram tomadas as principais medidas da onda de choque como a dimensão radial da onda de choque, r_1 , e a distância axial em relação à saída do bocal, r_2 . Os dados obtidos destas dimensões pelo bocal de vidro com 0,35 mm estão na Tab. C.6, do Anexo C. E as principais imagens adquiridas desta série estão na Seção C.8 do Anexo C. A seguir são apresentados os gráficos que mostram as principais dimensões medidas da onda de choque em função da pressão da câmara (Fig. 4.25 a 4.27).

Figura 4.25 – Os comprimentos, r_1 (no primeiro gráfico) e r_2 são representados nos gráficos acima que contêm os ensaios da série V03 (bocal de vidro com 0,35 mm de diâmetro) com pressão de injeção de 125 kPa.

Figura 4.26 – Os comprimentos, r_1 (no primeiro gráfico) e r_2 são representados nos gráficos acima que contêm os ensaios da série V03 (bocal de vidro com 0,35 mm de diâmetro) com pressão de injeção de 250 kPa.

Figura 4.27 – Os comprimentos, r_1 (no primeiro gráfico) e r_2 são representados nos gráficos acima que contêm os ensaios da série V03 (bocal de vidro com 0,35 mm de diâmetro) com pressão de injeção de 500 kPa.

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo contém duas seções. Nesta primeira seção, são discutidos e analisados os resultados obtidos pelo bocal de 0,3 mm com superfície rugosa. Primeiramente, é apresentada uma visão geral dos tipos de jatos encontrados, através das imagens obtidas. Em seguida, é mostrado o comportamento da vazão em função das condições de injeção e da pressão da câmara. A seguir se tem por objetivo mostrar com mais detalhes algumas peculiaridades que existem nos jatos em virtude das condições de injeção. São imagens ampliadas que são relacionadas com as observações feitas. Também é feita uma análise do comprimento do núcleo líquido em função da pressão e temperatura de injeção. Em seguida, em função das observações obtidas nas imagens dos jatos evaporativos, é feita uma análise descritiva do escoamento a jusante da onda de evaporação. E na seção seguinte, os resultados do bocal de aço de 0,8 mm de diâmetro e do bocal de vidro de 0,35 mm de diâmetro são analisados e comparados com o bocal de aço com 0,3 mm de diâmetro.

5.1 Análise e Discussão do Bocal de Aço com 0,3 mm de diâmetro

As Figs. 5.1 a 5.4 mostram uma seleção de fotografias que podem exemplificar os tipos de jatos obtidos. Cada figura possui imagens dos jatos para uma determinada temperatura (T_0) e pressão (P_0) de injeção, e em cada imagem existem tipos de jatos diferentes em função da pressão da câmara (P_∞), conseqüentemente, também é inferido o valor de R_p . As dimensões geométricas dos jatos foram obtidas através do diâmetro da plataforma do injetor que possui o valor de 50 mm, a qual é plenamente visível nas Figs. 5.1b e 5.3c.

A Fig. 5.1a mostra um primeiro tipo de jato que possui uma pressão de saturação menor que a pressão da câmara e, que não sofre fragmentação nem perturbações devido às condições ambientes. Quando a pressão da câmara se iguala à pressão de saturação do fluido, é possível notar uma evaporação superficial no filete líquido do jato (Fig. 5.1b).

No segundo tipo de jato, existe uma evaporação com dispersão de gotículas e pode ser visto nas Figs. (5.1c), (5.2a), (5.2b), (5.3a), (5.3b), (5.4a) e (5.4b). São ensaios que a pressão de saturação é maior que a pressão da câmara compreendendo valores de R_p entre 2 e 10, dependendo da pressão e temperatura de injeção, como será visto na subseção seguinte. Com valores nominais de R_p acima de 50, é observada a formação de ondas de choque. Alguns jatos já apresentam a formação do núcleo de líquido e, portanto, possuem uma onda de evaporação uniforme deste núcleo (Fig. 5.1c). Os outros jatos deste tipo, a onda de evaporação não apresenta uniformidade, mostrando um jato sem uma direção definida do núcleo de líquido (Fig. 5.2a e 5.2b).

Neste terceiro tipo, o fluido no estado líquido emerge do bocal com um núcleo de líquido mais definido e corresponde à região totalmente escura, localizada na saída do bocal. A expansão supersônica resulta em uma onda de choque, e pode ser vista nas Figs. (5.1d) e (5.1e), (5.2d) e (5.2e), (5.3c), (5.3d), (5.3e), (5.4d) e (5.4e). Nas Figs. (5.2c) e (5.4c), não é possível visualizar a onda de choque porque, provavelmente, ela se forme muito próxima do núcleo de líquido. Quando as ondas de choque de dimensões estão mais afastadas do núcleo de líquido, a sua visualização é mais nítida. Isto mostra que na região de expansão supersônica existe uma evaporação do fluido tornando claro os detalhes das imagens. Em contraposição, nos jatos que apenas há dispersão de gotículas em virtude da evaporação, com baixos valores de R_p , é difícil a visualização do núcleo de líquido. Geralmente, os jatos com baixas temperaturas de injeção que possuem a onda de choque visível têm valores de R_p maiores que 50. Altas temperaturas, ou seja, acima de 120 °C, possuem a onda de choque visível com R_p maior que 200. E quanto menor é a pressão da câmara, maiores são as dimensões da onda de choque formada. Como exemplo, o caso das Figs. 5.1d e 5.1e mostram a evolução da onda de choque em virtude da pressão da câmara. Da primeira imagem (Fig. 5.1d) o raio da onda está próximo do núcleo de líquido (5,7 mm), e na distância axial, a onda de choque situa na mesma distância do núcleo de líquido (5,2 mm). Na imagem seguinte (Fig. 5.1e), o raio aumentou para 18 mm e a distância axial da onda de choque também aumentou para 13 mm devido a queda da pressão da câmara. Para este tipo de jato, basta saber se o núcleo de líquido se modifica, algo que será visto na Seção 5.1.6.

Figura 5.1 - Alguns ensaios de valores de injeção nominais $P_0 = 250$ kPa e $T_0 = 76$ °C ($P_{\text{sat}} = 54$ kPa).

Figura 5.2 - Alguns ensaios de valores de injeção nominais $P_0 = 250$ kPa e $T_0 = 130$ °C ($P_{\text{sat}} = 220$ kPa).

Figura 5.3 - Alguns ensaios de valores de injeção nominais $P_0 = 500$ kPa e $T_0 = 130$ °C ($P_{\text{sat}} = 220$ kPa).

Figura 5.4 - Alguns ensaios de valores de injeção nominais $P_0 = 500$ kPa e $T_0 = 162$ °C ($P_{\text{sat}} = 440$ kPa).

5.1.1 A Condição de Máxima Vazão

Mantendo constantes a pressão e a temperatura de injeção e apenas variando a pressão da câmara, obtém-se um comportamento geral da vazão como aquele ilustrado na Fig. 5.5. Os pontos indicados são aos dados experimentais coletados nesta condição de pressão e temperatura de injeção, mostrado na legenda. A curva de descarga do bocal é obtida pela Eq. 4.2 que admite um comportamento incompressível na região interna do bocal. Esta equação utiliza a pressão da câmara como a pressão do líquido na saída do bocal. Nota-se que a curva de descarga do bocal é apresentada apenas como referência geral, uma vez que os experimentos indicaram fenômenos compressíveis complexos na saída do bocal fazendo com que na seção de saída do mesmo, a pressão esteja longe de ser a pressão da câmara onde o jato é descarregado.

Conforme é visto no gráfico, a curva de vazão de descarga do bocal, alcança um maior patamar de vazão. Porém, os ensaios indicaram que a vazão é bloqueada em um outro patamar, menor que o anterior. No entanto, os dados experimentais coincidem com a curva quando a pressão da câmara é maior que a metade da pressão de saturação, conforme a Fig. 5.5.

Necessariamente, o valor da pressão da câmara cuja vazão é máxima é encontrado graficamente através da média das vazões de ensaios bloqueados. Por exemplo, no gráfico da Fig. 5.5, a média da vazão máxima experimental foi de 1,131 g/s. Através deste valor médio experimental e da Eq. 4.4, que admite que o fluido é incompressível na expansão do bocal, é possível determinar a máxima pressão da câmara que proporciona esta máxima vazão. Neste exemplo, a pressão é de 37 kPa. Geralmente, esta pressão se encontra abaixo da pressão de saturação do líquido e, portanto, é metaestável. Para cada série de ensaio com uma pressão e temperatura de injeção, foi obtida uma máxima vazão, ou vazão crítica, semelhante a este gráfico que possui uma temperatura de 95°C e uma pressão de 250 kPa de injeção. Em outras condições de injeção, gráficos similares foram apresentados na Seção 4.1. Uma média da pressão metaestável através da condição de bloqueagem da vazão é vista na Tab. 5.1.

Figura 5.5 – Caso típico de um comportamento da vazão. Os pontos correspondem aos ensaios realizados a uma pressão e temperatura de injeção de 250 kPa e 95 °C, respectivamente. A linha vertical contínua se refere à pressão de vapor de 90 kPa a outra linha contínua corresponde à vazão mássica estimada através da Eq. 4.3.

A Tab. 5.1 apresenta os dados médios das categorias de ensaios, ou seja, para cada condição inicial de injeção, existe um valor médio da vazão máxima e da pressão metaestável. Através dos valores desta tabela como: a razão entre pressão de saturação e pressão de injeção, razão entre pressão de saturação e pressão metaestável do líquido e o grau de metaestabilidade, são obtidos os gráficos das Figs. 5.6 a 5.8. A primeiro gráfico (Fig. 5.6) mostra a pressão metaestável alcançada pelo líquido em função da pressão e temperatura de injeção. O gráfico da Fig. 5.7 ilustra o comportamento do grau de metaestabilidade em função da pressão de injeção. Nele se verifica que pressões mais baixas têm a tendência de alcançar maiores graus de metaestabilidade do líquido, ou seja, a pressão metaestável é bem menor que a pressão de saturação, como também visto no gráfico da Fig. 5.6. Como exemplo, a injeção de líquido a 56 °C, para uma pressão de 125 kPa, assume graus de

metaestabilidade próximo de 0,8, enquanto, a uma pressão de 750 kPa, a metaestabilidade alcançada é de 0,2. O gráfico da Fig. 5.8 mostra curvas referentes à pressão de injeção. Nele, quando se aumenta a temperatura de injeção, ou seja, a pressão de saturação se aproxima da pressão de injeção, a tendência de R_p é diminuir. Este parâmetro, quando sofre um decréscimo, conseqüentemente, proporciona uma diminuição do grau de metaestabilidade, conforme indicado na Tab. 5.1. Este gráfico da Fig. 5.8 também é bastante representativo quando se tem por objetivo saber qual é o mínimo valor de R_p para alcançar a vazão crítica.

Figura 5.6 – Gráfico que mostra as condições de injeção dos ensaios feitos para o bocal de aço com 0,3 mm de diâmetro (R03) e a pressão metaestável alcançada pelo ensaio.

Um exemplo de como foram calculados os dados da Tab. 5.1, está mostrado na Tab. 5.2. Esta tabela mostra a média obtida da vazão e o desvio padrão da amostra multiplicado por 2. A Tab. 5.3 faz uma comparação do valor de $2\sigma_{P1}$ com a faixa de incerteza calculada (U_{P1}), conforme Apêndice I. Na tabela, verifica-se que o desvio da amostra, $2\sigma_{P1}$, aumenta a medida que a pressão de saturação se aproxima da pressão de injeção, assumindo um valor maior que a incerteza estimada (U_{P1}), e que veio a ser inesperado.

Tabela 5.1 – Em função das categorias das condições de injeção, P_{inj} e T_{inj} , respectivamente, são mostrados a média da pressão de saturação, a pressão metaestável média das categorias de ensaio e seu desvio, vazão superficial mássica e as razões entre a pressão de saturação e a pressão de injeção, assim como, a pressão de saturação e a pressão metaestável do líquido. Finalmente, é apresentado o grau de metaestabilidade médio alcançado em cada série de experimentos. O desvio de $2\sigma_{P1m}$ é duas vezes o desvio padrão da amostra coletada de cada categoria de ensaio.

P_{inj} (kPa)	T_{inj} (°C)	P_{0m} (kPa)	T_{0m} (°C)	$P_{sat}(T_{0m})$ (kPa)	P_{1m} (kPa)	$2\sigma_{P1}$ (kPa)	J_{bm} (kg/m ² .s)	P_{sat}/P_{0m}	P_{sat}/P_{1m}	Π_m
125	56	122,1	56,5	27,1	4,6	0,9	11177	0,222	5,841	0,829
125	76	125,1	76,1	50,5	8,9	6,7	11086	0,403	5,641	0,823
125	95	124,3	94,1	87,4	12,9	5,0	10863	0,703	6,750	0,852
250	56	252,1	56,6	27,7	8,6	1,4	16331	0,110	3,214	0,689
250	76	250,6	76,3	51,3	16,0	17,6	15931	0,205	3,199	0,687
250	95	250,4	94,9	89,5	36,3	9,5	15110	0,357	2,463	0,594
250	120	251,0	120,2	176,7	97,5	33,8	12584	0,704	1,812	0,448
250	131	255,5	129,7	222,6	133,0	43,9	11105	0,871	1,674	0,403
500	56	501,2	56,5	27,2	13,9	4,2	23392	0,054	1,959	0,490
500	76	498,6	76,6	51,5	30,8	1,0	22755	0,103	1,672	0,402
500	95	501,6	95,3	90,5	49,6	35,4	22176	0,181	1,825	0,452
500	120	493,9	121,8	183,8	128,3	29,5	19663	0,372	1,433	0,302
500	131	501,3	131,4	231,3	166,9	39,5	18669	0,461	1,385	0,278
500	162	510,4	161,5	442,1	334,8	41,9	13442	0,866	1,321	0,243
750	56	751,3	56,3	26,8	21,5	20,5	28744	0,036	1,249	0,199
750	76	751,4	76,8	51,1	42,7	14,2	28111	0,068	1,198	0,165
750	95	751,2	95,9	92,1	77,3	21,1	27044	0,123	1,191	0,161
750	120	751,8	121,0	180,3	167,0	9,1	24969	0,240	1,080	0,074
750	131	751,3	131,8	233,7	221,5	8,7	23654	0,311	1,055	0,052
750	162	748,6	161,6	443,7	416,4	17,2	18178	0,593	1,066	0,062
750	178	753,6	177,9	607,4	545,3	32,4	14044	0,806	1,114	0,102

* o índice “m” significa média dos ensaios.

Tabela 5.2 – Determinação dos dados médios obtidos, sob a condição de máxima vazão, exemplificada para a categoria com $P_{inj}=750$ kPa e $T_{inj}=162^{\circ}\text{C}$.

Ensaio	P_0 (kPa)	T_0 ($^{\circ}\text{C}$)	$P_{sat}(T_0)$ (kPa)	$\dot{m}$ (kPa)	P_1 (kPa)
run3\7435m20	749,2	161,8	445,1	0,0013746	409,20
run3\7435m10	747,7	161,3	440,7	0,0013720	409,37
run3\7435500	749,5	161,7	444,3	0,0013561	418,54
run3\7435100	749,3	161,8	445,1	0,0013635	414,71
run3\7435010	747,4	161,6	443,4	0,0013277	430,05
<i>média</i>	<i>748,6</i>	<i>161,6</i>	<i>443,7</i>	<i>0,0013588</i>	<i>416,37</i>
<i>desvio padrão</i>	<i>0,988</i>	<i>0,207</i>	<i>1,821</i>	<i>0,0000189</i>	<i>8,59</i>

Tabela 5.3 – Em função das categorias das condições de injeção, P_{inj} e T_{inj} , estão os valores do desvio da amostra e das incertezas de P_{1m} (U_{P1}). Esta última incerteza depende da vazão medida e é calculada conforme deduzida no Apêndice I.

P_{inj} (kPa)	T_{inj} ($^{\circ}\text{C}$)	P_{0m} (kPa)	P_{1m} (kPa)	$2\sigma_{P1}$ (kPa)	U_{P1} (kPa)
125	56	122,1	4,6	0,9	5,4
125	76	125,1	8,9	6,7	5,4
125	95	124,3	12,9	5,0	5,2
250	56	252,1	8,6	1,4	10,7
250	76	250,6	16,0	17,6	10,3
250	95	250,4	36,3	9,5	9,4
250	120	251,0	97,5	33,8	6,9
250	131	255,5	133,0	43,9	5,6
500	56	501,2	13,9	4,2	21,0
500	76	498,6	30,8	1,0	20,2
500	95	501,6	49,6	35,4	19,5
500	120	493,9	128,3	29,5	15,9
500	131	501,3	166,9	39,5	14,5
500	162	510,4	334,8	41,9	7,8
750	56	751,3	21,5	20,5	31,4
750	76	751,4	42,7	14,2	30,5
750	95	751,2	77,3	21,1	29,0
750	120	751,8	167,0	9,1	25,2
750	131	751,3	221,5	8,7	22,9
750	162	748,6	416,4	17,2	14,4
750	178	753,6	545,3	32,4	9,2

Figura 5.7 – Gráfico que mostra o grau de metaestabilidade em função da pressão de injeção.

Figura 5.8 – Gráfico que mostra a razão de pressões (R_p) em função da razão entre a pressão de saturação e de injeção. Dependendo da pressão de injeção, ensaios acima da curva possuem a condição de máxima vazão.

5.1.2 Jatos com pressão de saturação abaixo ou próxima da pressão da câmara

Nesta subseção discutem-se os resultados dos jatos que foram descarregados na câmara sob uma pressão pouco abaixo e próxima da pressão de saturação. A simples observação do jato condiz para um jato sem fragmentações. Pelo método “Schlieren”, quando o jato está com sua pressão de saturação abaixo da pressão da câmara ($R_p < 1$) é quase imperceptível a evaporação, no entanto, quando a pressão de saturação vem se igualando com a pressão da câmara ($R_p \sim 1$) existe uma pequena evaporação ao longo do filete do jato. As Figs. 5.9 , 5.10a e 5.10b retratam este quadro.

Figura 5.9 – Jato com pressão e temperatura de injeção de 250 kPa e 95 °C. A pressão da câmara é de 174 kPa e a razão entre as pressões de saturação e câmara é de 0,5 (método “Schlieren”).

Figura 5.10 – Jato com pressão e temperatura de injeção de 250 kPa e 95 °C. A pressão da câmara é de 90 kPa e a razão entre as pressões de saturação e câmara é igual a 1. A primeira imagem foi adquirida pela câmara CCD que utiliza o recurso de “iluminação por detrás” e a segunda imagem, referente ao mesmo jato, foi obtida pelo método “Schlieren”.

Mesmo quando a pressão da câmara está abaixo da pressão de saturação, porém a pressão da câmara está com um valor acima daquela pressão metaestável encontrada em cada série de experimentos mostradas na Tab. 5.1 (ou seja, $P_{\text{sat}} > P_{\infty} > P_{1m}$), o jato ainda apresenta um filete contínuo. Como exemplo, a Fig. 5.11 apresenta imagens de um jato que teve a diminuição da pressão da câmara pela metade do valor da pressão de saturação ($R_P \sim 2$), na mesma temperatura (95 °C) indicada na Fig. 5.10. A pressão de injeção foi reduzida pela metade (125 kPa). Aqui, a vazão ainda não alcançou a vazão máxima, pois conforme é visto na Tab. 5.1, a pressão da câmara deveria ser menor que 14,7 kPa ($R_P = 5,94$) para alcançar a máxima vazão, com esta pressão e temperatura de injeção.

Novamente, existe grande semelhança do jato quando comparado às imagens da Fig. 5.10, mais precisamente pelo método “Schlieren”. A imagem da Fig. 5.11a mostra um jato aparentemente descontínuo em seu filete em virtude do líquido ser transparente e, às vezes, seu filete funciona como uma lente que pode desviar a luz em função de pequenas variações no diâmetro do jato. O detalhe no canto superior esquerdo da Fig. 5.11a mostra que, de fato, o jato é contínuo. O detalhe da imagem foi possível de ser obtido com a amplificação do sinal da imagem original, feita matematicamente. Os círculos brancos deste detalhe são pequenas gotículas que estavam caindo e, por estarem fora do foco principal que é o plano axial do jato, opticamente tiveram o tamanho ampliado. A imagem “Schlieren” correspondente está na Fig. 5.11b.

Figura 5.11 – Jato com pressão e temperatura de injeção de 124 kPa e 93 °C. A pressão da câmara é de 44 kPa ($R_p = 1,9$). A primeira imagem foi adquirida pela câmara CCD que utiliza o recurso de “iluminação por detrás” e a segunda imagem, referente ao mesmo jato, foi obtida pelo método “Schlieren”. O detalhe da primeira imagem comprova a continuidade do filete do jato.

5.1.3 Jatos no limiar da condição de blocagem

Aqui são destacados os três ensaios cujo valor da pressão da câmara coincidiu, com o valor da pressão metaestável, aproximadamente, cuja vazão corresponde à vazão máxima. São os ensaios: 2368002, 7368001 e 2393002. Como observação, no primeiro e terceiro ensaios, apenas existem imagens obtidas pelo “Schlieren”.

A Fig. 5.12 ilustra um jato nestas condições. A pressão de injeção é de 250 kPa, a temperatura de injeção é de 95 °C e a pressão da câmara é de 45 kPa ($R_P=2$).

Figura 5.12 – Ensaio 2368002: Jato com pressão e temperatura de injeção de 250,3 kPa e 95,3 °C. A pressão da câmara é de 45 kPa ($R_P = 2,0$). Imagem obtida pelo método “Schlieren”.

O segundo ensaio (Fig. 5.13) tem a mesma temperatura de injeção do ensaio anterior e sua pressão de injeção é três vezes maior (750 kPa). Logo, a pressão metaestável do líquido na condição de máxima vazão é de 77,3 kPa, pela Tab. 5.1. A pressão da câmara deste ensaio está próxima da pressão metaestável do líquido com valor igual a 93,3 kPa ($R_p = 1$).

Já o último caso (Fig. 5.14), mostrou uma singularidade que nenhum outro ensaio registrou com tamanha nitidez. Nele houve nucleações ao longo do jato. Suas condições de injeção eram de 250 kPa e 120 °C. Pela Tab. 5.1, a pressão metaestável para a máxima vazão deve ser de 97,5. A pressão da câmara está um pouco abaixo desta, com valor igual a 89,9 kPa. Kurschat e outros (1992) observaram esta ocorrência de nucleação, no meio do filete do jato quebrando sua continuidade, em pequenos valores de R_p . Wildgen e Straub (1989) justificaram que tal fato ocorrido nos seus ensaios foi promovido pela presença de algum elemento particulado ou gás diluído no líquido. Porém, ensaios nestas mesmas condições de injeção e pressões da câmara bem abaixo desta (90 kPa), não apresentaram descontinuidades ou ausência de simetria do núcleo de líquido, como será visto na Seção 5.1.6. Em virtude da ausência destas irregularidades nos resultados aqui apresentados, não é possível afirmar que a nucleação realmente iniciou no interior do bocal.

Figura 5.13 – Ensaio 7368001: jato com pressão e temperatura de injeção de 750 kPa e 95 °C. A pressão da câmara é de 93,3 kPa e a razão entre as pressões de saturação e câmara é igual a 1. A primeira imagem foi adquirida pela câmara CCD que utiliza o recurso de “iluminação por detrás” e a segunda imagem, referente ao mesmo jato, foi obtida pelo método “Schlieren”.

Figura 5.14 – Ensaio 2393002: jato com pressão e temperatura de injeção de 250 kPa e 120 °C. A pressão da câmara é de 89,9 kPa e a razão entre as pressões de saturação e câmara é igual a 1,9. Imagem obtida pelo método “Schlieren”.

Comparando esta seção, é verificado que estes jatos possuem um perfil muito semelhante com aqueles resultados encontrados na seção anterior. Os ensaios 2368002 e 7368001 não registraram, de forma nítida, a ocorrência de alguma nucleação ao longo do filete do jato, conforme bem ilustrado na Fig. 5.14.

5.1.4 Jatos com vazão bloqueada sem a visualização da onda de choque

Esta seção compreende os jatos cuja pressão da câmara é menor que aquela pressão metaestável indicada pela na Tab. 5.1, logo, a vazão está na condição máxima. Porém aqui ainda não se observa a formação da onda de choque.

Inicialmente serão mostrados dois ensaios: 7349005 e 2349005. Ambos tem temperatura de injeção igual a 76 °C e sua pressões de injeção são de 750 e 250 kPa,

respectivamente. O primeiro caso ilustra um jato mais fragmentado (Fig. 5.15). Devido à evaporação formada na periferia da parte líquida do jato, gotículas se desprendem aumentando o ângulo de espalhamento do jato. A formação de um núcleo de líquido, que é realmente visível, é mostrada no segundo caso (Fig. 5.16). O grau de metaestabilidade alcançado pelo líquido neste ensaio (2349005) é maior que o primeiro caso, conseqüentemente, a taxa de evaporação se torna maior, e deve ser por isso que o núcleo de líquido assumiu melhor nitidez.

Figura 5.15 – Ensaio 7349002: jato com pressão e temperatura de injeção de 750 kPa e 76 °C. A pressão da câmara é de 24,9 kPa e a razão entre as pressões de saturação e câmara é igual a 2,0. Imagem obtida pelo método “Schlieren”. No canto superior esquerdo, na mesma escala de tamanho, a imagem obtida pelo método de “iluminação por detrás”. Este retrata uma grande dispersão de gotículas.

Figura 5.16 – Ensaio 2349005: jato com pressão e temperatura de injeção de 250 kPa e 76 °C. A pressão da câmara é de 10,1 kPa e a razão entre as pressões de saturação e câmara é igual a 5,1. Imagem obtida pelo método “Schlieren”.

Quando a pressão de saturação está próxima da pressão de injeção, para pequenos valores de R_p , da ordem de 2 a 10, é possível observar uma instabilidade do núcleo de líquido. Necessariamente, seria um estágio anterior à formação do núcleo de líquido, propriamente dito, pois os ensaios das Figs. 5.17 e 5.18 mostram um jato que não apresenta simetria. Provavelmente, isto se deve à onda de evaporação que ainda não apresenta uma uniformidade em toda superfície do núcleo. Este formato assimétrico poderia oferecer a errônea conclusão que havia uma singularidade na seção de saída do bocal, porém esta hipótese é descartada em função do registro fotográfico destes dois diferentes ensaios que mostram que não há uma preferência da direção do jato (Figs. 5.17 e 5.18). Complementando a descrição destas duas figuras, tanto o destaque (jato no canto superior esquerdo) como a imagem principal foram adquiridas em um único ensaio em instantes diferentes, com um intervalo de 0,5 s.

Figura 5.17 – Ensaio 2404005: jato com pressão e temperatura de injeção de 250 kPa e 131 °C. A pressão da câmara é de 43,7 kPa e a razão entre as pressões de saturação e câmara é igual a 5,1. Imagem obtida pelo método “Schlieren”. O destaque foi obtido em 0,5 s após adquirir a fotografia principal.

Figura 5.18 – Ensaio 2404010: jato com pressão e temperatura de injeção de 250 kPa e 131 °C. A pressão da câmara é de 24,0 kPa e a razão entre as pressões de saturação e câmara é igual a 9,5. Imagem obtida pelo método “Schlieren”. A imagem menor no detalhe foi obtida em 0,5 s após esta fotografia principal.

5.1.5 *Jatos bloqueados com a visualização da onda de choque*

Todos os ensaios aqui estudados, que apresentaram onda de choque, necessariamente já estavam na condição de bloqueado. Nestes casos, também foi possível verificar que o núcleo de líquido tem uma forma regular e estável. Neste estágio, por mais que se diminua a pressão da câmara, não existe variação do comprimento do núcleo líquido. Isto será melhor analisado na seção seguinte. Contudo, à medida que a razão de pressões R_p aumenta, ou seja, diminui-se a pressão da câmara, as dimensões características da onda de choque são os únicos parâmetros que se alteram. A vazão mássica e, conseqüentemente, a pressão metaestável do líquido de cada ensaio continuava sem variação significativa.

Em temperaturas de injeção menores, é possível observar a formação da onda de choque com valores mínimos de R_p por volta de 50. No caso de uma temperatura mais alta, para se observar uma onda de choque, este parâmetro deve aumentar para um valor da ordem de 100. Como exemplo, a Fig. 5.19 mostra um jato com temperatura de injeção de 76 °C enquanto a Fig. 5.20 mostra um jato com temperatura de 135 °C. Ambas possuem razões de pressão de saturação e da câmara de 50 e 100, respectivamente. No segundo caso, a onda de choque formada quase se confunde com a neblina que está ao redor dela, em função de seu pequeno tamanho. O caso da Fig. 5.4c também se assemelha a este fato. O tamanho do núcleo de líquido também diminuiu, mas este comportamento será melhor relatado na seção seguinte.

Figura 5.19 – Ensaio 7349050: jato com pressão e temperatura de injeção de 749,2 kPa e 76,8 °C. A pressão da câmara é de 1,0 kPa e a razão entre as pressões de saturação e câmara é igual a 51,3. Imagem obtida pelo método “Schlieren”. O destaque se refere à imagem obtida pelo outro método, na mesma escala.

Figura 5.20 – Ensaio 7435100: jato com pressão e temperatura de injeção de 749,3 kPa e 161,8 °C. A pressão da câmara é de 4,6 kPa e a razão entre as pressões de saturação e câmara é igual a 96,8. Imagem obtida pelo método “Schlieren”. O destaque se refere a imagem obtida pelo outro método, na mesma escala.

Figura 5.21 – Jato com pressão e temperatura de injeção de 744 kPa e 132,1 °C. A pressão da câmara é de 0,10 kPa. A primeira imagem foi uma filtragem da imagem original obtida pelo método “Schlieren” que está no canto superior esquerdo dela, assim como, a fotografia obtida pela iluminação por detrás está no outro canto. Neste pequeno quadro a lâmina está projetada atrás do jato e por isso não é visível. A segunda imagem também é outra filtragem do original com um mapa de cores diferente (“prism”).

Antes de se aprofundar no assunto, é importante mostrar mais uma prova de que o fenômeno visto nestes jatos é realmente uma onda de choque. Para isto, um obstáculo na região onde ocorre o escoamento supersônico foi inserido (parte de uma lâmina de barbear). No lado esquerdo do jato, da Fig.5.21a, a onda de choque não sofre deformação alguma, enquanto, do outro lado, a presença da lâmina induz a deformação da onda de choque. Toda a região envolvida pela onda de choque, próximo do núcleo de líquido, tem mantido o perfil simétrico de escoamento (Fig. 5.21b). Como o escoamento é supersônico nesta região, os campos de velocidades e de pressões não sofrem influência da presença do obstáculo, até alcançar a onda de choque.

A onda de choque não deve ser entendida simplesmente como sendo normal ao escoamento. Ela se projeta de forma mais complexa. Como estudo de caso, o ensaio 5435m10c possui imagens que podem exemplificar o escoamento a jusante da onda de evaporação. Na Fig. 5.22a é colocada uma imagem original do ensaio. Já nas Fig. 5.22b e 5.22c são vistas imagens tratadas por um filtro matemático do tipo subtrativo que permitiu um melhor contraste do fenômeno. Verificando a variação de intensidade da imagem em função do eixo horizontal, tem-se, como consequência, a imagem mostrada na Fig. 5.22d que possui algumas características realçadas do jato, como o núcleo de líquido (devido ao salto abrupto de densidades destacado pelo método “Schlieren”) e a onda de choque. Nessa interface, o líquido é transformado em uma mistura bifásica com alta velocidade. Essa mistura se expande livremente e termina com a formação de uma onda de choque, para se equalizar com a pressão da câmara ao longe.

Focalizando o escoamento que principia na região periférica ao núcleo de líquido, e tomando como exemplo a Fig. 5.22b, verifica-se que o formato cônico (região do escoamento com tonalidade amarela) provém de um escoamento de maior densidade, pois na fotografia original, Fig. 5.22a, esta mesma região possui uma tonalidade mais escura. A onda de choque, em forma de calota, que envolve este escoamento mais denso pode ser caracterizada como uma onda de choque quase normal, na parte frontal do jato. Observando a segunda formação de onda de choque, que está próxima à parede externa do bocal, que é perpendicular ao eixo axial do jato em sua saída, pode se concluir que é uma onda de choque de caráter oblíquo. E no

encontro destas duas, existe uma terceira onda de choque, de caráter reflexivo.

Este escoamento mais denso, de formato cônico em tom amarelo, conforme a Fig. 5.22b, deve arrastar as gotículas que, quando se afastam do bocal, sofrem uma queda de temperatura (Peter e outros, 1994) e, conseqüentemente, essas gotículas podem traspassar pela onda de choque sem sofrerem uma desaceleração significativa em função do arraste aerodinâmico. Este fato também é corroborado pela Fig. 5.21b. A partir do ponto em que a lâmina bloqueia o fluxo, duas regiões de tonalidades diferentes passam a existir com maior nitidez. A faixa limite que divide a região predominantemente vermelha da região com tonalidades de azul, amarelo e verde, possui sua direção coincidente com a origem do jato líquido. A primeira região não contém um escoamento de gotículas devido ao bloqueio da lâmina, apenas a outra. Porém, alguns ensaios que possuíam a calota da onda de choque um pouco mais afastada da saída do bocal (diferente do ensaio da Fig.5.22), mostraram que também pode haver outras ondas de choque reflexivas. Geralmente, são ensaios com pressões de injeção maiores e temperaturas mais baixas.

Figura 5.22 – A primeira corresponde à imagem original do jato do ensaio 5435m10c. Em seguida, são imagens filtradas e processadas matematicamente da original onde as imagens *b* e *c* foram submetidas a um filtro subtrativo que realça o campo de densidade do escoamento enquanto que, a quarta, foi processada para destacar o núcleo líquido e as ondas de choque. A última imagem se refere à fotografia obtida pelo método de iluminação por detrás.

A seguir são apresentadas quatro imagens do ensaio 5349500 (Figs. 5.23 e 5.24). Suas condições de injeção eram de 497,6 kPa, 76,9 °C e a pressão da câmara era de 0,09 kPa. A primeira imagem foi obtida através do “Schlieren” (Fig. 5.23a), a segunda pelo método de iluminação por detrás (Fig. 5.23b). As outras duas (Figs. 5.24a e 5.24b) são aquelas filtradas da fotografia da Fig. 5.23a. Na Fig. 5.24b, duas ondas reflexivas são vistas. Talvez isto deva acontecer quando, na extremidade radial da calota, o escoamento forme uma onda de choque com um caráter mais oblíquo. Entretanto na região entre estas duas ondas de choque reflexivas, a montante da onda de choque, o escoamento deve ser predominantemente radial ao eixo do jato, formando uma onda de choque normal a este escoamento. Esta hipótese está embasada na simulação bidimensional de Edvaldo (2004) cujo resultado está mostrado na Fig. 2.13. Nesta simulação, se observa a linha de corrente na trajetória radial, praticamente, cruzando perpendicularmente a onda de choque. Resumidamente, o encontro destas duas ondas de choque forma esta onda de choque reflexiva. Para explicar a segunda onda de choque reflexiva, que está abaixo da anterior, a hipótese aqui feita possui a mesma analogia. A onda de choque próxima do bocal de caráter oblíquo se encontra com esta onda de choque quase normal, que fica entre as duas ondas de choque reflexivas. Este encontro resulta nesta segunda onda de choque reflexiva.

Como observação, quando a onda de choque está próxima do núcleo líquido, com diâmetros menores que 15 mm, aproximadamente, como exemplificado na Fig. 5.19, mal é possível observar ondas de choque reflexivas. Neste caso, o escoamento deve alcançar uma velocidade supersônica menor, portanto a velocidade a jusante da onda podem assumir uma velocidade menos contrastante que a supersônica, ou mesmo, sua velocidade se torna subsônica.

Na Fig. 5.23a, é verificada, após a onda de evaporação, uma grande variação da densidade do fluido, mas após passar pela onda de choque, esta variação se apresenta de forma mais amena. A Fig. 5.23b mostra uma idéia da trajetória do escoamento imediatamente a jusante da onda de evaporação. Próximas do núcleo líquido, pequenas gotículas desenharam um traçado que parece caminhar de forma perpendicular à região central da onda de choque superior que assume formato de calota.

Figura 5.23 – Imagens originais do jato do ensaio 5349500, com condições de injeção de 497,6 kPa, 76,9 °C e a pressão da câmara de 0,09 kPa. A primeira obtida pelo método “Schlieren” e a outra pela “Iluminação por detrás”.

Figura 5.24 – Imagens filtradas do jato do ensaio 5349500 da Fig. 5.23a.

5.1.6 Análise de Comprimento de Extinção do Líquido

Na seção anterior, foi visto que o núcleo de líquido é visualizável em ensaios com máxima vazão. É mais nítida sua presença quando existe a onda de choque, porém ela pode ser vista em estágios em que a pressão da câmara não é suficientemente baixa para destacar a presença da onda de choque porque a mesma pode estar muito próxima do núcleo líquido (Fig.5.16). A partir deste ponto, diminuindo a pressão da câmara é possível verificar que o núcleo de líquido assume uma forma regular e estável. E, por mais que se diminua a pressão da câmara, não existe variação do comprimento do núcleo líquido. A série de ensaios com pressão e temperatura de injeção com 500 kPa e 56 °C é um exemplo típico e está mostrada na Tab. 5.4 e retratada na Figs. 5.25 a 5.27. Nelas, sob a técnica de “iluminação por detrás”, os núcleos líquidos ficam iluminados e, em sua adjacência, o arrasto de pequenas gotículas é observado. A jusante da onda de evaporação, as gotículas registram um desvio angular do escoamento, em relação ao eixo axial.

Tabela 5.4 – Representação do comprimento do núcleo líquido, L_E , para a série de ensaios com pressão e temperatura de injeção de 500 kPa e 56 °C, respectivamente.

P_{inj} (kPa)	T_{inj} (°C)	P_{∞} (kPa)	$R_P = P_{sat} / P_{\infty}$	L_E (+/- 0,5 mm)
500	56	0,15	500	12,3
500	56	0,20	100	11,6
500	56	0,54	50	11,2
500	56	2,53	10 *	11,0

* Obs.: Neste ensaio não foi observada a onda de choque. Porém isto não quer dizer que ela não exista, pois a sua formação pode estar tão próxima do núcleo líquido que dificultaria a sua visualização.

Figura 5.25 – Imagens originais do jato do ensaio 5329050, com condições de injeção de 501,6 kPa, 56,6 °C e a pressão da câmara de 0,50 kPa. A primeira obtida pelo método “Schlieren” e a outra pela “Iluminação por detrás”.

Figura 5.26 – Imagens originais do jato do ensaio 5329100, com condições de injeção de 501,6 kPa, 56,6 °C e a pressão da câmara de 0,31 kPa. A primeira obtida pelo método “Schlieren” e a outra pela “Iluminação por detrás”.

Figura 5.27 – Imagens originais do jato do ensaio 5329500, com condições de injeção de 504,1 kPa, 57,1 °C e a pressão da câmara de 0,12 kPa. A primeira obtida pelo método “Schlieren” e a outra pela “Iluminação por detrás”.

Figura 5.28 – Comparação do comprimento de extinção do núcleo líquido, L_E , em função da razão da pressão de saturação e de injeção. Uma curva de ajuste para estes dados pode ser escrita através da seguinte equação: $L_E = 2,04.(P_{sat}/P_0)^{-0,6}$. O destaque no gráfico se refere à diferença de comprimento esperada nestes ensaios.

Também foi encontrada uma correlação empírica do comprimento do núcleo líquido em função da razão entre a pressão de saturação e a de injeção, que está mostrada no gráfico da Fig. 5.28. Isto proporcionou uma condensação dos pontos experimentais apresentados no gráfico da Fig. 4.7. Esta não é ainda uma análise conclusiva, mas oferece uma idéia da contribuição da razão das pressões de saturação e de injeção para o fenômeno. Dentro disso, pode-se observar que existe a tendência de diminuir o comprimento de extinção do líquido quando se aumenta a temperatura de injeção, ou seja, aumenta a pressão de saturação do líquido injetado. No entanto, se a temperatura de injeção se mantiver constante, aumentando a pressão de injeção, a tendência do comprimento de extinção de líquido é de aumentar também.

Tomando como exemplo os ensaios 1329050 e 1329500 que possuem pequenas velocidades e, conseqüentemente, um baixo número de Reynolds, com valores médios de 14 m/s e 10^4 , respectivamente, apresentam em suas imagens o atraso da formação da onda de evaporação, nitidamente observado nas Figs. 5.29 e 5.30. É também interessante conferir no gráfico da Fig. 5.28 que estes ensaios com pressão de injeção de 125 kPa se destacam da maioria dos outros. Eles, em média, possuem um comprimento de extinção do líquido 1,0 mm maior que os demais.

Figura 5.29 – Imagens originais do jato do ensaio 1329050, com condições de injeção de 122,1 kPa, 56,4 °C e a pressão da câmara de 0,49 kPa. A primeira obtida pelo método “Schlieren” e a outra, que indica o atraso da onda de evaporação, pela “Iluminação por detrás”.

Figura 5.30 – Imagens originais do jato do ensaio 1329500, com condições de injeção de 123,0 kPa, 56,5 °C e a pressão da câmara de 0,10 kPa. A primeira obtida pelo método “Schlieren” e a outra, que indica o atraso da onda de evaporação, pela “Iluminação por detrás”.

5.1.7 Comportamento da Onda de Choque

Como foi visto na Seção 4.3, quanto menor a pressão da câmara, maiores são as dimensões da onda de choque. Outros gráficos representativos estão ilustrados nas Figs. 5.31 a 5.34. Em todas estas figuras, cada categoria de ensaio, com a mesma pressão e temperatura de injeção, apresentou um comportamento linear para o logaritmo das dimensões r_1 e r_2 , praticamente (Fig. 5.31 a 5.34) em função do logaritmo da pressão da câmara, P_∞ . Em uma análise geral, no comportamento do raio da onda de choque, é observado que esta dimensão é menos sensível ao incremento da pressão de injeção, porém sua amplitude aumenta ainda mais quando é acrescido o valor da pressão de saturação, que é função da temperatura de injeção. Quanto à distância axial da onda de choque, r_2 , ela tende a diminuir com o aumento da temperatura de injeção, mas também aumenta com o aumento da pressão de injeção.

Figura 5.31 – Os comprimentos representativos r_1 (em “a”) e r_2 em função da pressão da câmara. Aqui, todos os ensaios possuem a pressão de injeção de 125 kPa (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro).

Figura 5.32 – Os comprimentos representativos r_1 (em “a”) e r_2 em função da pressão da câmara. Aqui, todos os ensaios possuem a pressão de injeção de 750 kPa (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro).

Figura 5.33 – Os comprimentos representativos r_1 (em “a”) e r_2 em função da pressão da câmara. Aqui, todos os ensaios possuem a temperatura de injeção de 56 °C (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro).

Figura 5.34 – Os comprimentos representativos r_1 (em “a”) e r_2 em função da pressão da câmara. Aqui, todos os ensaios possuem a temperatura de injeção de 95°C (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro).

Uma análise dos resultados com detalhes indica o caráter bi-dimensional e axissimétrico do fenômeno evaporativo. No entanto, foi possível observar uma relação de proporcionalidade entre o comprimento do núcleo de líquido, L_E , e a distância axial da onda de choque, r_2 . Na Fig. 5.28 foi mostrado que o comprimento do núcleo líquido é proporcional ao seguinte fator: $(P_0 / P_{sat})^{0,6}$. Por isto, neste gráfico, a pressão da câmara é multiplicada por este fator, e no eixo das ordenadas ficou indicado a razão da distância axial pelo raio do bocal, r_2/r_b (distância normalizada).

Figura 5.35 – Gráfico que mostra a influência do comprimento do núcleo líquido na distância axial da onda de choque. Nele, a razão do comprimento característico r_2 pelo raio do bocal r_b está em função da pressão da câmara corrigido pelo fator de proporcionalidade do comprimento do núcleo líquido. As linhas tracejadas são os limites de incerteza encontrados em função da incerteza na medição desta razão ($\pm 3,3$) e da pressão da câmara ($\pm 0,07$).

5.2 Comparação dos Jatos Evaporativos do Bocal de Aço de 0,3 mm de diâmetro com Bocais de Aço de 0,8 mm e de vidro de 0,35 mm

Neste capítulo, são discutidos e analisados os resultados obtidos com o bocal de 0,80 mm com superfície rugosa (bocal R08) e com os do bocal liso de vidro com diâmetro de 0,35 mm (bocal V03). Conforme foi visto na seção anterior, estes bocais possuem muitas características semelhantes com relação ao bocal menor de 0,3 mm discutido na Seção 5.1, porém algumas peculiaridades são ressaltadas. O comportamento da vazão também é mostrado em função das condições de injeção e da pressão da câmara. Uma análise do comprimento do núcleo líquido é feita em função da pressão e temperatura de injeção comparada aos outros bocais. Todos os dados experimentais obtidos por estes dois bocais podem ser vistos no Anexo C.

De imediato, é importante mostrar que estes jatos, com uma pressão de saturação abaixo da pressão ambiente também possuem um perfil de filete retilíneo. Nas imagens das Fig. 5.35 são mostrados dois jatos ilustrando este fato. Apenas no jato do bocal R08, são vistas pequenas ondulações ao longo do filete que não promovem o desprendimento de gotículas no percurso mostrado na fotografia.

Em seguida, ilustrado nas Figs. 5.36 a 5.40, é feita uma comparação dos jatos obtidos pelos três bocais estudados. Estas imagens mostram que diâmetros de bocais maiores promovem um núcleo líquido maior e dimensões da onda de choque também maior. Isto retrata um comportamento proporcional tanto do comprimento do núcleo de líquido como das dimensões características da onda de choque em relação aos diâmetros dos bocais R03, R08 e V03, que possuem 0,30, 0,80 e 0,35 mm, respectivamente.

Para os jatos que não possuem ondas de choque, os perfis dos jatos destes bocais R08 e V03 são bastante similares em relação aos vistos na Seção 5.1.

Figura 5.36 – Jatos com pressão e temperatura de injeção de 250 kPa e 22 °C. A pressão da câmara é a atmosférica e a razão entre as pressões de saturação e câmara é igual a 0,05. A primeira é um jato do bocal R08 e a outra do bocal de vidro V03. Os destaques nos cantos superiores das imagens são imagens adquiridas pela câmara CCD que utiliza o recurso de “iluminação por detrás”. As imagens principais foram obtidas pelo método “Schlieren” (ensaios feitos na calibração do C_D).

Figura 5.37 - Ensaios com as condições de injeção de $P_0 = 125$ kPa, $T_0 = 56$ °C e $P_\infty = 0,15 \pm 0,07$ kPa. Cada imagem se refere aos bocais R03, R08 e V03, respectivamente.

Figura 5.38 - Ensaios com as condições de injeção de $P_0 = 125$ kPa, $T_0 = 56$ °C e $P_\infty = 0,45 \pm 0,07$ kPa. Cada imagem se refere aos bocais R03, R08 e V03, respectivamente.

Figura 5.39 - Ensaios com as condições de injeção de $P_0 = 125$ kPa, $T_0 = 95$ °C e $P_\infty = 0,24 \pm 0,07$ kPa. Cada imagem se refere aos bocais R03, R08 e V03, respectivamente.

Figura 5.40 - Ensaios com as condições de injeção de $P_0 = 250$ kPa, $T_0 = 120$ °C e $P_\infty = 0,42 \pm 0,07$ kPa. Cada imagem se refere aos bocais R03, R08 e V03, respectivamente.

5.2.1 Comparação da Condição de Máxima Vazão

A condição de máxima vazão obtida nestes bocais apresentou semelhante comportamento em relação ao bocal de aço de 0,3 mm de diâmetro, ou seja, para cada condição de injeção e temperatura, cada bocal alcançou uma vazão cuja redução da pressão da câmara não a alterava, mantendo-a neste patamar máximo. Para

comparar as máximas vazões destes bocais, foi utilizada a vazão mássica superficial nesta condição máxima. No gráfico da Fig. 5.41, em função da razão entre as pressões de saturação e de injeção e da categoria de pressão de injeção, é feita uma comparação das vazões mássicas superficiais, na condição de bloqueio. Para cada categoria de pressão de injeção de cada bocal, é observada uma queda linear desta vazão em função da razão de pressões. O bocal de vidro (V03) obteve uma menor inclinação desta curva em relação ao bocal R03. E o bocal R08 foi o que possuiu a menor vazão superficial máxima.

Como nota, deve-se lembrar que o bocal de vidro tem sua menor seção com valor de 0,35 mm de diâmetro, sendo sua borda de saída arredondada. É difícil afirmar se o jato emerge do bocal com o diâmetro da restrição, ou sofre um aumento de diâmetro acompanhando a curvatura da borda na saída. Sem uma dimensão precisa deste diâmetro, a determinação da pressão metaestável após sair do bocal líquido pode não ser a mesma daquela inferida na menor seção através da medição da vazão.

Figura 5.41 – Comparativo das máximas vazões superficiais alcançadas pelos bocais com relação à seção de saída. Os símbolos da legenda representam a pressão de injeção e a cor do símbolo se refere ao bocal experimentado.

Como comparação, outros gráficos estão apresentados nas Figs. 5.42 e 5.43. Este primeiro ilustra quantas vezes a pressão da câmara deve ser menor que a pressão de saturação para alcançar a vazão máxima. O outro mostra o grau de metaestabilidade alcançada pelo líquido quando a vazão está bloqueada. Tanto o bocal de vidro como o bocal R03, possuem comportamentos similares. A diferença se fez quando o enfoque foi o aumento da temperatura de injeção do bocal de vidro que alcançou um grau de metaestabilidade um pouco maior que o de aço com diâmetro aproximado. Conforme esperado pelo gráfico da Fig. 5.43 o grau de metaestabilidade dos jatos do bocal R08 possui um valor menor que os outros.

Figura 5.42 – Comparativo das máximas razões de pressão de saturação e da câmara (R_p) para alcançar a máxima vazão. Os símbolos da legenda representam a pressão de injeção e a cor do símbolo se refere ao bocal experimentado.

Figura 5.43 – Comparativo do grau de metaestabilidade em função da pressão de injeção. Os símbolos da legenda representam a pressão de injeção e a cor do símbolo se refere ao bocal experimentado.

5.2.2 Comparação do Comprimento de Extinção do Líquido

A normalização do comprimento de extinção do núcleo de líquido é uma forma de comparar dos diversos bocais. Para isto, esta dimensão foi dividida pelo diâmetro do bocal ensaiado, isto é, L_E/D_b . Esta comparação envolve experimentos dos bocais deste estudo (Tab. B.4 do Anexo B para o bocal R03 e, Tab. C.2 e C.5 do Anexo C para os bocais R08 e V03) e os experimentos de Athans (1995) cujos dados experimentais estão na Tab. 5.5. No gráfico da Fig. 5.44 estão indicados estes comprimentos normalizados de todos os ensaios aqui apresentados, além dos ensaios de Athans, em função da razão entre a pressão de saturação e da câmara. A grande maioria dos pontos está compreendida na faixa limitada pelas linhas tracejadas. Porém, como similarmente visto na Subseção 5.1.6, além daqueles já destacados no gráfico da Fig. 5.28, neste gráfico (Fig. 5.44) é notada a extrapolação de outros pontos, referente aos ensaios do bocal de vidro. Assim como ocorreu no bocal R03 o atraso da onda de evaporação (ver Subseção 5.1.6), o bocal V03 também apresentou

este atraso para os pontos que extrapolaram. Como exemplo do atraso que ocorre no bocal de vidro estão mostradas as imagens dos ensaios V03\1329m10, V03\2349500 e V03\2368500, na Fig.5.45 a 5.46. O ensaio V03\2393m10 da Fig. 5.47, cuja pressão de injeção é de 250 kPa, não apresentou este atraso na imagem do jato e seu resultado da razão L_E/D_b ficou compreendida na região limitada pelas linhas tracejadas.

Tabela 5.5 – Alguns ensaios de Athans (1995) com um bocal de 0,864 mm de diâmetro utilizando iso-octano.

Athans	P_0	T_0	P_{sat}	P_∞	m	P_{sat} / P_0	L_E / D_b
Ensaio	(kPa)	(°C)	(kPa)	(kPa)	(kg/s)		
A6 - 04/01/94	2069	148	335,1	0,66	0,2038	0,162	14,26
A8- 04/01/94	2097	200	893,5	0,65	0,01857	0,426	8,51
A7 - 09/01/94	1207	150	349,6	0,62	0,01549	0,290	9,89
A8 - 09/01/94	980	150	349,6	0,59	0,01387	0,357	9,66
A9 - 09/01/94	773	150	349,6	0,59	0,01229	0,452	8,28
A10 - 09/01/94	719	150	349,6	0,57	0,01189	0,486	7,13
A11 - 09/01/94	604	150	349,6	0,59	0,01072	0,579	7,59
A12 - 09/01/94	521	150	349,6	0,61	0,01002	0,671	5,52
A13 - 09/01/94	451	150	349,6	0,61	0,00878	0,775	4,83
A1 - 22/10/94	2403	201	908,8	1,92	0,02102	0,378	9,9
A2 - 22/10/94	2529	206	988,0	2,47	0,02134	0,391	9,7
A3 - 22/10/94	2606	211	1072,3	2,3	0,02143	0,411	9,4
A4 - 22/10/95	2577	215	1143,8	2,24	0,02127	0,444	9,4
A5 - 22/10/96	2608	221	1257,6	2,36	0,02085	0,482	8,7
A6 - 22/10/97	2731	226	1359,4	2,3	0,02105	0,498	7,5
A11 - 22/10/98	2646	204	955,7	atm	0,02253	0,361	13,1
A12 - 22/10/99	2650	211	1072,3	atm	0,02227	0,405	12,5
A17 - 22/10/100	2509	223	1297,6	atm	0,02059	0,517	10,3

* Obs.: A designação "atm" se refere ao jato descarregado na atmosfera.

Figura 5.44 – Comparativo do comprimento de extinção do núcleo líquido normalizado em função da razão da pressão de saturação e de injeção. Uma curva de ajuste para estes dados pode ser escrita através da seguinte equação: $L_E / D_b = 13,643 \cdot (P_{sat} / P_0)^{-0,607}$. O tracejado se refere ao limite inferior e superior de erro desta curva em função da precisão na medição deste comprimento que é de 3,3 para o bocal de 0,30 mm ($\Delta L_E / D_b = \pm 1,0 / D_b$).

Figura 5.45 – Imagens do jato do ensaio V03\1329m10, com condições de injeção de 121,7 kPa, 56,5 °C, pressão da câmara de 0,35 kPa e velocidade de 17,2 m/s. Nela existe a indicação do atraso da onda de evaporação, pela “Iluminação por detrás”.

Figura 5.46 – Imagens do jato do ensaio V03\2349500, com condições de injeção de 249,9 kPa, 74,8 °C, pressão da câmara de 1,70 kPa e velocidade de 24,9 m/s. Nela existe a indicação do atraso da onda de evaporação, pela “Iluminação por detrás”.

Figura 5.47 – Imagens do jato do ensaio V03\2393m10, com condições de injeção de 250,4 kPa, 120,1 °C, pressão da câmara de 0,60 kPa e velocidade de 23,8 m/s. Nela não existe um atraso da onda de evaporação perceptível.

5.2.3 *Comparação do Comportamento da Onda de Choque*

Nesta primeira análise, é mostrada a formação das ondas de choque pelos três bocais cujos experimentos estavam contidos nestas condições de injeção: 125 kPa e 56 °C, 125 kPa e 95 °C, 250 kPa e 95 °C e, 250 kPa e 120 °C. Os gráficos representativos estão ilustrados nas Figs. 5.48 a 5.51. Neles é possível verificar que os ensaios, cuja pressão de injeção está mais próxima da pressão de saturação, não há grande diferenciação nas dimensões características da onda de choque em função dos diferentes bocais (Figs. 5.49 e 5.51). Estes ensaios assumem um núcleo de líquido mais curto que os demais.

Figura 5.48 – O comprimento representativo, r_1 (a primeira imagem) e r_2 dos bocais estudados são comparados com os ensaios cuja pressão e temperatura de injeção são de 125 kPa e 56 °C.

Figura 5.49 – O comprimento representativo, r_1 (a primeira imagem) e r_2 dos bocais estudados são comparados com os ensaios cuja pressão e temperatura de injeção são de 125 kPa e 95 °C.

Figura 5.50 – O comprimento representativo, r_1 (a primeira imagem) e r_2 dos bocais estudados são comparados com os ensaios cuja pressão e temperatura de injeção são de 250 kPa e 95 °C.

Figura 5.51 – O comprimento representativo, r_1 (a primeira imagem) e r_2 dos bocais estudados são comparados com os ensaios cuja pressão e temperatura de injeção são de 250 kPa e 120 °C.

5.2.4 A Influência das Condições de Injeção e do Comprimento do Núcleo Líquido nas Dimensões da Onda de Choque

Como este trabalho lida com uma mistura líquido-vapor que parte de uma evaporação, a pressão de estagnação pode ser associada à pressão de saturação do fluido. No entanto, o termo que se refere à razão entre diâmetros pode ser convertida,

para este caso, como a razão entre a área projetada pelo raio da onda de choque (A_1) e a área lateral do cone de líquido (A_L):

$$\frac{A_1}{A_L} = \frac{\pi r_1^2}{\pi r_b \sqrt{r_b^2 + L_E^2}} \cong \frac{r_1^2}{r_b L_E}, \text{ pois } L_E \gg r_b \quad (5.1)$$

Como já foi visto, o comprimento do núcleo de líquido normalizado pelo diâmetro do bocal é proporcional à razão $r_b (P_0 / P_{sat})^{0,6}$, logo:

$$\frac{r_1^2}{r_b L_E} \propto \frac{r_1^2}{r_b^2 (P_0 / P_{sat})^{0,6}} \quad (5.2)$$

Se o resultado acima é proporcional à razão entre a pressão de saturação e da câmara, (P_{sat} / P_∞) , pode-se obter a seguinte relação:

$$\left(\frac{r_1^2}{r_b^2 (P_0 / P_{sat})^{0,6}} \right) \propto \left(\frac{P_0}{P_\infty} \right) \Rightarrow \left[\frac{r_1^2}{r_b^2} \right] \propto \left[\left(\frac{P_{sat}}{P_\infty} \right) \left(\frac{P_0}{P_{sat}} \right)^{0,6} \right]. \quad (5.3)$$

E através desta proporcionalidade (Eq. 5.3) pode-se obter o gráfico da Fig. 5.53 e verificar que, praticamente, todos os ensaios concentram-se em uma região.

Infelizmente, um gráfico semelhante que represente a distância axial normalizada, r_2/r_b , em função das condições de injeção, independente do bocal utilizado, não foi aqui encontrado.

Tabela 5.6 – Ensaios de Athans (1995) com dimensões da onda de choque para o bocal de 0,864 mm de diâmetro utilizando iso-octano.

P_0 (kPa)	T_0 (°C)	P_∞ (kPa)	r_1 (mm)	r_2 (mm)
2397	204	5,73	12,5	15
2338	200	8,25	7,0	11
2293	200	9,87	6,5	12

Figura 5.52 – A razão do comprimento característico r_1 pelo raio do bocal r_b em função da razão da pressão de saturação e da câmara corrigido pelo fator de proporcionalidade do comprimento do núcleo líquido. As linhas tracejadas são os limites da correlação ($r_1/r_b \pm 50\%$). No trabalho de Crist e outros (1966), para um escoamento de compressíveis de diversos gases foi obtida a correlação de $r_1/r_b \cong 0,373 * (P_0/P_\infty)^{0,523}$ enquanto a curva que melhor se ajusta para estes resultados é igual a $r_1/r_b \cong 2,152 * [(P_{sat}/P_\infty) * (P_0/P_{sat})^{0,6}]^{0,521}$.

5.2.5 Considerações Sobre a Dimensão da Onda de Choque do Bocal de Vidro

Ensaio com este bocal resultaram em imagens que mostram ondas de choque na parte inferior, localizada entre a saída do bocal e o início da onda de evaporação (Fig. 5.53). A onda de choque pode aumentar até a região da saída do bocal (Fig. 5.54). E, em estágios mais avançados, a sua expansão se aproxima do corpo do injetor (Fig. 5.55).

Figura 5.53 – Imagens do jato do ensaio V03\1329500 com pressão e temperatura de injeção de 123,5 kPa e 56,7 °C e, pressão da câmara de 0,27 kPa. A primeira é a imagem original obtida pelo “Schlieren” e a segunda foi obtida pela “iluminação pro detrás”. A última imagem é filtrada matematicamente da primeira e mostra a onda de choque a distância de 0,8 mm da saída do bocal.

Figura 5.54 – Imagens do jato do ensaio V03\2368500 com pressão e temperatura de injeção de 250,8 kPa e 94,4 °C e, pressão da câmara de 0,34 kPa. A primeira é a imagem original obtida pelo “Schlieren”, a segunda e a terceira foram filtradas desta original. A última imagem foi obtida pela “iluminação pro detrás”.

Figura 5.55 – Imagens do jato do ensaio V03\2393m10 com pressão e temperatura de injeção de 255,4 kPa e 120,6 °C e, pressão da câmara de 0,53 kPa. A primeira é a imagem original obtida pelo “Schlieren” e tanto a segunda como a terceira foram filtradas desta original. A última imagem foi obtida pela “iluminação pro detrás”.

Tomando a imagem do primeiro caso (Fig. 5.53), se as condições de injeção se mantiverem constantes, e apenas fosse diminuído a pressão da câmara com o propósito de expandir a onda de choque, como nos casos das Figs. 5.54 e 5.55, não é possível determinar a diferença da pressão metaestável. As incertezas associadas a esta medição são maiores que as diferenças que devem ser encontradas para estas diferentes configurações. Como exemplo, são mostradas as imagens dos ensaios V03\1368100 e V03\1368500 na Fig. 5.56 que apresentaram a mesma pressão metaestável, praticamente, de 23,2 e 22,5 kPa.

Os ensaios do bocal de vidro foram os que apresentaram uma onda de choque com um formato quase cilíndrico. Como nos casos da seção anterior, algumas imagens indicam ondas de choque reflexivas.

Figura 5.56 – Imagens dos jatos dos ensaios V03\1368100 e V03\1368500, respectivamente. Suas pressões de injeção eram de 123,2 e 123,7 kPa, temperatura de 94,4 °C e 95,0 °C e, pressões da câmara de 0,86 e 0,23 kPa. As pressões metaestáveis calculadas eram de 23,2 e 22,5 kPa e a incerteza associada é de ± 5 kPa.

6. APLICAÇÃO DA TEORIA DA ONDA DE EVAPORAÇÃO NOS JATOS

6.1 Cálculo do Núcleo de Líquido

A análise do núcleo de líquido revela importantes informações sobre o fenômeno evaporativo. A modelagem do núcleo de líquido assume que a evaporação se dá por meio de uma onda oblíqua de choque de evaporação, conforme já discutido na Seção 2.4. Nesse processo, a estabilidade do núcleo e o seu comprimento de extinção, L_E , são muito relevantes.

Como visto na Seção 2.6 (Fig. 2.12), o líquido parte de uma pressão e temperatura de injeção e, escoando pelo bocal, vem a se tornar metaestável, na sua seção de saída. A expansão interna ao bocal é considerada praticamente isotérmica e, portanto, admi-se que o líquido, ao deixar o bocal, alcança uma pressão metaestável, inferida pelas medidas da vazão mássica. O líquido emergente passa então a sofrer um processo abrupto evaporativo, como uma onda de evaporação oblíqua, ou seja, a evaporação se dá na superfície do núcleo de líquido. De acordo com a modelagem física abordada por Simões-Moreira e outros (2002), a mudança de fase do líquido metaestável resulta em uma mistura bifásica sônica, com o número de Mach unitário, perfazendo a jusante da onda oblíqua evaporativa. Esta mistura bifásica expande livremente alcançando velocidades crescentes acompanhada, como de usual, por um aumento do número de Mach e rebaixamento das demais propriedades. A expansão termina com a formação de uma onda de choque, para o ajuste de pressão.

Em termos de modelagem, deve-se conhecer a temperatura e pressão de injeção e a pressão metaestável, que é calculada a partir da equação do bocal (Eq. 4.4). Com estas informações é possível calcular as propriedades a jusante da onda de evaporação (estado “2”), assumindo a condição sônica a jusante, também chamada de condição de Chapman-Jouguet (índice “CJ”). Assim, é possível obter a vazão superficial mássica da lateral do cone (J_{CJ}) que é constante em toda a periferia do núcleo líquido. Como já foi mostrado (Seção 2.4), através das vazões mássicas do

bocal, J_b , e do cone líquido, J_{CJ} , determina-se o ângulo da onda, β , e o comprimento do núcleo líquido, L_E :

$$\operatorname{sen} \beta = \frac{J_{CJ}}{J_b} \quad \Rightarrow \quad L_E = r_b \sqrt{\left(\frac{J_b}{J_{CJ}}\right)^2 - 1}. \quad (6.1)$$

A Tab. 6.1 mostra os dados experimentais obtidos em função das condições de injeção (P_{inj} e T_{inj}). Nela estão a pressão de saturação, a pressão metaestável do líquido, o volume específico do líquido, v_1 , a vazão mássica, $\dot{m}$, a vazão superficial do bocal, o comprimento do cone líquido e o ângulo de giro da mistura bifásica, θ .

Tabela 6.1 – Resultados experimentais médios obtidos pelas séries de ensaios do bocal R03.

Série de ensaios	P_{inj} (kPa)	T_{inj} (°C)	P_{sat} (kPa)	P_{lm} (kPa)	v_1 (m³/kg)	$\dot{m}$ (g/s)	J_{bm} (kg/m².s)	L_E (mm)	θ (°)
R03\1329	125	56	27,1	4,6	0,001537	0,8354	11177	6,2	39,5
R03\1349	125	76	50,5	8,9	0,001569	0,8287	11086	4,2	45,0
R03\1368	125	95	87,4	12,9	0,001596	0,8120	10863	2,3	48,0
R03\2329	250	56	27,7	8,6	0,001538	1,2207	16331	7,4	39,7
R03\2349	250	76	51,3	16,0	0,001569	1,1846	15931	6,3	30,8
R03\2368	250	95	89,5	36,3	0,001598	1,1263	15110	4,3	42,8
R03\2393	250	120	176,7	97,5	0,001643	0,9378	12584	3,1	47,4
R03\2404	250	131	222,6	133,0	0,001665	0,8240	11105	2,9	40,0
R03\5329	500	56	27,2	13,9	0,001538	1,7485	23392	11,5	36,8
R03\5349	500	76	51,5	30,8	0,001569	1,7009	22755	7,8	34,0
R03\5368	500	95	90,5	49,6	0,001598	1,6447	22176	5,7	43,0
R03\5393	500	120	183,8	128,3	0,001647	1,4607	19663	3,9	43,6
R03\5404	500	131	231,3	166,9	0,001670	1,3902	18669	3,6	45,0
R03\5435	500	162	442,1	334,8	0,001771	1,0008	13442	2,1	46,2
R03\7329	750	56	26,8	21,5	0,001537	2,1486	28744	14,4	34,3
R03\7349	750	76	51,1	42,7	0,001570	2,1012	28111	10,3	33,8
R03\7368	750	95	92,1	77,3	0,001599	2,0215	27044	7,6	32,3
R03\7393	750	120	180,3	167,0	0,001645	1,8664	24969	5,0	39,5
R03\7404	750	131	233,7	221,5	0,001671	1,7681	23654	4,4	42,8
R03\7435	750	162	443,7	416,4	0,001772	1,3588	18178	2,3	47,6
R03\7451	750	178	607,4	545,3	0,001851	1,0498	14044	1,7	47,4

Tabela 6.2 – Resultados calculados das séries de ensaios do bocal R03 a jusante da onda de evaporação.

Série de ensaios	P_2 (kPa)	T_2 (°C)	x_2	v_2 (m ³ /kg)	J_{CJ} (kg/m ² s)	u_2 (m/s)	$sen(\beta)$	L_E (mm)	erro L_E %	θ (°)	erro θ %
R03\1329	1,8	1,0	0,348	3,9755	20,2	80,46	0,00176	86,5	1299,6	77,5	96,2
R03\1349	3,5	12,2	0,407	2,5973	34,6	89,76	0,00302	50,3	1109,7	78,5	74,5
R03\1368	6,6	25,0	0,461	1,5897	63,3	100,62	0,00565	26,9	1090,7	79,6	65,8
R03\2329	5,0	19,4	0,242	1,1053	57,2	63,26	0,00340	44,7	501,4	67,5	70,3
R03\2349	13,2	40,4	0,247	0,4527	140,9	63,81	0,00863	17,6	180,1	67,6	119,6
R03\2368	32,2	63,3	0,231	0,1834	319,3	58,54	0,02047	7,4	71,6	65,8	53,7
R03\2393	60,5	81,9	0,298	0,1356	527,8	71,58	0,04080	3,7	19,0	71,1	50,0
R03\2404	83,3	92,3	0,302	0,1011	709,0	71,69	0,06237	2,4	-15,0	71,7	79,1
R03\5329	9,5	32,7	0,162	0,4059	116,3	47,19	0,00482	31,5	173,9	51,6	40,3
R03\5349	17,8	47,5	0,206	0,2833	191,8	54,31	0,00817	18,6	137,6	55,4	62,9
R03\5368	41,5	70,5	0,186	0,1196	430,7	51,50	0,01898	8,0	40,1	53,8	25,1
R03\5393	91,2	95,3	0,220	0,0681	807,4	55,00	0,04007	3,8	-3,6	56,6	29,9
R03\5404	125,7	106,9	0,207	0,0476	1068,7	50,84	0,05572	2,7	-24,1	54,6	21,4
R03\5435	223,9	130,0	0,297	0,0393	1667,5	65,60	0,12078	1,3	-40,4	62,8	35,8
R03\7329	15,4	43,8	0,089	0,1418	206,1	29,23	0,00695	21,8	52,1	32,3	-5,8
R03\7349	31,3	62,5	0,107	0,0883	362,6	32,00	0,01251	12,1	17,9	34,4	1,9
R03\7368	60,9	82,1	0,108	0,0499	650,0	32,43	0,02331	6,5	-14,2	34,7	7,6
R03\7393	134,5	109,5	0,102	0,0229	1239,0	28,41	0,04812	3,2	-36,7	31,1	-21,2
R03\7404	202,1	125,4	0,061	0,0103	1788,6	18,39	0,07333	2,1	-53,2	20,1	-52,9
R03\7435	340,1	148,6	0,135	0,0131	2597,9	33,98	0,13859	1,1	-52,1	38,0	-20,2
R03\7451	402,9	156,7	0,221	0,0172	2839,3	48,95	0,19606	0,8	-55,2	50,5	6,4

A Tab. 6.2 contém os valores das propriedades a jusante da onda de evaporação calculados através das condições de injeção (P_{inj} e T_{inj}) e da pressão metaestável do líquido correspondentes às séries de ensaios da Tab. 6.1. Nela estão indicados a pressão (P_2) e temperatura (T_2) a jusante da onda, o título, x_2 , o volume específico da mistura, v_2 , a vazão superficial, J_{CJ} , o seno do semi-ângulo do cone, o comprimento do cone líquido e o ângulo de giro do fluido calculados e os erros percentuais decorrentes deste cálculo.

A Fig. 6.1 ilustra graficamente os resultados desta dimensão do cone de líquido tomando os dados calculados e os encontrados experimentalmente. A faixa de incerteza do calculado é decorrente do erro existente na pressão metaestável do líquido. O traço vertical corresponde à faixa de confiabilidade para determinação do comprimento na imagem do jato. Similarmente, a Fig. 6.2 apresenta um gráfico que relaciona o ângulo de giro (θ) calculado e o experimental. Devido à técnica de visualização, no caso, a iluminação por detrás, não existe uma definição clara o suficiente para a obtenção correta deste ângulo nas imagens dos jatos, por isto, foi apresentado com uma faixa de erro de $\pm 20^\circ$. Uma representação da medição do

ângulo de giro é feita na Fig. 6.3 do ensaio 7349500 onde é possível observar a dificuldade de se obter tal medida já que a técnica integra o escoamento por toda a volta do cone líquido. A melhor técnica seria o “laser sheet” ou lâmina de “laser” cuja iluminação passa exclusivamente no eixo central do jato.

Figura 6.1 – Comparação do comprimento do núcleo de líquido experimental e o calculado do bocal R03.

Figura 6.2 – Comparação do ângulo de giro experimental e o calculado do bocal R03.

Figura 6.3 – Exemplo de medição do ângulo de giro do jato do ensaio 7349500. Este ângulo corresponde à tangente da trajetória do fluido quando parte da onda de evaporação. Devido à técnica de “iluminação por detrás”, este procedimento envolve uma grande incerteza experimental.

Também feito um levantamento do comprimento de extinção do núcleo de líquido dos outros bocais e estão apresentados nas Figs. 6.4 e 6.5 cujos dados estão indicados na Tab. 6.3 e 6.4.

Tabela 6.3 – Resultados experimentais médios obtidos pelas séries de ensaios do bocal R08 (de aço com 0,8 mm de diâmetro) e bocal V03 (de vidro com diâmetro de 0,35 mm).

Série de ensaios	P_{inj} (kPa)	T_{inj} (°C)	P_{sat} (kPa)	P_{lm} (kPa)	v_l (m ³ /kg)	$\dot{m}$ (g/s)	J_{bm} (kg/m ² .s)	L_E (mm)
R08\1056	125	56	24,34	22,87	0,0015100	5,0227	10647	15,8
R08\1095	125	95	90,42	65,32	0,0015980	3,7430	7935	6,3
R08\2095	250	95	95,38	70,04	0,0015860	6,4849	13747	10,9
R08\2120	250	120	179,54	143,18	0,0016500	5,1950	11013	7,7
V03\1329	125	56	25,2	6,8	0,001512	1,1586	11257	7,7
V03\1349	125	76	51,1	15,4	0,001555	1,1100	10785	6,2
V03\1368	125	95	90,0	22,7	0,001597	1,1059	10745	4,6
V03\2329	250	56	25,9	18,1	0,001514	1,6576	16105	10,9
V03\2349	250	76	49,9	26,0	0,001553	1,6262	15800	7,9
V03\2368	250	95	88,8	28,6	0,001596	1,6133	15675	5,6
V03\2393	250	120	177,5	60,3	0,001665	1,4850	14428	4,0
V03\5349	500	76	51,0	41,8	0,001554	2,3589	22919	11,1
V03\5393	500	120	180,2	89,1	0,001667	2,1853	21233	5,4

Tabela 6.4 – Resultados calculados, a jusante da onda de evaporação, das séries de ensaios do bocal R08 (de aço com 0,8 mm de diâmetro) e bocal V03 (de vidro com diâmetro de 0,35 mm).

Série de ensaios	P_2 (kPa)	T_2 (°C)	x_2	v_2 (m ³ /kg)	J_{CJ} (kg/m ² s)	u_2 (m/s)	$\sin(\beta)$	L_E (mm)	erro L_E %
R08\1056	18,6	48,5	0,055	0,07275	245,5	17,86	0,0231	17,3	9,8
R08\1095	43,8	72,1	0,187	0,11156	441,7	49,28	0,0557	7,2	14,8
R08\2095	47,0	74,1	0,190	0,10625	469,0	49,83	0,0341	11,7	7,5
R08\2120	100,4	98,8	0,198	0,05576	888,8	49,56	0,0807	4,9	-35,4
V03\1329	3,8	13,9	0,294	1,6325	42,9	69,99	0,0038	45,7	494,7
V03\1349	8,7	30,8	0,330	0,8660	88,3	76,48	0,0082	21,2	241,5
V03\1368	12,4	38,7	0,417	0,7856	114,5	89,97	0,0107	16,3	254,8
V03\2329	12,0	38,0	0,143	0,2774	148,6	41,23	0,0092	18,9	72,6
V03\2349	15,9	44,5	0,234	0,3524	169,7	59,82	0,0107	16,2	105,2
V03\2368	16,0	44,8	0,375	0,5584	150,1	83,79	0,0096	18,2	225,3
V03\2393	33,9	64,7	0,450	0,3374	280,9	94,79	0,0195	8,9	121,2
V03\5349	30,2	61,6	0,119	0,1000	342,9	34,30	0,0150	11,6	4,6
V03\5393	53,1	77,7	0,363	0,1806	448,4	80,99	0,0211	8,2	51,4

Figura 6.4 – Comparação do comprimento do núcleo de líquido experimental e o calculado do bocal R08.

Figura 6.5 – Comparação do comprimento do núcleo de líquido experimental e o calculado do bocal V03.

6.2 O Atraso da Onda de Evaporação

Os comprimentos, L_E , calculados que não se enquadraram com os resultados esperados, indicados nos gráficos das Figs. 6.1 e 6.5, através do cálculo da onda de evaporação, podem estar associados ao atraso da onda de evaporação, pelo menos, para o bocal R03. Deste bocal, os ensaios com a temperatura de 56 °C e pressões de 125 kPa e 250 kPa, através da análise visual da onda de evaporação possuíam a evidência deste atraso. A este grupo, também deve ser acrescentado os ensaios que foram obtidos com pressão e temperatura de 125 kPa e 76 °C. Os outros que não apresentaram nitidamente este fenômeno através do registro fotográfico, mas que mostraram uma pequena discordância do comprimento calculado possuem respectivamente pressão e temperatura de injeção de: 125 kPa e 95 °C, 250 kPa e 76 °C e, finalmente, 500 kPa e 56 °C. Na Fig. 6.6, os ensaios com as pressões e temperaturas de injeção testados são mostrados. Os ensaios que permitiram visualizar o atraso fotograficamente, conjuntamente, com aqueles que se suspeita possuir um atraso da onda evaporativa em virtude dos resultados obtidos pelos cálculos, são destacados nesta figura.

Figura 6.6 – Gráfico que mostra as condições de injeção dos ensaios feitos para o bocal de aço com 0,3 mm de diâmetro (R03) e a pressão metaestável alcançada pelo ensaio. Nele são indicados os ensaios com atraso da onda de evaporação.

Pelos registros fotográficos, o bocal R08 não apresentou atraso da onda de evaporação, com exceção dos ensaios com as condições de injeção de 125 kPa e 56 °C que apresentaram um atraso 0,5 mm, aproximadamente. Mesmo assim, os cálculos do comprimento do núcleo líquido foram condizentes ao experimental (Fig. 6.4). Para os ensaios do bocal de vidro (V03), este atraso foi nitidamente visualizado nas imagens destes experimentos, como visto na Subseção 5.2.2, e teve a grande maioria dos comprimentos calculados deste núcleo fora do esperado. Como já foi dito, a borda na seção de saída do bocal é arredondada e isto também pode ter interferido no diâmetro do núcleo de líquido fazendo com que sua dimensão aumente em relação ao diâmetro de sua restrição (0,35 mm), colaborando para a sobrevalorização na determinação do comprimento (Fig. 6.5).

6.2.1 *Condição do Líquido Metaestável no Atraso*

Na seção anterior, foi explicado que o cone líquido do bocal de vidro pode adquirir um diâmetro da base diferente do diâmetro da garganta do bocal e, por consequência, o cálculo do comprimento não condizia com o observado. Porém, quando existe o atraso, a pressão metaestável pode ser bem diferente da pressão estimada na saída do bocal. Como os resultados experimentais mostram que o comprimento é menor que o calculado, provavelmente, a pressão metaestável aumentou, ou seja, uma pressão metaestável (P_1) maior resulta em um fluxo superficial mássico da onda (J_{CJ}) maior. Esta característica de incremento do fluxo pode ser comprovada na Tab. 6.2. Nela, para uma mesma temperatura de injeção, se verifica que pressões metaestáveis maiores proporcionam um fluxo maior. Isto porque a pressão de injeção pouco interfere no cálculo da vazão, J_{CJ} , e além disto, Simões-Moreira (1999) comprovou tal fato em seus cálculos. E se esta pressão se altera, considerando que a evaporação é desprezível na continuidade do filete jato, antes da onda de evaporação, pela lei da conservação de massa e pela equação de Bernoulli, é factível que aumente proporcionalmente o diâmetro da base do cone. Estes dois fatores aumentados, fluxo mássico da onda de choque e base do cone evaporativo, diminuem o comprimento do cone.

6.2.2 *Considerações sobre a Onda de Choque Formada em Jatos com Atraso da Onda Evaporativa*

É difícil ilustrar um esquema sobre a geometria das ondas de choque na região próxima do bocal, quando há este atraso da evaporação. Provavelmente, no início da onda de evaporação, esteja ocorrendo uma expansão de Prandtl-Meyer, similar ao encontrado na teoria de escoamento de compressíveis (Thompson, 1988). O fluxo na onda de evaporação tem uma direção perpendicular ao jato, e este escoamento que se localiza no início da onda de evaporação se expande para a região onde não ocorreu a evaporação e, conseqüentemente, acaba resultando nesta expansão. O detalhe à direita da Fig. 6.7 esquematiza como seria a geometria hipotética das ondas de choque próximo ao bocal. Da figura, as indicações L_d , v_j , e θ ,

correspondem à distância do atraso, ao ângulo de expansão de Prandtl-Meyer, e ao ângulo de giro do fluido após a onda. É possível que a onda de choque oblíqua não se origina, necessariamente, na extremidade da saída do bocal. E entre a onda de choque gerada pela expansão de Prandtl-Meyer, a onda de choque oblíqua (indicada na figura) e, o núcleo, na região mais escura da expansão bifásica, pode existir ondas de choques do tipo oblíquas e reflexivas tornando complexa a explicação da geometria dessas ondas nesta região em virtude da impossibilidade de se observar com maiores detalhes esses fenômenos pela imagem do jato.

Figura 6.7 – Ilustração esquemática da geometria das ondas de choque que ocorrem próximas da saída do bocal. A parte escurecida da expansão do esquema, entre a onda de choque oblíqua e o núcleo de líquido, pode apresentar ondas de choque reflexivas e oblíquas, internamente a esta região. O diâmetro do núcleo de líquido também pode aumentar após a saída do bocal.

Para o bocal de vidro a analogia é a mesma, ou seja, também deve ocorrer a expansão de Prandtl-Meyer e a onda de choque oblíqua (Fig. 6.8). A Fig. 5.52 do capítulo anterior mostra duas imagens de jato que possuem uma onda de choque que se fecha na porção líquida sem a evaporação e a outra já envolve a porção exposta do bocal de vidro. Uma forma indireta de saber se a onda de choque oblíqua se fecha na porção líquida do jato, ou no bocal de vidro, é a diferença da pressão metaestável inferida pelos dois tipos de choque observados. A onda de choque que se fecha na parte líquida teria uma pressão metaestável próxima da pressão da câmara e a onda

de choque que envolve o bocal teria uma pressão menor, isto porque a pressão da saída do bocal assumiria a pressão antes da onda de choque visualizada. Porém estas pressões estariam na ordem da pressão da câmara (100 Pa) e a diferença mínima mensurável através da vazão experimental é de (5000 Pa), inviabilizando este estudo.

Figura 6.8 – Ilustração esquemática da geometria das ondas de choque que ocorrem próxima da saída para o bocal de vidro, semelhante ao explicado na Fig 6.7.

7. CONCLUSÕES E CONTINUIDADE DO TRABALHO

7.1 Conclusões

Foram encontrados jatos que possuíam: (1) filete contínuo, (2) fragmentado em virtude da evaporação e, em casos com baixíssimas pressões da câmara, (3) abrupta evaporação seguida por expansão com formação de ondas de choque. Todos os tipos de jatos dependiam muito da razão entre a pressão de saturação e da câmara, R_p e, conseqüentemente, da pressão metaestável alcançada na saída do bocal para a condição de máxima vazão. Já esta pressão de máxima vazão também dependia da pressão e temperatura de injeção (P_0 e T_0). Basicamente, temperaturas e pressões de injeção elevadas, em relação ao conjunto de ensaios aqui apresentados, possuíam uma pressão metaestável próxima da pressão de saturação, ou seja, seu grau de metaestabilidade era menor e próximo de zero.

Caracterizando melhor os tipos de jatos, quando o líquido, a certo valor de P_0 e T_0 , era descarregado na câmara com pressão menor que a pressão metaestável de máxima vazão, o jato possuía um filete contínuo. Neste estágio, o R_p máximo era próximo de 1 para pressões e temperaturas de injeção elevados e, com temperaturas e pressões menores, o R_p alcançava valores da ordem de 5. Casos com R_p iguais a 10, o jato se fragmentava e muitas vezes não tinha perfil simétrico. Em estágios mais avançados, $R_p = 50$ a 100, o jato possuía simetria e, em uma faixa de temperatura de injeção menor, 50 a 131 °C, já mostrava a presença da onda de choque. Eram ensaios que também apresentaram um núcleo de líquido cuja evaporação ocorria em sua superfície.

Como já comentado acima, cada série de ensaio com uma determinada pressão e temperatura inicial, alcançava uma pressão metaestável em uma determinada vazão máxima, ou seja, mesmo que se diminuísse a pressão da câmara, a vazão não elevava como poderia se esperar, como também não diminuía. Nesta mesma ocasião o núcleo líquido manteve a simetria e a regularidade de formato, com extensão contínua e definida, mesmo reduzindo a pressão da câmara. Estas regularidades da vazão e do núcleo de líquido mostram um forte indício de que não

houve nucleação interna ao bocal e a evaporação se manteve na superfície do núcleo de líquido como onda de evaporação.

Nesta tese foi admitido que a expansão interna ao bocal ocorre de forma isotérmica. Em seguida, a onda de evaporação impõe um salto de propriedades termodinâmicas. A ocorrência de uma onda de choque é a comprovação de um escoamento supersônico. Na modelagem usada nesta tese, a mistura bifásica deixa a frente de evaporação com velocidade sônica. Neste instante, como a área normal ao seu escoamento tende a aumentar, e sua pressão é maior que a pressão da câmara, pela teoria de escoamento compressível, a mistura bifásica deve assumir uma velocidade supersônica crescente para depois equilibrar sua pressão de estagnação com a pressão da câmara através de uma onda de choque. Pelas imagens obtidas, ficou evidente que o fluido sofre um giro em decorrência da onda de evaporação. A utilização do iso-octano que é uma substância SCME mostrou-se favorável para a obtenção de imagens com clareza dos fenômenos envolvidos.

A análise das imagens mostra a presença de ondas de choque envolvendo o núcleo de líquido. A estrutura da onda de choque aparenta ser traspassada pelo escoamento com gotículas. Em alguns casos, cujo núcleo de líquido é mais extenso, há a formação de duas ondas de choque reflexivas e, entre elas, existe uma onda de choque paralela ao eixo do jato que deve ser quase normal ao escoamento.

A solução analítica proposta para a onda de evaporação (Cap. 2) mostrou que a razão entre as pressões a jusante e a montante da onda de evaporação (P_2/P_1) são principalmente dependentes do grau de metaestabilidade e pouco possuem influência da temperatura inicial, sob a condição de Chapman-Jouguet. Através do estudo numérico e do analítico proposto, verificou-se que todas as substâncias possuem comportamento semelhante da relação P_2/P_1 em função do grau de metaestabilidade e que o máximo valor desta razão é de 0,5 para graus de metaestabilidade próximos do valor unitário.

A aplicação da teoria de ondas de evaporação no núcleo de líquido mostrou-se compatível com os resultados experimentais. Mesmo assim, se questionou se esta teoria é aplicável aos jatos que sofrem um atraso da onda de evaporação. Estes jatos possuíam um grau de metaestabilidade elevado. Também foi visto, que os jatos com atraso da onda de evaporação, e na região próxima da saída do bocal, o escoamento

pode ser muito complexo com relação à geometria de ondas de choque formadas.

A comparação das imagens obtidas pelas duas técnicas ópticas de visualização (método “Schlieren” e método de “iluminação por detrás”) agregada ao processamento matemático das imagens foi importante para obter conclusões sobre os fenômenos ocorridos nestes jatos.

A utilização de mais dois bocais mostrou coerência nos fenômenos envolvidos como a formação do núcleo de líquido, da onda de evaporação, da onda de choque e de bloqueio da vazão. Estes bocais também apresentaram os outros tipos de jatos já mencionados, que são caracterizados pela ausência do escoamento supersônico. O bocal de vidro, com diâmetro de 0,35 mm, indicou resultados semelhantes ao bocal de aço com 0,3 mm, em relação ao máximo fluxo superficial mássico. Na condição de máxima vazão, o bocal de aço de 0,8 mm obteve um fluxo superficial mássico menor que os demais, para as mesmas condições de injeção. Em todos os bocais, também houve incompatibilidade da aplicação da teoria das ondas de evaporação quando o jato apresentava um atraso da onda de evaporação. Nas imagens do bocal de aço de 0,8 mm não houve aparentemente um atraso na onda de evaporação e apresentou um comprimento de extinção do núcleo de líquido calculado compatível com o resultado experimental. Comparando os três bocais, para condições iniciais de injeção e pressões da câmara iguais, verificou-se que as principais dimensões da onda de choque eram proporcionais ao diâmetro da seção de saída do bocal. Na grade de ensaios pesquisada e para o fluido aqui estudado, foi verificado que a dimensão representativa do raio da onda de choque é dependente das pressões de saturação, da câmara e da dimensão do núcleo de líquido. Também foi visto que o comprimento de extinção do núcleo líquido é função da razão entre as pressões de saturação e de injeção.

7.2 Continuidade do Trabalho

Sugere-se que para a continuidade da investigação dos fenômenos evaporativos aqui discutidos que os seguintes testes e análises adicionais sejam conduzidos:

- a. Testar outros líquidos de natureza diferente da de um

hidrocarboneto, tais como: água, álcool e um refrigerante frigorífico;

- b. aplicar outras técnicas de visualização dos jatos como a técnica de “laser sheet”, ou iluminação por uma lâmina de “laser”. Essa técnica permitiria resolver por completo a frente de evaporação. Além disso, em função das elevadas velocidades envolvidas, seria conveniente a utilização de uma fonte de laser pulsante, com o menor tempo de exposição possível;
- c. analisar a ocorrência desse fenômeno em outros dispositivos, tais como: passagem de válvulas, tubos de orifício e orifícios de uma forma geral;
- d. obter de forma analítica ou experimental um modelo que possa prever a pressão de metaestabilidade que é alcançada em experimentos dessa natureza.

Anexo A

Tabela de propriedades de saturação do iso-octano

Tab. A.1 - Tabela de propriedades de saturação do iso-octano (C₈H₁₈).

T (°C)	P (Pa)	v_L (m ³ /kg)	v_V (m ³ /kg)	h_L (J/kg)	h_V (J/kg)	s_L (J/kg.K)	s_V (J/kg.K)
-107,38	0,015	0,00125114	797950,4	-196008,3	155756,8	-770,114	1351,893
-100	0,057	0,00127400	222620,0	-187000,0	160300,0	-714,650	1303,254
-95	0,133	0,00127970	97836,1	-178000,0	167900,0	-677,280	1275,558
-90	0,294	0,00128550	45352,1	-169000,0	175600,0	-640,077	1251,269
-85	0,620	0,00129140	22073,0	-160000,0	183200,0	-603,042	1229,402
-80	1,252	0,00129740	11233,2	-151000,0	190900,0	-566,175	1210,165
-75	2,422	0,00130340	5955,76	-142000,0	198600,0	-529,475	1194,729
-70	4,510	0,00130960	3278,84	-133000,0	206400,0	-492,942	1181,683
-65	8,107	0,00131580	1868,82	-123000,0	212200,0	-456,577	1169,785
-60	14,107	0,00132220	1099,80	-114000,0	222100,0	-420,379	1160,198
-55	23,819	0,00132860	666,670	-105000,0	229900,0	-384,349	1153,142
-50	39,108	0,00133520	415,338	-95800,0	237700,0	-348,487	1148,264
-45	62,571	0,00134180	265,413	-86300,0	245700,0	-312,792	1143,619
-40	97,729	0,00134860	173,654	-76800,0	253600,0	-277,264	1141,136
-35	149,26	0,00135550	116,136	-67300,0	261600,0	-241,904	1140,235
-30	219,98	0,00136500	85,1531	-57600,0	269800,0	-213,000	1133,494
-25	343,97	0,00137300	55,5780	-48200,0	279200,0	-177,500	1141,863
-20	467,96	0,00138100	41,6753	-38800,0	285300,0	-142,000	1138,269
-15	698,61	0,00138850	28,4674	-29200,0	293200,0	-106,500	1161,755
-10	929,26	0,00139600	21,8161	-19600,0	300800,0	-71,0000	1146,557
-5	1330,55	0,00140400	15,5258	-9800,0	317600,0	-35,5000	1185,458
0	1731,85	0,00141200	12,1507	0,0	317100,0	0,0	1160,901
5	2394,43	0,00142030	8,9449298	9925,5	325175,5	35,6876	1169,069
10	3057,00	0,00142860	7,1942446	19902,1	333302,1	70,9249	1177,759
15	4103,60	0,00143643	5,4447623	29930,6	341330,6	105,734	1186,421
20	5150,20	0,00144425	4,4444444	40012,5	349412,5	140,130	1195,563
25	6578,10	0,00145296	3,4481438	50149,0	357549,0	174,136	1205,161
30	8320,60	0,00146178	2,8571429	60341,7	365741,7	207,766	1215,188
35	10639,8	0,00147059	2,2334694	70591,9	373941,9	241,042	1225,465
40	12959	0,00147951	1,8587361	80901,5	382201,5	273,975	1236,133
45	16246	0,00148887	1,490303	91272,3	390372,3	306,588	1246,710
50	19533	0,00149835	1,2578616	101706,2	398606,2	338,891	1257,659
55	23677	0,00150852	1,0382833	112205,1	406755,1	370,915	1268,523
60	28535	0,00151883	0,8896797	122771,4	414971,4	402,660	1279,742
65	34201	0,00152917	0,7435164	133407,1	423207,1	434,132	1291,149
70	40774	0,00153965	0,6459948	144114,8	431514,8	465,356	1302,890
75	48780	0,00155099	0,5476492	154897,0	439897,0	496,362	1314,975
80	56786	0,00156250	0,4793864	165756,2	448356,2	527,147	1327,374
85	67102	0,00157381	0,4062687	176695,3	456745,3	557,737	1339,672
90	77418	0,00158529	0,3552398	187717,0	465217,0	588,132	1352,279
95	90459	0,00159744	0,3054033	198824,3	473574,3	618,357	1364,656
100	103500	0,00160979	0,2700513	210020,4	482020,4	648,415	1377,344
105	119965	0,00162285	0,2332804	221308,4	490408,4	678,336	1389,958
110	136000	0,00163613	0,2069108	232691,7	498891,7	708,114	1402,881
115	156182	0,00165003	0,1813356	244173,7	507223,7	737,780	1415,482
120	175850	0,00166417	0,1623377	255758,0	515658,0	767,329	1428,400

continua...

...continuação da Tab. A.1.

T (°C)	P (Pa)	ν_L (m ³ /kg)	ν_V (m ³ /kg)	h_L (J/kg)	h_V (J/kg)	s_L (J/kg.K)	s_V (J/kg.K)
125	200278	0,00167842	0,1428272	267448,3	524048,3	796,793	1441,273
130	224100	0,00169291	0,1282216	279248,3	532548,3	826,162	1454,464
135	253253	0,00170823	0,1136245	291161,9	541011,9	855,473	1467,625
140	281700	0,00172384	0,1025957	303193,3	549593,3	884,712	1481,105
145	316157	0,00174019	0,0915062	315346,5	558046,5	913,919	1494,332
150	349800	0,00175685	0,0829187	327625,8	566625,8	943,077	1507,888
155	390115	0,00177447	0,0741916	340035,5	575185,5	972,227	1521,451
160	429500	0,00179244	0,0673854	352580,3	583880,3	1001,35	1535,35
165	476227	0,00181274	0,0606126	365264,6	592364,6	1030,49	1548,81
170	521900	0,00183352	0,0553097	378093,3	600993,3	1059,63	1562,62
175	577615	0,00185512	0,0497894	391071,1	609571,1	1088,82	1576,38
180	632100	0,00187723	0,0454545	404203,1	618303,1	1118,02	1590,49
185	692603	0,00190096	0,0411679	417494,3	626844,3	1147,28	1604,23
190	751800	0,00192530	0,0377358	430949,9	635549,9	1176,58	1618,34
195	823407	0,00195370	0,0340387	444575,2	644025,2	1205,98	1632,02
200	893500	0,00198295	0,0310463	458375,7	652675,7	1235,44	1646,09
205	975094	0,00201593	0,0279594	472356,9	660956,9	1265,02	1659,46
210	1055000	0,00205002	0,0254647	486524,6	669424,6	1294,68	1673,24
215	1147440	0,00208681	0,0230029	500884,3	677384,3	1324,49	1686,06
220	1238000	0,00212495	0,0209996	515442,2	685542,2	1354,40	1699,32
225	1338539	0,00216940	0,0191057	530127,5	692739,1	1366,003	1692,43
230	1445000	0,00221386	0,0173671	544983,2	700783,2	1392,486	1702,14
235	1562140	0,00226835	0,0156202	560023,2	710150,0	1414,612	1710,05
240	1677000	0,00232558	0,0141583	575221,6	714521,6	1444,725	1716,19
245	1807750	0,00240067	0,0126195	590624,5	724124,5	1475,064	1732,71
250	1936000	0,00248077	0,0113263	606192,8	725292,8	1496,741	1724,40
260	2225000	0,00272702	0,00883392	638114,4	730134,4	1547,864	1720,46
270	2545000	0,00344234	0,00537634	670945,8	707605,8	1598,316	1665,81
271,1	2583000	0,00421941	0,00421941	674602,6	674602,6	1603,825	1603,83

Anexo B

Resultados Experimentais
do Bocal de Aço com
0,3 mm – Bocal (R03)
(séries: Run1, Run2 e Run3)

B.1. Medição das Vazões Mássicas – Bocal R03

Os dados de referentes a vazão estão nas Tabs. B.1, B.2 e B.3 que são relativas às séries de ensaio “Run1”, “Run2” e “Run3”, respectivamente, no entanto, a metodologia de coleta de dados das vazões não é diferente em nenhuma destas séries. Nestas tabelas, os ensaios estão apresentados em ordem cronológica com o número de aquisição, seguida do código do ensaio, dia de realização, assim como, pressão e temperatura de injeção nominal. Nas colunas seguintes, estão colocados a pressão (P_0) e temperatura de injeção reais (T_0), a pressão da câmara média (P_∞) e a razão entre a pressão de vapor e pressão da câmara (R_p). A partir da décima coluna, consta o número de Reynolds, Re , que é calculado através da vazão mássica medida, $\dot{m}$, depois o coeficiente de descarga, C_D , calculado através da Eq. (B.1) cuja curva foi levantada experimentalmente, e a vazão mássica estimada, $\dot{m}_e$, que é obtida através da equação de descarga do bocal para fluidos incompressíveis representada pela Eq. (B.2). O parâmetro, P_1 , corresponde à pressão do líquido superaquecido na saída do bocal e é calculado através da Eq. (B.4) e utiliza a vazão mássica medida no ensaio.

$$C_D = 0,9673 - 5,6682/\sqrt{Re} \quad (B.1)$$

$$\dot{m}_e = C_D \cdot A_b \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_l \cdot (P_0 - P_\infty)} \quad (B.2)$$

$$Re = \frac{\rho_l \cdot u_1 \cdot D_b}{\mu} \quad (B.3)$$

$$P_1 = P_0 - \frac{1}{2 \cdot \rho_l} \left(\frac{\dot{m}}{C_D \cdot A_b} \right)^2 \quad (B.4)$$

Tabela B.1 – Tabela com os ensaios da série “RUN1” (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro).

	Código	Dia	P_{inj} (kPa)	T_{inj} (K)	P_0 (kPa)	T_0 (°C)	P_∞ (kPa)	R_P	Re	C_D	medido	estimado	P_1 (kPa)
											$\dot{m}$ (g/s)	$\dot{m}_e$ (g/s)	
1	2368m10	31-jan-01	250	368	250,6	94,7	0,13	683,4	19739	0,9269	1,1268	1,2171	37,4
2	2368500	01-fev-01	250	368	251,4	95,2	0,20	450,8	19832	0,9270	1,1277	1,2188	37,8
3	2406m17	01-fev-01	250	404	249,5	130,2	0,13	1799,4	-	-	-	-	-
4	2368100	01-fev-01	250	368	246,8	93,9	0,85	102,1	19486	0,9266	1,1194	1,2060	36,4
5	2368010	01-fev-01	250	368	250,8	95,0	9,07	9,9	19680	0,9268	1,1208	1,1951	39,8
6	2368010b	01-fev-01	250	368	250,9	94,6	9,27	9,6	19670	0,9268	1,1237	1,1951	38,8
7	2368010c	01-fev-01	250	368	250,4	95,2	9,40	9,6	19693	0,9269	1,1198	1,1932	39,7
8	2368010d	01-fev-01	250	368	250,5	94,7	9,93	8,9	19638	0,9268	1,1210	1,1923	39,4
9	2368002	01-fev-01	250	368	250,3	95,3	45,33	2,0	19236	0,9264	1,0929	1,0981	49,3
10	2368001	01-fev-01	250	368	250,0	94,6	89,99	1,0	16875	0,9236	0,9641	0,9648	92,3
11	2406m10	12-fev-01	250	404	251,4	125,0	0,18	1135,5	16890	0,9236	0,7653	1,1936	147,8
12	2406500	12-fev-01	250	404	250,1	129,0	0,38	583,1	-	-	-	-	-
13	2406m10b	15-fev-01	250	404	248,6	128,0	0,23	949,0	-	-	-	-	-
14	2406500b	15-fev-01	250	404	250,0	132,8	0,48	503,2	20832	0,9280	0,8904	1,1882	110,1
15	2349500	15-fev-01	250	349	251,7	76,2	0,16	330,6	18086	0,9251	1,1992	1,2281	13,7
16	2349100	15-fev-01	250	349	251,5	76,7	0,53	98,9	17963	0,9250	1,1860	1,2262	18,5
17	2349010	15-fev-01	250	349	249,1	76,2	6,67	7,7	17627	0,9246	1,1687	1,2046	22,7
18	2349005	15-fev-01	250	349	250,2	76,1	10,07	5,1	17632	0,9246	1,1700	1,1988	23,3
19	2404m10	16-fev-01	250	404	250,6	131,8	0,22	1086,1	15026	0,9210	0,6471	1,1823	174,8
20	2404500	16-fev-01	250	404	250,7	130,8	0,48	480,3	22090	0,9291	0,9584	1,1932	89,8
21	2404100	16-fev-01	250	404	251,3	131,1	3,30	69,6	20846	0,9280	0,9024	1,1861	108,1
22	2404010	16-fev-01	250	404	249,6	130,7	24,00	9,5	21364	0,9285	0,9276	1,1313	98,6
23	2404005	16-fev-01	250	404	252,6	129,8	43,73	5,1	18791	0,9259	0,8214	1,0855	133,3
24	2404m10b	21-fev-01	250	404	256,2	130,2	0,22	1046,2	17961	0,9250	0,7828	1,2022	147,4
25	2404500b	21-fev-01	250	404	257,1	130,9	0,48	481,4	18687	0,9258	0,8102	1,2042	140,8
26	2404010b	21-fev-01	250	404	265,7	129,4	24,00	9,2	21290	0,9284	0,9334	1,1727	113,1
27	2349001	21-fev-01	250	349	250,1	76,2	48,00	1,1	16668	0,9233	1,1051	1,0965	46,9
28	5435m10	22-fev-01	500	435	543,3	161,9	0,45	991,6	28987	0,9340	0,9954	1,7213	361,1
29	5435500	22-fev-01	500	435	504,1	159,9	0,94	458,4	27263	0,9329	0,9505	1,6589	338,2
30	5435100	22-fev-01	500	435	502,5	160,8	8,67	50,3	28035	0,9334	0,9708	1,6424	329,4
31	5435010	22-fev-01	500	435	501,9	162,6	44,93	10,1	31009	0,9351	1,0592	1,5787	296,0
32	5435005	22-fev-01	500	435	501,5	161,9	90,00	5,0	34246	0,9366	1,1760	1,5012	249,4
33	5404m10	22-fev-01	500	404	500,5	131,2	0,26	903,0	30447	0,9348	1,3170	1,7038	202,0
34	5435m10b	22-fev-01	500	435	502,1	162,1	0,55	814,6	27083	0,9328	0,9286	1,6516	342,8
35	5404500	22-fev-01	500	404	501,7	131,4	0,55	420,6	31668	0,9354	1,3678	1,7062	180,2
36	5404100	22-fev-01	500	404	501,1	131,0	2,45	93,5	32969	0,9360	1,4283	1,7036	151,4
37	5404010	22-fev-01	500	404	499,2	131,1	24,00	9,6	32608	0,9359	1,4116	1,6623	157,4
38	5404005	22-fev-01	500	404	500,7	131,0	48,00	4,8	33633	0,9363	1,4570	1,6231	137,1
39 *	5404002	22-fev-01	500	404	501,4	130,8	95,99	2,4	32429	0,9358	1,4070	1,5345	161,9

* depois do ensaio 39, foi feita a reposição do tubo de vidro graduado. A escala dos sensores ópticos de nível deste tubo que antes era de 2 ml, passa a ser de 1,90 ml.

Continuação da Tab. B.1 que possuem os ensaios da série “RUN1” (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro).

											medido	estimado	
Código	Dia	P_{inj} (kPa)	T_{inj} (K)	P_0 (kPa)	T_0 (°C)	P_∞ (kPa)	R_P	Re	C_D	$\dot{m}$ (g/s)	$\dot{m}_e$ (g/s)	P_1 (kPa)	
40	5404500b	15-mar-01	500	404	500,0	131,0	0,45	509,3	31754	0,9354	1,3757	1,7041	175,1
41	2368m10b	16-mar-01	250	368	251,3	95,5	0,14	649,6	19811	0,9270	1,1238	1,2184	39,1
42	2349500b	16-mar-01	250	349	251,8	76,6	0,18	296,0	17966	0,9250	1,1872	1,2279	18,4
43	2349001b	16-mar-01	250	349	250,7	75,7	54,00	0,9	16438	0,9230	1,0945	1,0813	51,3
44	2368001b	16-mar-01	250	368	249,8	95,0	87,06	1,0	17352	0,9242	0,9882	0,9737	84,3
45	2349_05	16-mar-01	250	349	251,3	76,5	107,99	0,5	13933	0,9192	0,9215	0,9151	108,1
46	2368_05	16-mar-01	250	368	250,0	94,5	173,99	0,5	11708	0,9149	0,6694	0,6491	171,5
47	2393m10	17-mar-01	250	393	248,7	119,7	0,19	918,6	20796	0,9279	0,9805	1,1969	82,6
48	2393500	17-mar-01	250	393	249,6	120,2	0,25	706,9	21371	0,9285	1,0038	1,1992	75,7
49	2393100	17-mar-01	250	393	249,6	120,2	1,60	110,5	20132	0,9273	0,9456	1,1944	94,7
50	2393010	17-mar-01	250	393	249,9	120,2	18,00	9,8	19573	0,9267	0,9193	1,1536	103,2
51	2393005	17-mar-01	250	393	250,0	119,7	36,00	4,8	20012	0,9272	0,9435	1,1083	95,8
52	2393002	17-mar-01	250	393	250,3	119,8	89,90	1,9	19147	0,9263	0,9021	0,9554	108,9
53	2393m10b	22-mar-01	250	393	251,3	120,6	0,22	830,1	19944	0,9271	0,9340	1,2014	100,0
54	2393800	22-mar-01	250	393	257,3	119,7	0,23	775,7	17430	0,9243	0,8218	1,2129	139,1
55	5435m10c	26-mar-01	500	435	500,9	162,0	0,40	1117,8	26295	0,9323	0,9023	1,6492	350,3

Tabela B.2 – Tabela com os ensaios da série “RUN2” (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro).

										medido	estimado		
Código	Dia	P_{inj}	T_{inj}	P_0	T_0	P_∞	R_P	Re	C_D	$\dot{m}$	$\dot{m}_e$	P_1	
		(kPa)	(K)	(kPa)	(°C)	(kPa)				(g/s)	(g/s)	(kPa)	
56	2368200	11-mar-03	250	368	250,0	94,4	0,49	181,6	19822	0,9270	1,1342	1,2151	34,1
57	2368100b	11-mar-03	250	368	250,0	95,0	0,50	179,2	-	-	-	-	-
58	2368200b	20-mar-03	250	368	252,2	95,4	0,43	213,3	20101	0,9273	1,1412	1,2204	33,6
59	2393050	24-mar-03	250	393	249,5	119,7	3,80	45,9	20507	0,9277	0,9669	1,1896	87,8
60	2349001c	27-mar-03	250	349	250,0	75,7	61,86	0,8	15836	0,9222	1,0544	1,0561	64,5
61	2368001c	27-mar-03	250	368	250,4	94,8	89,62	1,0	17144	0,9240	0,9779	0,9675	88,3
62	2393m10c	03-jun-03	250	393	251,8	121,7	0,11	1746,5	20366	0,9275	0,9459	1,2025	96,5
63	2329100	03-jun-03	250	329	250,2	56,5	0,28	100,6	15405	0,9216	1,2168	1,2316	8,2
64	2329500	06-jun-03	250	329	249,0	56,9	0,08	352,0	15381	0,9215	1,2103	1,2287	9,4
65	2329050	06-jun-03	250	329	257,2	56,3	0,49	55,8	15605	0,9219	1,2350	1,2490	8,2
66	5393m10	26-jun-03	500	393	503,3	120,6	0,26	686,5	31651	0,9354	1,4822	1,7226	131,8
67	5393010	01-jul-03	500	393	476,5	122,8	17,73	10,6	31893	0,9355	1,4691	1,6422	110,6
68	5393100	01-jul-03	500	393	485,3	122,6	1,70	110,6	30722	0,9349	1,4173	1,6856	144,3
69	5393500	01-jul-03	500	393	502,5	122,2	0,33	562,5	31638	0,9354	1,4639	1,7193	139,3
70	5393m10b	01-jul-03	500	393	501,6	123,2	0,21	928,0	31497	0,9353	1,4465	1,7166	146,4
71	5368010	03-jul-03	500	368	501,9	95,4	9,20	9,9	28859	0,9339	1,6384	1,7263	59,7
72	5368100	03-jul-03	500	368	503,4	95,4	0,96	94,9	28868	0,9339	1,6389	1,7434	61,0
73	5368500	03-jul-03	500	368	500,2	95,1	0,23	399,5	28917	0,9339	1,6455	1,7394	54,4
74	5368m10	03-jul-03	500	368	501,3	95,2	0,19	474,5	28160	0,9335	1,6012	1,7405	78,6

Tabela B.3 – Tabela com os ensaios da série “RUN3” (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro).

Experimento 2 - Fluxo Com o Orifício de Borda Livre (Régime de Ecoulement de Borda Livre)											medido	estimado	
Código	Dia	P_{inj} (kPa)	T_{inj} (K)	P_0 (kPa)	T_0 (°C)	P_∞ (kPa)	R_P	Re	C_D	$\dot{m}$ (g/s)	$\dot{m}_e$ (g/s)	P_1 (kPa)	
75	5349500	10-set-03	500	349	497,6	76,9	0,11	474,8	25779	0,9319	1,6993	1,7538	30,6
76	5349100	10-set-03	500	349	496,3	76,7	0,48	108,2	25679	0,9319	1,6955	1,7509	31,4
77	5349010	10-set-03	500	349	496,8	77,3	5,07	10,4	26125	0,9322	1,7163	1,7437	20,4
78	5329100	16-out-03	500	329	501,6	56,6	0,20	137,7	22119	0,9291	1,7455	1,7735	15,9
79	5329500	16-out-03	500	329	504,1	57,1	0,15	185,6	22221	0,9292	1,7453	1,7777	18,4
80	5329050	16-out-03	500	329	501,6	56,6	0,54	50,7	22215	0,9292	1,7531	1,7731	11,8
81	5329010	16-out-03	500	329	500,3	56,4	2,53	10,7	22095	0,9291	1,7469	1,7673	13,9
82	7451m45	21-out-03	750	451	751,6	178,1	0,13	4551,5	32378	0,9357	0,9809	1,9923	569,5
83	7451m20	21-out-03	750	451	752,4	178,9	0,29	2161,2	35370	0,9371	1,0648	1,9936	537,9
84	7451500	21-out-03	750	451	756,6	177,6	2,35	257,6	35663	0,9372	1,0846	2,0006	534,9
85	7451100	21-out-03	750	451	754,6	177,6	6,97	86,7	38541	0,9384	1,1722	1,9943	496,3
86	7451050	21-out-03	750	451	753,8	176,9	13,74	43,4	34949	0,9369	1,0688	1,9831	538,9
87	7451010	21-out-03	750	451	750,1	173,7	70,59	7,9	37262	0,9379	1,1684	1,9110	496,1
88	7435m20	22-out-03	750	435	749,2	161,8	0,48	927,4	40000	0,9389	1,3746	2,0399	409,2
89	7435m10	22-out-03	750	435	747,7	161,3	0,72	614,3	39771	0,9388	1,3720	2,0385	409,4
90	7435500	22-out-03	750	435	749,5	161,7	1,05	423,1	39431	0,9387	1,3561	2,0393	418,5
91	7435100	22-out-03	750	435	749,3	161,8	4,60	96,8	39676	0,9388	1,3635	2,0341	414,7
92	7435010	22-out-03	750	435	747,4	161,6	45,13	9,8	38575	0,9384	1,3277	1,9750	430,0
93	7404m10	24-out-03	750	404	751,9	131,7	0,18	1277,6	40148	0,9390	1,7302	2,1056	244,3
94	7404500	24-out-03	750	404	749,6	131,9	0,27	872,5	40897	0,9392	1,7599	2,1025	224,6
95	7404100	24-out-03	750	404	753,0	131,7	2,28	102,5	41217	0,9393	1,7763	2,1050	218,5
96	7404010	24-out-03	750	404	748,9	131,7	23,00	10,1	40556	0,9391	1,7478	2,0694	231,1
97	7404002	24-out-03	750	404	752,7	131,1	126,16	1,8	40437	0,9391	1,7505	1,9234	233,8
98	7393002	29-out-03	750	393	753,6	120,4	93,33	1,9	39651	0,9388	1,8596	1,9891	176,5
99	7368001	29-out-03	750	368	752,8	96,0	93,33	1,0	34821	0,9369	1,9682	2,0115	121,4
100	7368002	29-out-03	750	368	752,5	96,3	45,03	2,1	36544	0,9376	2,0601	2,0846	61,6
101	7393010	29-out-03	750	393	750,6	121,4	17,94	10,2	40138	0,9390	1,8684	2,0943	167,4
102	7393m10	29-out-03	750	393	753,2	121,1	0,20	885,8	40368	0,9390	1,8833	2,1237	161,0
103	7393500	29-out-03	750	393	752,8	121,3	0,32	573,8	39966	0,9389	1,8618	2,1224	173,8
104	7393100	29-out-03	750	393	749,9	121,0	1,80	100,2	40039	0,9389	1,8694	2,1167	166,4
105	7368100	29-out-03	750	368	752,3	96,4	0,93	101,0	36024	0,9374	2,0292	2,1477	81,6
106	7368010	29-out-03	750	368	750,1	95,7	9,00	10,2	35994	0,9374	2,0387	2,1337	73,6
107	7368m10	30-out-03	750	368	750,9	95,2	0,23	391,4	35705	0,9373	2,0302	2,1477	80,1
108	7368500	30-out-03	750	368	748,4	95,3	0,31	288,6	35398	0,9371	2,0112	2,1436	89,9
109	7393100b	30-out-03	750	393	751,9	120,9	1,79	100,5	40082	0,9389	1,8728	2,1197	166,4
110	7349500	30-out-03	750	349	750,7	77,1	0,21	241,5	32122	0,9356	2,1138	2,1623	33,5
111	7349100	30-out-03	750	349	752,5	77,0	0,54	94,7	31749	0,9354	2,0910	2,1641	50,5
112	7349050	30-out-03	750	349	749,2	76,8	0,90	57,0	31825	0,9355	2,0995	2,1591	41,6
113	7349010	30-out-03	750	349	753,0	76,2	4,90	10,2	31681	0,9354	2,1005	2,1593	45,1
114	7349002	30-out-03	750	349	747,8	76,0	24,93	2,0	31346	0,9352	2,0818	2,1224	52,3
115	7329200	31-out-03	750	329	751,1	56,4	0,22	120,2	27326	0,9330	2,1605	2,1795	13,3
116	7329500	31-out-03	750	329	752,0	56,4	0,21	130,1	27419	0,9330	2,1679	2,1810	9,2

Continuação da Tab. B.3 que possuem os ensaios da série “RUN3” (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro).

											medido	estimado	
Código	Dia	P_{inj}	T_{inj}	P_0	T_0	P_∞	R_P	Re	C_D	$\dot{m}$	$\dot{m}_e$	P_1	
		(kPa)	(K)	(kPa)	(°C)	(kPa)				(g/s)	(g/s)	(kPa)	
117	7329050	31-out-03	750	329	751,6	56,1	0,64	41,6	26920	0,9327	2,1345	2,1794	31,3
118	7329010	31-out-03	750	329	751,2	56,3	2,13	12,6	26952	0,9327	2,1330	2,1765	31,8
119	7329002	31-out-03	750	329	750,4	56,1	12,40	2,1	27078	0,9328	2,1471	2,1608	21,7
120	5349050	31-out-03	500	349	501,9	76,2	0,93	54,2	25759	0,9319	1,7079	1,7605	30,4
121	1368500	07-nov-03	125	368	123,5	94,8	0,15	582,8	14065	0,9195	0,8022	0,8543	14,7
122	1368050	07-nov-03	125	368	125,1	93,4	2,13	40,3	14250	0,9198	0,8218	0,8538	11,2
123	1368002	07-nov-03	125	368	123,5	92,6	44,00	1,9	11960	0,9154	0,6941	0,6836	41,5
124	1368002b	07-nov-03	125	368	122,9	92,7	44,66	1,9	11715	0,9149	0,6794	0,6777	44,3
125	1368002c	07-nov-03	125	368	124,5	93,8	44,66	1,9	11831	0,9151	0,6802	0,6844	45,6
126	1329500	07-nov-03	125	329	123,0	56,5	0,14	191,0	10801	0,9127	0,8532	0,8624	2,8
127	1329050	07-nov-03	125	329	122,1	56,4	0,49	54,6	10683	0,9124	0,8447	0,8578	4,2
128	1329002	07-nov-03	125	329	121,3	56,3	12,47	2,2	10215	0,9112	0,8084	0,8105	13,0
129	1349002	07-nov-03	125	349	128,0	76,3	24,47	2,1	11648	0,9147	0,7716	0,7855	28,1
130	1349500	07-nov-03	125	349	122,7	75,2	0,14	359,6	12473	0,9165	0,8340	0,8568	6,6
131	1349100	20-jan-04	125	349	124,7	76,9	0,45	114,1	12492	0,9165	0,8234	0,8620	11,3
132	1349100b	20-jan-04	125	349	124,0	77,3	0,53	98,0	-	-	-	-	-

B.2. Medição do Comprimento de Extinção do Núcleo Líquido

Na Tab. B.4, do Anexo B, são vistos os ensaios com os valores nominais de pressão e temperatura de injeção (P_0 e T_0), seguida da pressão de saturação (P_{sat}) à temperatura de injeção (T_0), pressão da câmara (P_∞) e a razão entre a pressão de saturação e a pressão de injeção (P_{sat}/P_0). O comprimento de extinção (L_E) é a próxima coluna e depois, está a razão entre a comprimento de extinção do líquido e o diâmetro do bocal (L_E/D_b).

Tabela B.4 – Relação do comprimento do núcleo líquido de cada ensaio (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro).

Ensaio	P_0 (kPa)	T_0 (°C)	P_{sat} (kPa)	P_{∞} (kPa)	P_{sat} / P_0	L_E (+/- 1mm)	L_E / D_b
run3\1329500	125	56	27,0	0,14	0,216	6,9	22,3
run3\1329050	125	56	27,0	0,50	0,216	7,5	24,2
run3\1349500	125	76	50,4	0,14	0,403	5,2	16,7
run3\1368050	125	95	85,8	1,70	0,686	3,4	11,0
run3\1368500	125	95	85,8	0,15	0,686	3,1	10,0
run2\2329500	250	56	27,7	0,08	0,111	7,6	24,6
run2\2329100	250	56	27,7	0,28	0,111	7,2	23,2
run2\2329050	250	56	27,7	0,49	0,111	7,6	24,5
run1\2349500	250	76	51,5	0,16	0,206	6,1	19,8
run1\2349500b	250	76	51,5	0,18	0,206	6,4	20,7
run1\2349100	250	76	51,5	0,53	0,206	6,3	20,4
run1\2349010	250	76	51,5	6,67	0,206	6,3	20,4
run1\2349005	250	76	51,5	10,07	0,206	6,3	20,4
run1\2368m10	250	95	89,4	0,13	0,358	4,9	15,7
run1\2368m10b	250	95	89,4	0,14	0,358	4,7	15,3
run1\2368500	250	95	89,4	0,20	0,358	4,6	14,8
run2\2368200b	250	95	89,4	0,43	0,358	4,2	13,5
run2\2368200	250	95	89,4	0,49	0,358	4,4	14,4
run1\2368100	250	95	89,4	0,85	0,358	4,7	15,2
run1\2368010	250	95	89,4	9,07	0,358	3,9	12,6
run1\2368010b	250	95	89,4	9,27	0,358	4,0	13,0
run1\2368010c	250	95	89,4	9,40	0,358	3,9	12,6
run1\2368010d	250	95	89,4	9,93	0,358	4,0	13,0
run2\2393m10c	250	120	176,5	0,11	0,706	3,0	9,7
run1\2393m10	250	120	176,5	0,19	0,706	2,9	9,4
run1\2393m10b	250	120	176,5	0,22	0,706	3,2	10,2
run1\2393800	250	120	176,5	0,23	0,706	3,2	10,4
run1\2393500	250	120	176,5	0,25	0,706	3,0	9,6
run1\2393100	250	120	176,5	1,60	0,706	3,2	10,4
run2\2393050	250	120	176,5	3,80	0,706	2,6	8,4
run1\2393005	250	120	176,5	36,0	0,706	3,4	11,0
run1\2406m10	250	131	225,4	0,18	0,902	2,9	9,5
run1\2404m10	250	131	225,4	0,22	0,902	2,2	7,3
run1\2404m10b	250	131	225,4	0,22	0,902	2,9	9,5
run1\2404500b	250	131	225,4	0,48	0,902	2,4	7,9
run1\2404500	250	131	225,4	0,48	0,902	2,4	7,8
run1\2404100	250	131	225,4	3,30	0,902	2,3	7,4
run1\2404005	250	131	225,4	43,7	0,902	2,9	9,3
run3\5329500	500	56	27,4	0,15	0,055	12,3	39,8
run3\5329100	500	56	27,4	0,20	0,055	11,6	37,5
run3\5329050	500	56	27,4	0,54	0,055	11,2	36,4
run3\5329010	500	56	27,4	2,53	0,055	11,0	35,6
run3\5349500	500	76	51,8	0,11	0,104	7,9	25,6
run3\5349100	500	76	51,8	0,48	0,104	8,1	26,4
run3\5349050	500	76	51,8	0,93	0,104	7,5	24,3
run3\5349010	500	76	51,8	5,07	0,104	7,8	25,2
run2\5368m10	500	95	90,3	0,19	0,181	5,8	18,9
run2\5368500	500	95	90,3	0,23	0,181	6,3	20,4
run2\5368100	500	95	90,3	0,96	0,181	5,5	17,7
run2\5368010	500	95	90,3	9,20	0,181	5,3	17,2
run2\5393m10b	500	120	186,0	0,21	0,372	3,8	12,2
run2\5393m10	500	120	186,0	0,26	0,372	4,2	13,6

continua...

Continuação da Tab. B.4 (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro).

Ensaio	P_0 (kPa)	T_0 (°C)	P_{sat} (kPa)	P_{∞} (kPa)	P_{sat} / P_0	L_E (+/- 1mm)	L_E / D_b
run2\5393500	500	120	186,0	0,33	0,372	3,8	12,2
run2\5393100	500	120	186,0	1,70	0,372	3,8	12,2
run2\5393010	500	120	186,0	17,7	0,372	4,2	13,6
run1\5404m10	500	131	229,6	0,26	0,459	3,7	11,9
run1\5404500b	500	131	229,6	0,45	0,459	3,7	12,0
run1\5404100	500	131	229,6	2,45	0,459	2,9	9,4
run1\5404010	500	131	229,6	24,0	0,459	3,4	11,0
run1\5435m10c	500	162	443,6	0,40	0,887	2,1	6,8
run1\5435m10	500	162	443,6	0,45	0,887	2,0	6,5
run1\5435m10b	500	162	443,6	0,55	0,887	1,9	6,2
run1\5435500	500	162	443,6	0,94	0,887	2,0	6,5
run1\5435010	500	162	443,6	44,9	0,887	2,2	7,1
run1\5435005	500	162	443,6	90,0	0,887	2,3	7,5
run3\7329500	750	56	26,8	0,21	0,036	14,5	47,2
run3\7329200	750	56	26,8	0,23	0,036	14,1	45,6
run3\7329050	750	56	26,8	0,64	0,036	14,1	45,8
run3\7329010	750	56	26,8	2,14	0,036	14,7	47,6
run3\7349500	750	76	50,9	0,22	0,068	10,2	33,0
run3\7349100	750	76	50,9	0,55	0,068	10,2	33,0
run3\7349050	750	76	50,9	1,00	0,068	10,3	33,4
run3\7349010	750	76	50,9	4,90	0,068	10,5	34,2
run3\7368m10	750	95	91,7	0,23	0,122	8,1	26,3
run3\7368500	750	95	91,7	0,32	0,122	8,0	25,9
run3\7368100	750	95	91,7	0,93	0,122	7,3	23,7
run3\7368010	750	95	91,7	9,00	0,122	6,9	22,5
run3\7393m10	750	120	180,3	0,23	0,240	5,4	17,4
run3\7393500	750	120	180,3	0,32	0,240	5,5	17,8
run3\7393100b	750	120	180,3	1,79	0,240	4,6	14,8
run3\7393010	750	120	180,3	17,94	0,240	4,5	14,6
run3\7404m10	750	131	232,7	0,18	0,310	4,8	15,7
run3\7404500	750	131	232,7	0,27	0,310	4,8	15,7
run3\7404100	750	131	232,7	2,28	0,310	4,0	13,0
run3\7404010	750	131	232,7	23,00	0,310	4,0	13,0
run3\7435m20	750	162	443,7	0,48	0,592	2,3	7,5
run3\5435m10	750	162	443,7	0,72	0,592	2,3	7,5
run3\7435500	750	162	443,7	1,05	0,592	2,4	7,8
run3\7435100	750	162	443,7	4,58	0,592	2,1	6,8
run3\7435010	750	162	443,7	45,13	0,592	2,3	7,5
run3\7451m45	750	178	599,1	0,14	0,799	1,6	5,2
run3\7451m20	750	178	599,1	0,29	0,799	1,8	5,8
run3\7451500	750	178	599,1	1,57	0,799	1,9	6,2
run3\7451100	750	178	599,1	6,97	0,799	1,7	5,5
run3\7451010	750	178	599,1	70,59	0,799	1,5	4,9

B.3. Medição das Dimensões da Estrutura da Onda de Choque

A dimensão radial da onda de choque, r_1 , e sua distância axial em relação à saída do bocal, r_2 , foram as principais medidas tomadas para análises do comportamento da onda de choque. Os valores destas dimensões estão apresentados na Tab. B.5, cujas imagens estão expostas na seção seguinte. Nesta tabela estão apresentados os ensaios seguidos da série, categoria da pressão e temperatura de injeção. Logo após estão os valores exatos da pressão e temperatura de injeção. São adquiridas várias imagens de um único ensaio e, para cada uma delas, estão correlacionadas a pressão da câmara e a razão entre as pressões de saturação e da câmara com as dimensões do raio e da distância axial da onda de choque formada naquele instante.

Tabela B.5 – Relação das dimensões da onda de choque formada como o raio, r_1 e a distancia axial, r_2 (bocal rugoso com 0,3 mm de diâmetro).

Ensaio	Série	P_{inj} (kPa)	T_{inj} (°C)	P_0 (kPa)	T_0 (°C)	Imagem	R_p	P_∞ (kPa)	r_1 (mm)	r_2 (mm)
1329050	run3	125	56	122,1	56,4	6	0,43	62,8	4,0	8,1
1329050	run3	125	56	122,1	56,4	4	0,46	58,7	3,9	7,5
1329050	run3	125	56	122,1	56,4	3	0,48	56,2	3,9	7,7
1329050	run3	125	56	122,1	56,4	2	0,51	52,9	4,1	7,7
1329050	run3	125	56	122,1	56,4	1	0,56	48,2	3,9	6,5
1329500	run3	125	56	123,0	56,5	6	0,07	387,4	13,6	10,8
1329500	run3	125	56	123,0	56,5	4	0,10	271,2	11,9	10,7
1329500	run3	125	56	123,0	56,5	3	0,13	208,6	10,1	10,7
1329500	run3	125	56	123,0	56,5	2	0,15	180,8	9,6	10,5
1329500	run3	125	56	123,0	56,5	1	0,21	129,1	8,2	10,0
1349500	run3	125	76	122,7	75,2	6	0,07	693,6	17,1	11,4
1349500	run3	125	76	122,7	75,2	4	0,10	485,5	14,1	10,0
1349500	run3	125	76	122,7	75,2	3	0,13	373,5	12,9	10,0
1349500	run3	125	76	122,7	75,2	2	0,15	323,7	12,2	9,5
1349500	run3	125	76	122,7	75,2	1	0,21	231,2	9,7	8,4
1368050	run3	125	95	123,5	94,8	8	0,08	1070,0	18,6	12,9
1368050	run3	125	95	123,5	94,8	6	0,22	389,1	12,1	8,5
1368050	run3	125	95	125,1	93,4	5	1,61	53,2	3,3	3,1
1368050	run3	125	95	125,1	93,4	2	1,64	52,2	3,3	3,1
1368050	run3	125	95	125,1	93,4	1	1,71	50,1	2,7	3,4
1368500	run3	125	95	123,5	94,8	8	0,05	1783,4	21,6	13,7
1368500	run3	125	95	123,5	94,8	7	0,14	636,9	14,7	8,8
1368500	run3	125	95	123,5	94,8	4	0,25	356,7	11,8	8,3
1368500	run3	125	95	125,1	93,4	2	1,74	51,2	2,7	3,4
1368500	run3	125	95	125,1	93,4	1	1,79	49,8	2,6	3,6
2329050	run2	250	56	257,2	56,3	6	0,40	68,3	5,6	8,4
2329050	run2	250	56	257,2	56,3	4	0,44	62,1	5,3	9,3
2329050	run2	250	56	257,2	56,3	2	0,51	53,6	5,0	8,5
2329050	run2	250	56	257,2	56,3	1	0,58	47,1	4,6	8,0
2329100	run2	250	56	250,2	56,5	6	0,17	162,8	8,6	10,1
2329100	run2	250	56	250,2	56,5	4	0,21	131,8	7,9	9,8
2329100	run2	250	56	250,2	56,5	2	0,30	92,2	6,7	8,7
2329100	run2	250	56	250,2	56,5	1	0,38	72,8	6,4	8,7
2329500	run2	250	56	249,0	56,9	6	0,05	563,2	18,1	14,3
2329500	run2	250	56	249,0	56,9	4	0,08	352,0	13,8	12,4
2329500	run2	250	56	249,0	56,9	2	0,09	312,9	11,4	12,8
2329500	run2	250	56	249,0	56,9	1	0,14	201,1	9,6	9,8
2349100	run1	250	76	251,5	76,7	4	0,43	120,8	6,8	7,2
2349100	run1	250	76	251,5	76,7	3	0,49	106,0	6,5	7,0
2349100	run1	250	76	251,5	76,7	2	0,56	92,8	5,2	7,0
2349100	run1	250	76	251,5	76,7	1	0,62	83,8	5,0	6,7
2349500	run1	250	76	251,7	76,2	4	0,07	732,0	14,7	9,7
2349500	run1	250	76	251,8	76,6	3	0,07	732,0	16,4	12,8
2349500	run1	250	76	251,7	76,2	2	0,21	244,0	9,8	9,4
2349500	run1	250	76	251,8	76,6	1	0,21	244,0	10,9	8,9
2349500b	run1	250	76	251,8	76,6	4	0,11	470,9	15,0	11,3
2349500b	run1	250	76	251,7	76,2	3	0,12	431,7	13,8	9,5
2349500b	run1	250	76	251,7	76,2	2	0,27	191,9	7,9	9,4
2349500b	run1	250	76	251,8	76,6	1	0,28	185,0	7,7	8,4
2368100	run1	250	95	246,8	93,9	4	0,74	117,3	5,5	5,6

continua...

...continuação de Tab. B.5.

Ensaio	Série	P_{inj}	T_{inj}	P_0	T_0	Imagem	R_p	P_∞	r_1	r_2
		(kPa)	(°C)	(kPa)	(°C)			(kPa)	(mm)	(mm)
2368100	run1	250	95	246,8	93,9	3	0,81	107,1	5,9	5,7
2368100	run1	250	95	246,8	93,9	2	0,89	97,5	5,1	5,1
2368100	run1	250	95	246,8	93,9	1	0,96	90,4	4,8	4,8
2368200	run2	250	95	250,0	94,4	6	0,47	187,4	6,8	6,1
2368200	run2	250	95	252,2	95,4	4	0,49	179,7	7,7	6,2
2368200	run2	250	95	252,2	95,4	3	0,53	166,2	7,7	6,1
2368200	run2	250	95	250,0	94,4	1	0,55	160,1	6,0	5,6
2368200b	run2	250	95	252,2	95,4	6	0,32	283,3	8,9	6,9
2368200b	run2	250	95	252,2	95,4	5	0,40	226,7	8,3	6,6
2368200b	run2	250	95	250,0	94,4	3	0,42	215,9	7,6	6,0
2368200b	run2	250	95	250,0	94,4	1	0,50	181,3	6,7	6,3
2368500	run1	250	95	250,6	94,7	4	0,04	2253,8	18,3	11,9
2368500	run1	250	95	250,6	94,7	3	0,14	643,9	15,7	9,9
2368500	run1	250	95	251,4	95,2	2	0,23	392,0	11,4	7,9
2368500	run1	250	95	251,4	95,2	1	0,28	322,0	9,7	6,7
2368m10	run1	250	95	251,3	95,5	4	0,06	1480,7	18,2	10,6
2368m10	run1	250	95	250,6	94,7	3	0,07	1269,1	17,0	10,7
2368m10	run1	250	95	251,4	95,2	2	0,13	683,4	14,3	9,3
2368m10	run1	250	95	251,3	95,5	1	0,17	522,6	13,9	9,1
2368m10b	run1	250	95	251,3	95,5	4	0,11	826,7	17,2	11,0
2368m10b	run1	250	95	250,6	94,7	3	0,13	699,5	16,7	10,4
2368m10b	run1	250	95	251,4	95,2	2	0,18	505,2	13,8	9,0
2368m10b	run1	250	95	251,3	95,5	1	0,22	413,4	11,7	7,8
2393100	run1	250	120	249,6	120,2	4	1,54	114,8	4,2	4,2
2393100	run1	250	120	249,6	120,2	3	1,58	111,8	4,4	4,0
2393100	run1	250	120	249,6	120,2	2	1,62	109,1	4,1	3,8
2393100	run1	250	120	249,6	120,2	1	1,66	106,5	4,1	4,0
2393500	run1	250	120	257,3	119,7	4	0,13	1359,4	13,1	9,7
2393500	run1	250	120	249,6	120,2	3	0,15	1178,1	13,3	8,6
2393500	run1	250	120	251,3	120,6	2	0,32	552,3	9,0	6,4
2393500	run1	250	120	249,6	120,2	1	0,35	504,9	10,1	5,9
2393800	run1	250	120	251,3	120,6	4	0,25	698,1	11,4	7,3
2393800	run1	250	120	257,3	119,7	3	0,26	671,3	10,6	7,2
2393800	run1	250	120	248,7	119,7	2	0,27	646,4	10,0	6,6
2393800	run1	250	120	249,6	120,2	1	0,28	623,3	11,6	7,1
2393m10	run2	250	120	251,8	121,7	4	0,12	1454,4	14,4	9,6
2393m10	run1	250	120	248,7	119,7	3	0,19	918,6	12,3	8,1
2393m10	run1	250	120	257,3	119,7	1	0,32	545,4	9,1	6,1
2393m10b	run1	250	120	248,7	119,7	4	0,11	1622,5	14,4	10,3
2393m10b	run1	250	120	251,3	120,6	3	0,11	1622,5	13,8	8,1
2393m10b	run1	250	120	257,3	119,7	2	0,19	939,4	12,0	8,7
2393m10b	run1	250	120	249,6	120,2	1	0,22	811,3	13,1	10,2
2393m10c	run2	250	120	251,8	121,7	4	0,06	3056,3	19,0	11,7
2393m10c	run1	250	120	251,3	120,6	2	0,18	1018,8	13,3	8,7
2404100	run1	250	131	251,3	131,1	4	3,26	70,5	3,2	2,7
2404100	run1	250	131	251,3	131,1	2	3,43	67,0	3,4	2,7
2404500	run1	250	131	250,7	130,8	4	0,49	465,6	8,7	5,4
2404500	run1	250	131	257,1	130,9	3	0,49	465,6	7,4	5,2
2404500b	run1	250	131	250,7	130,8	4	0,53	431,4	8,0	4,9
2404500b	run1	250	131	257,1	130,9	3	0,53	431,4	7,5	4,7
2404m10b	run1	250	131	256,2	130,2	4	0,24	937,2	11,4	6,7
2406m10	run1	250	131	251,4	125,0	4	0,16	1242,0	13,5	10,1
2406m10	run1	250	131	251,4	125,0	3	0,19	1045,9	11,6	8,7

continua...

...continuação de Tab. B.5.

Ensaio	Série	P_{inj} (kPa)	T_{inj} (°C)	P_0 (kPa)	T_0 (°C)	Imagem	R_p	P_∞ (kPa)	r_1 (mm)	r_2 (mm)
2406m10	run1	250	131	251,4	125,0	2	0,23	864,0	11,6	7,4
5329050	run3	500	56	501,6	56,6	4	0,44	62,0	5,6	12,4
5329050	run3	500	56	501,6	56,6	3	0,50	54,6	5,4	12,3
5329050	run3	500	56	501,6	56,6	2	0,57	47,9	5,0	11,6
5329050	run3	500	56	501,6	56,6	1	0,63	43,3	4,7	9,1
5329100	run3	500	56	504,1	57,1	4	0,12	227,2	14,2	18,5
5329100	run3	500	56	501,6	56,6	3	0,16	170,4	13,8	18,2
5329100	run3	500	56	504,1	57,1	2	0,24	113,6	10,1	15,1
5329100	run3	500	56	501,6	56,6	1	0,31	87,9	9,9	15,5
5329500	run3	500	56	504,1	57,1	4	0,06	465,7	18,8	20,6
5329500	run3	500	56	501,6	56,6	3	0,08	349,3	18,0	20,2
5329500	run3	500	56	504,1	57,1	2	0,18	155,2	11,8	15,9
5329500	run3	500	56	501,6	56,6	1	0,23	121,5	11,4	16,2
5349050	run3	500	76	501,9	76,2	4	0,86	58,3	4,1	7,6
5349050	run3	500	76	501,9	76,2	3	0,90	55,8	3,9	7,1
5349050	run3	500	76	501,9	76,2	2	0,95	52,8	3,8	7,6
5349050	run3	500	76	501,9	76,2	1	0,99	50,7	3,6	7,2
5349100	run3	500	76	496,3	76,7	4	0,41	126,7	10,1	10,5
5349100	run3	500	76	496,3	76,7	3	0,46	112,9	9,1	10,3
5349100	run3	500	76	496,3	76,7	2	0,51	101,8	8,5	10,4
5349100	run3	500	76	496,3	76,7	1	0,56	92,8	7,8	9,8
5349500	run3	500	76	497,6	76,9	4	0,04	1305,8	24,4	16,5
5349500	run3	500	76	497,6	76,9	3	0,09	580,3	18,2	14,5
5349500	run3	500	76	497,6	76,9	2	0,13	401,8	15,4	12,5
5349500	run3	500	76	497,6	76,9	1	0,18	290,2	13,5	11,9
5368100	run2	500	95	503,4	95,4	5	0,87	104,2	6,2	6,9
5368100	run2	500	95	503,4	95,4	4	0,91	99,6	5,9	6,8
5368100	run2	500	95	503,4	95,4	2	1,00	90,7	5,5	6,6
5368100	run2	500	95	503,4	95,4	1	1,04	87,2	5,4	6,7
5368500	run2	500	95	500,2	95,1	5	0,18	499,3	16,2	10,7
5368500	run2	500	95	501,3	95,2	4	0,19	473,1	14,6	10,1
5368500	run2	500	95	501,3	95,2	2	0,30	299,6	13,3	9,7
5368500	run2	500	95	500,2	95,1	1	0,31	289,9	13,7	9,2
5368m10	run2	500	95	501,3	95,2	5	0,08	1126,9	23,9	14,3
5368m10	run2	500	95	501,3	95,2	3	0,13	693,5	20,0	12,0
5368m10	run2	500	95	500,2	95,1	2	0,14	643,9	19,2	12,0
5368m10	run2	500	95	500,2	95,1	1	0,27	333,9	13,4	9,3
5393100	run2	500	120	485,3	122,6	5	1,67	112,3	3,1	4,1
5393100	run2	500	120	485,3	122,6	4	1,68	111,6	3,3	4,1
5393100	run2	500	120	485,3	122,6	2	1,71	109,6	3,3	4,5
5393100	run2	500	120	485,3	122,6	1	1,72	109,0	3,1	4,0
5393500	run2	500	120	503,3	120,6	5	0,25	742,6	13,8	7,4
5393500	run2	500	120	502,5	122,2	4	0,37	501,7	13,3	7,6
5393500	run2	500	120	503,3	120,6	2	0,37	501,7	12,2	6,2
5393500	run2	500	120	502,5	122,2	1	0,42	442,0	14,0	7,3
5393m10	run2	500	120	501,6	123,2	5	0,16	1115,5	19,7	11,0
5393m10	run2	500	120	502,5	122,2	4	0,24	743,7	17,5	9,8
5393m10	run2	500	120	501,6	123,2	2	0,25	713,9	14,3	8,1
5393m10	run2	500	120	502,5	122,2	1	0,29	615,4	15,3	7,6
5393m10b	run2	500	120	501,6	123,2	4	0,11	1729,4	22,3	12,4
5393m10b	run2	500	120	503,3	120,6	3	0,20	951,2	15,3	8,4
5393m10b	run2	500	120	501,6	123,2	2	0,21	905,9	15,8	8,6
5393m10b	run2	500	120	503,3	120,6	1	0,32	594,5	12,9	6,8
5404100	run1	500	131	501,1	131,0	4	2,34	97,9	3,9	3,7
5404100	run1	500	131	501,1	131,0	3	2,41	95,1	3,7	3,8
5404100	run1	500	131	501,1	131,0	2	2,49	92,0	3,7	4,2

continua...

...continuação de Tab. B.5.

Ensaio	Série	P_{inj} (kPa)	T_{inj} (°C)	P_0 (kPa)	T_0 (°C)	Imagem	R_p	P_∞ (kPa)	r_1 (mm)	r_2 (mm)
5404100	run1	500	131	501,1	131,0	1	2,56	89,5	3,7	4,5
5404500b	run1	500	131	500,0	131,0	4	0,34	674,1	14,0	7,4
5404500b	run1	500	131	500,0	131,0	3	0,41	559,0	13,7	7,7
5404500b	run1	500	131	500,0	131,0	2	0,49	467,7	10,9	5,9
5404500b	run1	500	131	500,0	131,0	1	0,56	409,3	10,2	5,6
5404m10	run1	500	131	500,5	131,2	4	0,28	822,4	13,0	7,4
5404m10	run1	500	131	500,5	131,2	3	0,33	697,8	11,9	6,3
5435500	run1	500	162	504,1	159,9	4	0,89	481,6	7,5	4,3
5435500	run1	500	162	504,1	159,9	3	0,92	465,9	7,5	4,6
5435500	run1	500	162	504,1	159,9	2	0,95	451,2	7,2	4,9
5435500	run1	500	162	504,1	159,9	1	0,98	437,4	7,0	4,3
5435m10	run1	500	162	543,3	161,9	4	0,41	1088,4	11,2	5,7
5435m10	run1	500	162	500,9	162,0	3	0,43	1037,8	10,4	5,2
5435m10	run1	500	162	502,1	162,1	2	0,44	1014,2	10,3	6,2
5435m10	run1	500	162	502,1	162,1	1	0,59	756,3	10,3	5,9
5435m10b	run1	500	162	543,3	161,9	4	0,44	1018,3	10,9	5,5
5435m10b	run1	500	162	543,3	161,9	3	0,46	974,0	9,7	5,5
5435m10b	run1	500	162	543,3	161,9	2	0,49	914,3	9,0	5,2
5435m10b	run1	500	162	502,1	162,1	1	0,51	878,5	10,3	6,3
5435m10c	run1	500	162	500,9	162,0	4	0,33	1354,9	10,9	6,0
5435m10c	run1	500	162	500,9	162,0	3	0,38	1176,7	10,5	6,4
5435m10c	run1	500	162	500,9	162,0	2	0,48	931,5	9,7	4,9
5435m10c	run1	500	162	502,1	162,1	1	0,66	677,5	9,2	5,1
7329050	run3	750	56	751,6	56,1	4	0,54	49,2	5,0	16,6
7329050	run3	750	56	751,6	56,1	3	0,61	43,6	4,8	16,0
7329050	run3	750	56	751,6	56,1	2	0,67	39,7	4,3	16,0
7329050	run3	750	56	751,6	56,1	1	0,74	35,9	4,3	15,1
7329200	run3	750	56	752,0	56,4	4	0,17	158,8	13,3	20,9
7329200	run3	750	56	751,1	56,4	3	0,19	142,1	11,5	19,4
7329200	run3	750	56	751,1	56,4	2	0,26	103,8	9,4	16,9
7329200	run3	750	56	752,0	56,4	1	0,33	81,8	9,2	18,0
7329500	run3	750	56	752,0	56,4	4	0,09	299,9	17,3	23,9
7329500	run3	750	56	751,1	56,4	3	0,12	224,9	14,4	21,7
7329500	run3	750	56	752,0	56,4	2	0,25	108,0	10,9	19,0
7329500	run3	750	56	751,1	56,4	1	0,33	81,8	8,0	16,9
7349050	run3	750	76	749,2	76,8	4	0,91	56,2	4,9	10,2
7349050	run3	750	76	749,2	76,8	3	0,97	52,8	4,9	10,6
7349050	run3	750	76	749,2	76,8	2	1,03	49,7	4,6	10,3
7349050	run3	750	76	749,2	76,8	1	1,09	47,0	4,5	10,5
7349100	run3	750	76	752,5	77,0	4	0,45	114,5	8,6	11,6
7349100	run3	750	76	752,5	77,0	3	0,51	101,0	8,1	12,9
7349100	run3	750	76	752,5	77,0	2	0,58	88,8	7,7	12,5
7349100	run3	750	76	752,5	77,0	1	0,64	80,5	7,0	11,7
7349500	run3	750	76	750,7	77,1	4	0,11	469,9	18,9	17,8
7349500	run3	750	76	750,7	77,1	3	0,18	287,2	14,7	16,0
7349500	run3	750	76	750,7	77,1	2	0,25	206,8	12,9	14,8
7349500	run3	750	76	750,7	77,1	1	0,32	161,5	11,4	13,2
7368100	run3	750	95	752,3	96,4	4	0,82	113,9	7,0	8,9
7368100	run3	750	95	752,3	96,4	3	0,89	104,9	6,5	8,5
7368100	run3	750	95	752,3	96,4	2	0,96	97,3	6,2	8,5
7368100	run3	750	95	752,3	96,4	1	1,03	90,7	6,0	8,2
7368500	run3	750	95	748,4	95,3	4	0,19	476,2	17,4	12,1
7368500	run3	750	95	750,9	95,2	3	0,20	452,4	16,8	12,5
7368500	run3	750	95	748,4	95,3	2	0,36	251,3	13,6	12,0
7368500	run3	750	95	748,4	95,3	1	0,44	205,6	12,0	10,7

continua...

...continuação de Tab. B.5.

Ensaio	Série	P_{inj} (kPa)	T_{inj} (°C)	P_0 (kPa)	T_0 (°C)	Imagem	R_p	P_∞ (kPa)	r_1 (mm)	r_2 (mm)
7368m10	run3	750	95	750,9	95,2	4	0,13	693,9	19,9	13,4
7368m10	run3	750	95	748,4	95,3	3	0,27	334,1	15,3	11,6
7368m10	run3	750	95	750,9	95,2	2	0,27	334,1	14,4	10,8
7368m10	run3	750	95	750,9	95,2	1	0,34	265,3	13,1	10,5
7393100b	run3	750	120	751,9	120,9	4	1,69	106,4	5,2	5,6
7393100b	run3	750	120	751,9	120,9	3	1,76	102,2	5,0	5,3
7393100b	run3	750	120	751,9	120,9	2	1,83	98,3	5,3	5,6
7393100b	run3	750	120	751,9	120,9	1	1,90	94,6	5,0	5,4
7393500	run3	750	120	752,8	121,3	4	0,19	955,8	18,9	10,2
7393500	run3	750	120	753,2	121,1	3	0,20	908,1	21,7	11,4
7393500	run3	750	120	752,8	121,3	2	0,36	504,5	14,8	8,3
7393500	run3	750	120	752,8	121,3	1	0,44	412,8	13,8	8,1
7393m10	run3	750	120	753,2	121,1	4	0,13	1390,1	25,4	13,9
7393m10	run3	750	120	752,8	121,3	3	0,27	669,3	16,9	9,1
7393m10	run3	750	120	753,2	121,1	2	0,27	669,3	18,7	10,2
7393m10	run3	750	120	753,2	121,1	1	0,34	531,5	15,7	9,1
7404100	run3	750	131	753,0	131,7	4	2,17	107,5	4,8	4,7
7404100	run3	750	131	753,0	131,7	3	2,24	104,1	4,8	4,7
7404100	run3	750	131	753,0	131,7	2	2,31	100,9	4,7	4,6
7404100	run3	750	131	753,0	131,7	1	2,38	98,0	4,4	4,3
7404500	run3	750	131	749,6	131,9	4	0,17	1378,0	20,1	10,7
7404500	run3	750	131	751,9	131,7	3	0,21	1115,5	19,7	9,9
7404500	run3	750	131	749,6	131,9	2	0,30	780,9	15,8	8,7
7404500	run3	750	131	749,6	131,9	1	0,36	650,7	14,9	8,3
7404m10	run3	750	131	751,9	131,7	4	0,09	2590,8	26,6	14,9
7404m10	run3	750	131	751,9	131,7	3	0,15	1554,5	22,2	11,8
7404m10	run3	750	131	749,6	131,9	2	0,23	1013,8	17,5	9,2
7404m10	run3	750	131	751,9	131,7	1	0,27	863,6	17,2	9,4
7435100	run3	750	162	749,3	161,8	4	4,47	99,6	3,2	3,0
7435100	run3	750	162	749,3	161,8	3	4,54	98,0	3,2	2,7
7435100	run3	750	162	749,3	161,8	2	4,62	96,3	3,1	3,0
7435100	run3	750	162	749,3	161,8	1	4,69	94,9	3,0	2,7
7435500	run3	750	162	749,5	161,7	4	0,89	499,2	9,7	4,4
7435500	run3	750	162	749,5	161,7	3	1,00	444,3	9,7	4,5
7435500	run3	750	162	749,5	161,7	2	1,11	400,2	8,7	4,2
7435500	run3	750	162	749,5	161,7	1	1,22	364,1	8,9	4,4
7435m10	run3	750	162	747,7	161,3	4	0,62	710,9	11,4	5,7
7435m10	run3	750	162	747,7	161,3	3	0,69	638,8	11,5	5,2
7435m10	run3	750	162	747,7	161,3	2	0,75	587,7	10,0	5,4
7435m10	run3	750	162	747,7	161,3	1	0,82	537,5	10,2	5,1
7435m20	run3	750	162	749,2	161,8	4	0,40	1112,8	13,2	7,0
7435m20	run3	750	162	749,2	161,8	3	0,45	989,2	13,6	5,9
7435m20	run3	750	162	749,2	161,8	2	0,51	872,8	12,5	6,1
7435m20	run3	750	162	749,2	161,8	1	0,56	794,9	11,9	5,4
7451500	run3	750	178	756,6	177,6	4	1,50	402,8	6,3	3,3
7451500	run3	750	178	756,6	177,6	3	1,54	392,3	6,7	3,1
7451500	run3	750	178	756,6	177,6	2	1,59	380,0	6,1	3,3
7451500	run3	750	178	756,6	177,6	1	1,63	370,7	6,0	2,8
7451m20	run3	750	178	752,4	178,9	4	0,23	2692,1	15,8	8,8
7451m20	run3	750	178	752,4	178,9	3	0,27	2293,3	15,0	8,3
7451m20	run3	750	178	752,4	178,9	2	0,31	1997,4	13,5	7,9
7451m20	run3	750	178	752,4	178,9	1	0,35	1769,1	13,5	6,8
7451m45	run3	750	178	751,6	178,1	4	0,04	15247,5	28,5	18,3
7451m45	run3	750	178	751,6	178,1	3	0,08	7623,8	25,2	14,8
7451m45	run3	750	178	751,6	178,1	2	0,12	5082,5	22,2	12,5
7451m45	run3	750	178	751,6	178,1	1	0,15	4066,0	20,0	11,0

B.4. Imagens dos Ensaios Realizados com Iso-octano

A seguir são mostradas as imagens dos ensaios realizados utilizando a mesma substância iso-octano. A primeira, da seqüência de imagens apresentada em cada ensaio, refere-se a uma das originais adquiridas através do método “Schlieren” e a escala dimensional de 50 mm (ver Fig. B.1) é tomada através da plataforma que está na saída do bocal, conforme também foi exemplificado neste primeiro ensaio (2349_05). Apenas poucas imagens têm uma escala indicativa. Isto deve ocorrer quando a onda de choque pouco se destaca, não permitindo ao leitor comparar visualmente o tamanho da onda de choque com a referência dimensional que é o corpo do injetor (indicada na Fig. B.1). Para um valor mais exato do tamanho da onda de choque, a Tab. B.5, seção anterior, mostra estes valores de forma mais detalhada.

Dentro de cada ensaio, existem outras imagens que são aquelas tratadas matematicamente com filtro subtrativo e submetidas ao mapa de cor que melhor realça os fenômenos envolvidos. As informações de pressão (P_0) e temperatura (T_0) de injeção do ensaio, assim como, a pressão média da câmara (P_∞) onde é descarregado o jato e a razão entre pressões de saturação e pressão média da câmara (R_p). A vazão mássica ($\dot{m}$) também é acrescentado em cada ensaio, seguido da velocidade do jato (u_1) na saída do bocal, assim como sua pressão de líquido metaestável (P_1) calculada através da vazão obtida, considerando como incompressível.

Figura B.1 – Ilustração da referência dimensional para todos os ensaios.

2349_05

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$P_0 = 251,3$ kPa
 $T_0 = 76,5$ °C
 $P_\infty = 108$ kPa
 $P_{\text{sat}} = 51,2$ kPa
 $R_p = 0,5$ *

$\dot{m} = 0,9215$ g/s
 $u_1 = 19,35$ m/s
 $P_1 = 108,1$ kPa

* Obs: este enquadramento mostra que a evaporação ao longo do jato é imperceptível. Este é um caso onde a pressão de vapor é menor que a pressão da câmara.

2349001

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$P_0 = 250,1$ kPa
 $T_0 = 76,2$ °C
 $P_\infty = 48,00$ kPa
 $P_{\text{sat}} = 51,2$ kPa
 $R_p = 1,1$ *

$\dot{m} = 1,1051$ g/s
 $u_1 = 23,19$ m/s
 $P_1 = 46,9$ kPa

* Obs: este enquadramento mostra que já existe uma evaporação ao longo do jato. Este é um caso onde a pressão de vapor é igual à pressão da câmara.

2349001b

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 250,7 \text{ kPa} \\
 T_0 &= 75,7 \text{ }^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 54,00 \text{ kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 50,5 \text{ kPa} \\
 R_p &= 0,9
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 1,0945 \text{ g/s} \\
 u_1 &= 22,96 \text{ m/s} \\
 P_1 &= 51,3 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

Obs: semelhante ao ensaio anterior.

2349005

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 250,2 \text{ kPa} \\
 T_0 &= 76,1 \text{ }^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 10,07 \text{ kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 51,1 \text{ kPa} \\
 R_p &= 5,1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 1,1700 \text{ g/s} \\
 u_1 &= 24,55 \text{ m/s} \\
 P_1 &= 23,3 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

Obs: em relação ao anterior a taxa de evaporação é maior e já existe a formação do núcleo líquido.

2349010

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 249,1 \text{ kPa} \\
 T_0 &= 76,2 \text{ }^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 6,67 \text{ kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 51,2 \text{ kPa} \\
 R_p &= 7,7
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 1,1687 \text{ g/s} \\
 u_1 &= 24,53 \text{ m/s} \\
 P_1 &= 22,7 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

2349100

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 251,5 & \text{kPa} \\
 T_0 &= 76,7 & ^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 0,53 & \text{kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 51,9 & \text{kPa} \\
 R_p &= 98,9
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 1,1860 & \text{g/s} \\
 u_1 &= 24,90 & \text{m/s} \\
 P_1 &= 18,5 & \text{kPa}
 \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: arcir).

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

Obs.:

- o tratamento acima destaca melhor o campo de densidade do fluido ao redor do jato.
- já é possível ver a onda de choque formada com este valor de R_p , diferente dos anteriores.

2349500

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 251,7 & \text{kPa} \\
 T_0 &= 76,2 & ^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 0,16 & \text{kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 51,2 & \text{kPa} \\
 R_p &= 330,6
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 1,1992 & \text{g/s} \\
 u_1 &= 25,17 & \text{m/s} \\
 P_1 &= 13,7 & \text{kPa}
 \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

c) Imagem tratada (mapa de cores: arcir).

2349500b

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$P_0 = 251,8$ kPa

$T_0 = 76,6$ °C

$P_\infty = 0,18$ kPa

$P_{\text{sat}} = 51,8$ kPa

$R_p = 296,0$

$\dot{m} = 1,1872$ g/s

$u_1 = 24,93$ m/s

$P_1 = 18,4$ kPa

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: arcir)

2349m10

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$P_0 = 250$ kPa

$T_0 = 76$ °C

$P_\infty = 0,05$ kPa

$P_{\text{sat}} = 50$ kPa

$R_p = 1000$

$\dot{m} = --$ g/s

$u_1 = --$ m/s

$P_1 = --$ kPa

a) esta é a segunda imagem original. Neste caso, como houve presença de vapor no injetor, houve a formação do disco de Mach.

c) é a quinta imagem adquirida, após 2 segundos de injeção. Somente neste instante foi injetado o fluido com fase líquida.

b) Imagem “a” é tratada para destacar o disco de Mach formado pelo vapor.

d) esta é a imagem “c” tratada.

* Obs.: Este ensaio não obteve sucesso na aquisição dos dados da vazão.

2368_05

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 250,0 \text{ kPa} \\
 T_0 &= 94,5 \text{ }^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 174,0 \text{ kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 88,3 \text{ kPa} \\
 R_p &= 0,5 \text{ *}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 0,6694 \text{ g/s} \\
 u_1 &= 14,30 \text{ m/s} \\
 P_1 &= 171,5 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

* Obs: este enquadramento mostra que, praticamente, não há evaporação ao longo do jato. Este é um caso onde a pressão de vapor é menor que a pressão da câmara.

2368001

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 250,0 \text{ kPa} \\
 T_0 &= 94,6 \text{ }^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 89,99 \text{ kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 88,6 \text{ kPa} \\
 R_p &= 1,0 \text{ *}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 0,9641 \text{ g/s} \\
 u_1 &= 20,59 \text{ m/s} \\
 P_1 &= 92,3 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

a) Imagem representativa. Esta imagem registrou a fase inicial do jato.

b) Imagem representativa. Imagem após 0,5 s da imagem anterior.

* A pressão de vapor é igual à pressão da câmara proporcionando uma evaporação ao redor do jato.

2368001b

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 249,8 \text{ kPa} \\
 T_0 &= 95,0 \text{ }^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 87,06 \text{ kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 89,6 \text{ kPa} \\
 R_p &= 1,0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 0,9882 \text{ g/s} \\
 u_1 &= 21,12 \text{ m/s} \\
 P_1 &= 84,3 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

2368002

(bocal rugoso; 0,3 mm)

 $P_0 = 250,3$ kPa
 $T_0 = 95,3$ °C
 $P_\infty = 45,33$ kPa
 $P_{\text{sat}} = 90,4$ kPa
 $R_p = 2,0$
 $\dot{m} = 1,0929$ g/s
 $u_1 = 23,36$ m/s
 $P_1 = 49,3$ kPa

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

2368010

(bocal rugoso; 0,3 mm)

 $P_0 = 250,8$ kPa
 $T_0 = 95,0$ °C
 $P_\infty = 9,07$ kPa
 $P_{\text{sat}} = 89,6$ kPa
 $R_p = 9,9$
 $\dot{m} = 1,1208$ g/s
 $u_1 = 23,95$ m/s
 $P_1 = 39,8$ kPa

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

2368010b

(bocal rugoso; 0,3 mm)

 $P_0 = 250,9$ kPa
 $T_0 = 94,6$ °C
 $P_\infty = 9,27$ kPa
 $P_{\text{sat}} = 88,6$ kPa
 $R_p = 9,6$
 $\dot{m} = 1,1237$ g/s
 $u_1 = 24,00$ m/s
 $P_1 = 38,8$ kPa

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

2368010c

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned} P_0 &= 250,4 \text{ kPa} \\ T_0 &= 95,2 \text{ }^\circ\text{C} \\ P_\infty &= 9,40 \text{ kPa} \\ P_{\text{sat}} &= 90,2 \text{ kPa} \\ R_p &= 9,6 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{m} &= 1,1198 \text{ g/s} \\ u_1 &= 23,93 \text{ m/s} \\ P_1 &= 39,7 \text{ kPa} \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

2368010d

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned} P_0 &= 250,5 \text{ kPa} \\ T_0 &= 94,7 \text{ }^\circ\text{C} \\ P_\infty &= 9,93 \text{ kPa} \\ P_{\text{sat}} &= 88,8 \text{ kPa} \\ R_p &= 8,9 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{m} &= 1,1210 \text{ g/s} \\ u_1 &= 23,95 \text{ m/s} \\ P_1 &= 39,4 \text{ kPa} \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

Obs.: Este é o último ensaio de uma seqüência de quatro. Nestes casos, é notada a repetibilidade dos dados obtidos como de vazão mássica, velocidade e pressão metaestável do líquido, assim como, existe uma semelhança no perfil do escoamento.

2368100

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned} P_0 &= 246,8 \text{ kPa} \\ T_0 &= 93,9 \text{ }^\circ\text{C} \\ P_\infty &= 0,85 \text{ kPa} \\ P_{\text{sat}} &= 86,8 \text{ kPa} \\ &= 102,1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_p &= \\ &= 1,1194 \text{ g/s} \\ \dot{m} &= 23,89 \text{ m/s} \\ u_1 &= 36,4 \text{ kPa} \\ P_1 &= \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: hsv).

Obs.: Neste ensaio, houve a formação da onda de choque devido à baixa pressão da câmara, no entanto, também é observável a repetibilidade dos dados obtidos, em relação ao último ensaio visto antes deste.

2368500

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 251,4 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 95,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,20 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 90,2 \text{ kPa}$$

$$R_p = 450,8$$

$$\dot{m} = 1,1277 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 24,10 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 37,8 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: jet)

Obs.: A imagem ao lado melhor destaca a onda de choque e o núcleo de líquido.

2368m10

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 250,6 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 94,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,13 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 88,8 \text{ kPa}$$

$$R_p = 683,4$$

$$\dot{m} = 1,1268 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 24,07 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 37,4 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

2368m10b

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 251,3 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 95,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,14 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 90,9 \text{ kPa}$$

$$R_p = 649,6$$

$$\dot{m} = 1,1238 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 24,03 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 39,1 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

2393002

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 250,3 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 119,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 89,90 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 175,0 \text{ kPa}$$

$$R_p = 1,9$$

$$\dot{m} = 0,9021 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 19,82 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 108,9 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa. (0,5 s após a abertura do injetor).

b) outra imagem original (1 s após a imagem anterior).

* Nestas duas fotografias, são observadas nucleações que quebram o filete líquido do jato.

2393005

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 250,0 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 119,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 36,00 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 174,5 \text{ kPa}$$

$$R_p = 4,8$$

$$\dot{m} = 0,9435 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 20,73 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 95,8 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

2393010

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 249,9 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 120,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 18,00 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 176,7 \text{ kPa}$$

$$R_p = 9,8$$

$$\dot{m} = 0,9193 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 20,21 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 103,2 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

2393100

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 249,6 && \text{kPa} \\
 T_0 &= 120,2 && ^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 1,60 && \text{kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 176,7 && \text{kPa} \\
 R_p &= 110,5
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 0,9456 && \text{g/s} \\
 u_1 &= 20,79 && \text{m/s} \\
 P_1 &= 94,7 && \text{kPa}
 \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

2393500

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 249,6 && \text{kPa} \\
 T_0 &= 120,2 && ^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 0,25 && \text{kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 176,7 && \text{kPa} \\
 R_p &= 706,9
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 1,0038 && \text{g/s} \\
 u_1 &= 22,07 && \text{m/s} \\
 P_1 &= 75,7 && \text{kPa}
 \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: arcir).

2393800

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 257,3 && \text{kPa} \\
 T_0 &= 119,7 && ^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 0,23 && \text{kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 174,5 && \text{kPa} \\
 R_p &= 775,7
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 0,8218 && \text{g/s} \\
 u_1 &= 18,05 && \text{m/s} \\
 P_1 &= 139,1 && \text{kPa}
 \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

2393m10

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 248,7 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 119,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,19 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 174,5 \text{ kPa}$$

$$R_p = 918,6$$

$$\dot{m} = 0,9805 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 21,54 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 82,6 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

2393m10b

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 251,3 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 120,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,22 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 178,5 \text{ kPa}$$

$$R_p = 830,1$$

$$\dot{m} = 0,9340 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 20,54 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 100,0 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

* Obs.: este ensaio ocorreu na etapa inicial, onde era necessário ajustes da bancada.

2404005

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 252,6 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 129,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 43,73 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 222,8 \text{ kPa}$$

$$R_p = 5,1$$

$$\dot{m} = 0,8214 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 18,30 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 133,3 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: hsv).

2404010

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 249,6 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 130,7 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 24,00 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 227,6 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 9,5$$

$$\dot{m} = 0,9276 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 20,70 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 98,6 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) outra imagem original (após 1 s).

* Obs.: Em alguns jatos que não formaram um escoamento supersônico visível devido ao valor ainda alto pressão da câmara, é observado um escoamento sem simetria.

2404010b

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 265,7 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 129,4 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 24,00 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 220,7 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 9,2$$

$$\dot{m} = 0,9334 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 20,79 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 113,1 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

* Obs.: Idem ao caso anterior.

2404100

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 251,3 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 131,1 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 3,30 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 229,7 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 69,6$$

$$\dot{m} = 0,9024 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 20,15 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 108,1 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada proporcionando a característica de relevo. Com isto, é possível observar a onda de choque com raio de 3 mm.

2404500

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 250,7 \text{ kPa} \\
 T_0 &= 130,8 \text{ }^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 0,48 \text{ kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 228,1 \text{ kPa} \\
 R_p &= 480,3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 0,9584 \text{ g/s} \\
 u_1 &= 21,39 \text{ m/s} \\
 P_1 &= 89,8 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

2404500b

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 257,1 \text{ kPa} \\
 T_0 &= 130,9 \text{ }^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 0,48 \text{ kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 228,7 \text{ kPa} \\
 R_p &= 481,4
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 0,8102 \text{ g/s} \\
 u_1 &= 18,08 \text{ m/s} \\
 P_1 &= 140,8 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

2404m10

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 250,6 \text{ kPa} \\
 T_0 &= 131,8 \text{ }^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 0,22 \text{ kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 233,5 \text{ kPa} \\
 R_p &= 1086,1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 0,6471 \text{ g/s} \\
 u_1 &= 14,46 \text{ m/s} \\
 P_1 &= 174,8 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

2404m10b

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned} P_0 &= 256,2 \text{ kPa} \\ T_0 &= 130,2 \text{ }^\circ\text{C} \\ P_\infty &= 0,22 \text{ kPa} \\ P_{\text{sat}} &= 224,9 \text{ kPa} \\ R_p &= 1046,2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{m} &= 0,7828 \text{ g/s} \\ u_1 &= 17,45 \text{ m/s} \\ P_1 &= 147,4 \text{ kPa} \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

2406500

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned} P_0 &= 250,1 \text{ kPa} \\ T_0 &= 129,0 \text{ }^\circ\text{C} \\ P_\infty &= 0,38 \text{ kPa} \\ P_{\text{sat}} &= 218,7 \text{ kPa} \\ R_p &= 583,1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{m} &= -- \text{ g/s} \\ u_1 &= -- \text{ m/s} \\ P_1 &= -- \text{ kPa} \end{aligned}$$

a) o gráfico deste ensaio.

Observações:

- Não foi obtido sucesso neste ensaio. O fluido começou a vaporizar internamente na câmara do injetor, antes da injeção. A temperatura de injeção (linha vermelha) não mantém um patamar constante.
 - Também não há registro fotográfico do jato.
-

2406500b

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$P_0 = 250,0 \text{ kPa}$

$T_0 = 132,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_{\infty} = 0,48 \text{ kPa}$

$P_{\text{sat}} = 239,0 \text{ kPa}$

$R_p = 503,2$

$\dot{m} = 0,8904 \text{ g/s}$

$u_1 = 19,93 \text{ m/s}$

$P_1 = 110,1 \text{ kPa}$

a) o gráfico deste ensaio.

Observações:

- Diferente do anterior, este ensaio apresenta condições de injeção constantes, e a vazão mantém uma regularidade (linha preta).
- Este ensaio também não possui registro fotográfico do jato.

2406m10

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$P_0 = 251,4 \text{ kPa}$

$T_0 = 125,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_{\infty} = 0,18 \text{ kPa}$

$P_{\text{sat}} = 198,7 \text{ kPa}$

$R_p = 1135,5$

$\dot{m} = 0,7653 \text{ g/s}$

$u_1 = 16,93 \text{ m/s}$

$P_1 = 147,8 \text{ kPa}$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

c) Imagem da abertura do injetor.

d) Imagem "c" tratada.

*Obs.: Neste caso (imagem "c"), foi possível registrar uma fotografia do instante inicial do jato. Neste momento o vapor formado pelo recuo da haste do injetor está sendo expulso. A imagem "a" mostra o jato em regime permanente e foi adquirida 0,5 s após este transitório.

5404002

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned} P_0 &= 501,4 \text{ kPa} \\ T_0 &= 130,8 \text{ }^\circ\text{C} \\ P_\infty &= 96,0 \text{ kPa} \\ P_{\text{sat}} &= 228,1 \text{ kPa} \\ R_p &= 2,4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{m} &= 1,4070 \text{ g/s} \\ u_1 &= 31,40 \text{ m/s} \\ P_1 &= 161,9 \text{ kPa} \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

5404005

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned} P_0 &= 500,7 \text{ kPa} \\ T_0 &= 131,0 \text{ }^\circ\text{C} \\ P_\infty &= 48,0 \text{ kPa} \\ P_{\text{sat}} &= 229,2 \text{ kPa} \\ R_p &= 4,8 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{m} &= 1,4570 \text{ g/s} \\ u_1 &= 32,53 \text{ m/s} \\ P_1 &= 137,1 \text{ kPa} \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

5404010

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned} P_0 &= 499,2 \text{ kPa} \\ T_0 &= 131,1 \text{ }^\circ\text{C} \\ P_\infty &= 24,0 \text{ kPa} \\ P_{\text{sat}} &= 229,7 \text{ kPa} \\ R_p &= 9,6 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{m} &= 1,4116 \text{ g/s} \\ u_1 &= 31,52 \text{ m/s} \\ P_1 &= 157,4 \text{ kPa} \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: arcir).

5404100

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$P_0 = 501,1 \text{ kPa}$

$T_0 = 131,0 \text{ }^\circ\text{C}$

$P_\infty = 2,45 \text{ kPa}$

$P_{\text{sat}} = 229,2 \text{ kPa}$

$R_p = 93,5$

$\dot{m} = 1,4283 \text{ g/s}$

$u_1 = 31,88 \text{ m/s}$

$P_1 = 151,4 \text{ kPa}$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

5404500

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$P_0 = 501,7 \text{ kPa}$

$T_0 = 131,4 \text{ }^\circ\text{C}$

$P_\infty = 0,55 \text{ kPa}$

$P_{\text{sat}} = 231,4 \text{ kPa}$

$R_p = 420,6$

$\dot{m} = 1,3678 \text{ g/s}$

$u_1 = 30,55 \text{ m/s}$

$P_1 = 180,2 \text{ kPa}$

a) gráfico do ensaio.

Obs: Este ensaio não possui registro fotográfico do jato.

5404500b

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$P_0 = 500,0 \text{ kPa}$

$T_0 = 131,0 \text{ }^\circ\text{C}$

$P_\infty = 0,45 \text{ kPa}$

$P_{\text{sat}} = 229,2 \text{ kPa}$

$R_p = 509,3$

$\dot{m} = 1,3757 \text{ g/s}$

$u_1 = 30,71 \text{ m/s}$

$P_1 = 175,1 \text{ kPa}$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: arcir).

5404m10

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 500,5 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 131,2 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 0,26 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 230,3 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 903,0$$

$$\dot{m} = 1,3170 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 29,41 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 202,0 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: arcir).

5435005

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 501,5 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 161,9 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 90,0 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 446,2 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 5,0$$

$$\dot{m} = 1,1760 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 27,89 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 249,4 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

5435010

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 501,9 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 162,6 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 44,9 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 452,5 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 10,1$$

$$\dot{m} = 1,0592 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 25,17 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 296,0 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

5435100

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned} P_0 &= 502,5 \text{ kPa} \\ T_0 &= 160,8 \text{ }^\circ\text{C} \\ P_\infty &= 8,67 \text{ kPa} \\ P_{\text{sat}} &= 436,5 \text{ kPa} \\ R_p &= 50,3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{m} &= 0,9708 \text{ g/s} \\ u_1 &= 22,97 \text{ m/s} \\ P_1 &= 329,4 \text{ kPa} \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

Obs: Provavelmente exista a onda de choque formada, mas não é identificável na imagem.

5435500

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned} P_0 &= 504,1 \text{ kPa} \\ T_0 &= 159,9 \text{ }^\circ\text{C} \\ P_\infty &= 0,94 \text{ kPa} \\ P_{\text{sat}} &= 428,6 \text{ kPa} \\ R_p &= 458,4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{m} &= 0,9505 \text{ g/s} \\ u_1 &= 22,44 \text{ m/s} \\ P_1 &= 338,2 \text{ kPa} \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

5435m10

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned} P_0 &= 543,3 \text{ kPa} \\ T_0 &= 161,9 \text{ }^\circ\text{C} \\ P_\infty &= 0,45 \text{ kPa} \\ P_{\text{sat}} &= 446,2 \text{ kPa} \\ R_p &= 991,6 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{m} &= 0,9954 \text{ g/s} \\ u_1 &= 23,61 \text{ m/s} \\ P_1 &= 361,1 \text{ kPa} \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

5435m10b

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 502,1 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 162,1 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 0,55 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 448,0 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 814,6$$

$$\dot{m} = 0,9286 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 22,04 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 342,8 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: arcir).

5435m10c

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 500,9 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 162,0 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 0,40 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 447,1 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 1117,8$$

$$\dot{m} = 0,9023 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 21,41 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 350,3 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

Série de ensaios: RUN2

Nesta série de ensaio de ensaios, foi implementada a utilização da lâmpada de “flash” para o método “Schlieren” e a utilização da segunda câmara de CCD onde a iluminação era feita por detrás do fenômeno. Logo, esta série de ensaios teve o objetivo de fazer um ajuste deste segundo método óptico.

2329050

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 257,2 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 56,3 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 0,49 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 27,3 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 55,8$$

$$\dot{m} = 1,2350 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 25,40 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 8,2 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

c) Esta é a imagem da segunda câmara CCD. A janela estava muito próxima do jato promovendo o orvalho na superfície da janela, comprometendo a nitidez da imagem.

2329100

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 250,2 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 56,5 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 0,28 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 27,7 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 100,6$$

$$\dot{m} = 1,2168 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 25,03 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 8,2 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: hsv).

d) Conforme a imagem "c" do caso anterior.

2329500

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 249,0 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 56,9 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 0,08 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 28,2 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 352,0$$

$$\dot{m} = 1,2103 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 24,91 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 9,4 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

2349001c

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 250,0 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 75,7 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 61,86 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 50,5 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 0,8$$

$$\dot{m} = 1,0544 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 22,12 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 64,5 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa. da 1ª. câmara.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

2368001c

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 250,4 \text{ kPa} \\
 T_0 &= 94,8 \text{ }^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 89,62 \text{ kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 89,1 \text{ kPa} \\
 R_p &= 1,0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 0,9779 \text{ g/s} \\
 u_1 &= 20,89 \text{ m/s} \\
 P_1 &= 88,3 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

a) Imagem representativa. da 1ª. câmara.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

* Obs.: Embora a 1ª. câmara CCD, pertencente ao sistema “Schlieren”, oferece uma imagem com um jato quase fragmentando em seu filete devido a evaporação ao longo do jato. A outra comprova que o jato é contínuo.

2368100b

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 250,0 \text{ kPa} \\
 T_0 &= 95,0 \text{ }^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 0,50 \text{ kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 89,6 \text{ kPa} \\
 R_p &= 179,2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= -- \text{ g/s} \\
 u_1 &= -- \text{ m/s} \\
 P_1 &= -- \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

a) Deste ensaio, apenas há a imagem da 2ª. câmara CCD.

2368200

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 250,0 \text{ kPa} \\
 T_0 &= 94,4 \text{ }^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 0,49 \text{ kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 88,1 \text{ kPa} \\
 R_p &= 181,6
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 1,1342 \text{ g/s} \\
 u_1 &= 23,82 \text{ m/s} \\
 P_1 &= 34,1 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

2368200b

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 252,2 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 95,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,43 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 90,7 \text{ kPa}$$

$$R_p = 213,3$$

$$\dot{m} = 1,1412 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 23,99 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 33,6 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem da 2ª. câmara CCD.

Obs.:

- Na saída do bocal, é visto o núcleo de líquido com uma extensão de 4,2 mm.
- O núcleo de líquido está em tom escuro devido a instalação de um placa de acrílico na janela atrás do jato, que torna a luz difusa.

2393050

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 249,5 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 119,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 3,80 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 174,5 \text{ kPa}$$

$$R_p = 45,9$$

$$\dot{m} = 0,9669 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 21,24 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 87,8 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa. 1ª. câmara CCD.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

* Ensaios que possuem um núcleo de líquido pouco extenso (aqui é de 2,6 mm) e valores de R_p desta ordem de valor limitam um detalhamento visual pelo "Schlieren".

2393m10c

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 251,8 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 121,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,11 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 183,4 \text{ kPa}$$

$$R_p = 1746,5$$

$$\dot{m} = 0,9459 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 20,84 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 96,5 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

5368010

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 501,9 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 95,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 9,20 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 90,7 \text{ kPa}$$

$$R_p = 9,9$$

$$\dot{m} = 1,6523 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 35,32 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 52,4 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

* a segunda imagem destaca bem o núcleo de líquido.

5368100

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 503,4 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 95,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,96 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 90,7 \text{ kPa}$$

$$R_p = 94,9$$

$$\dot{m} = 1,6528 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 35,33 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 53,6 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem "a" tratada (mapa de cores: hsv).

5368500

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 500,2 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 95,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,23 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 89,9 \text{ kPa}$$

$$R_p = 399,5$$

$$\dot{m} = 1,6560 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 35,39 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 48,8 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem "a" tratada (mapa de cores: jet).

5368m10

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 501,3 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 95,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,19 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 90,2 \text{ kPa}$$

$$R_p = 474,5$$

$$\dot{m} = 1,6012 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 34,22 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 78,6 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem "a" tratada (mapa de cores: gray).

d) Imagem "a" tratada (mapa de cores: arcir).

5393010

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 476,5 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 122,8 \text{ °C}$$

$$P_\infty = 17,73 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 188,4 \text{ kPa}$$

$$R_p = 10,6$$

$$\dot{m} = 1,4691 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 32,41 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 110,6 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

5393100

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 485,3 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 122,6 \text{ °C}$$

$$P_\infty = 1,70 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 187,5 \text{ kPa}$$

$$R_p = 110,6$$

$$\dot{m} = 1,4173 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 31,26 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 144,3 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

5393500

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 502,5 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 122,2 \text{ °C}$$

$$P_\infty = 0,33 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 185,6 \text{ kPa}$$

$$R_p = 562,5$$

$$\dot{m} = 1,4639 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 32,27 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 139,3 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

5393m10

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 503,3 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 120,6 \text{ °C}$$

$$P_\infty = 0,26 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 178,5 \text{ kPa}$$

$$R_p = 686,5$$

$$\dot{m} = 1,4822 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 32,60 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 131,8 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

5393m10b

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 501,6 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 123,2 \text{ °C}$$

$$P_\infty = 0,21 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 190,2 \text{ kPa}$$

$$R_p = 928,0$$

$$\dot{m} = 1,4465 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 31,93 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 146,4 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

Série de ensaios: RUN3

Esta série de ensaio se destaca pela padronização da iluminação da segunda câmara cuja fonte é uma lâmpada dicróica de 250 W, e que fica atrás do ponto de observação à distância de 500 mm. Também foi feita a implantação de um adaptador que afasta a janela em 100 mm do injetor e proporcionou imagens muito mais nítidas deste ponto de observação, pois havia uma condensação de gotículas nesta janela. Além disso, foi implementada a utilização do sensor de vácuo que proporcionou o registro através da placa de aquisição de dados.

Quanto ao método de iluminação por detrás, foi feito um aumento do foco do jato e foi retirada a placa de acrílico leitosa que tornava difusa a iluminação. Isto proporcionou uma tonalidade clara ao núcleo líquido. Neste método óptico, a referência da escala dimensional da imagem da segunda câmara ficou na distância que existe entre a borda do bocal até o seu centro, na saída do jato, conforme é exemplificado no ensaio 1329002, a seguir.

1329002

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 121,3 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 56,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 12,47 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 26,9 \text{ kPa}$$

$$R_p = 2,2$$

$$\dot{m} = 0,8084 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 16,63 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 13,0 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem da 2ª. câmara CCD tratada.

Obs.: Embora esteja imperceptível na imagem original, este tratamento verificou que existe uma continuidade ao longo do jato. Provavelmente, isto ocorreu devido à pequena variação do diâmetro ao longo do jato, desviando a luz que seria direcionada à câmara.

1329050

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 122,1 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 56,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,49 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 27,0 \text{ kPa}$$

$$R_p = 54,6$$

$$\dot{m} = 0,8447 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 17,37 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 4,2 \text{ kPa}$$

Obs: A imagem da 2ª. câmara mostra que a onda de evaporação ocorre 1,5 mm após sair do bocal. Na imagem tratada ao lado, é observado que a onda de choque inicia no local da formação da onda de evaporação e, praticamente paralela à parede externa do bocal.

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

d) Combinação das imagens "b" e "c".

1329500

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 123,0 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 56,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,14 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 27,1 \text{ kPa}$$

$$R_p = 191,0$$

$$\dot{m} = 0,8532 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 17,55 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 2,8 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

1349002

(bocal rugoso; 0,3 mm) a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 128,0 \text{ kPa} \\
 T_0 &= 76,3 \text{ }^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 24,47 \text{ kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 50,4 \text{ kPa} \\
 R_p &= 2,1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 0,7716 \text{ g/s} \\
 u_1 &= 16,20 \text{ m/s} \\
 P_1 &= 28,1 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

c) Imagem da 2ª. câmara CCD tratada. Neste caso, também foi possível processada matematicamente a imagem para realçar que o filete do jato que não sofre descontinuidade.

1349100

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 124,7 \text{ kPa} \\
 T_0 &= 76,9 \text{ }^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 0,45 \text{ kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 51,4 \text{ kPa} \\
 R_p &= 114,1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 0,8234 \text{ g/s} \\
 u_1 &= 17,29 \text{ m/s} \\
 P_1 &= 11,3 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

- Não foi obtido sucesso na aquisição das imagens.

1349100b

(bocal rugoso; 0,3 mm)

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: rand).

$P_0 = 124,0$ kPa
 $T_0 = 77,3$ °C
 $P_\infty = 0,53$ kPa
 $P_{\text{sat}} = 52,0$ kPa
 $R_p = 98,0$

 $\dot{m} = --$ g/s
 $u_1 = --$ m/s
 $P_1 = --$ kPa

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

*Obs.: Não foi obtido dados de vazão, nem imagem da 2ª. câmara.

1349500

(bocal rugoso; 0,3 mm)
 $P_0 = 122,7$ kPa
 $T_0 = 75,2$ °C
 $P_\infty = 0,14$ kPa
 $P_{\text{sat}} = 48,6$ kPa
 $R_p = 359,6$

 $\dot{m} = 0,8340$ g/s
 $u_1 = 17,49$ m/s
 $P_1 = 6,6$ kPa

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

1368002

(bocal rugoso; 0,3 mm) a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 123,5 \text{ kPa} \\
 T_0 &= 92,6 \text{ }^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 44,00 \text{ kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 83,6 \text{ kPa} \\
 R_p &= 1,9
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 0,6941 \text{ g/s} \\
 u_1 &= 14,80 \text{ m/s} \\
 P_1 &= 41,5 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

c) Imagem da 2^a. câmara CCD tratada.

Obs.: Embora esteja imperceptível na imagem original, este tratamento verificou que existe uma continuidade ao longo do jato.

1368002b

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 122,9 \text{ kPa} \\
 T_0 &= 92,7 \text{ }^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 44,66 \text{ kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 83,9 \text{ kPa} \\
 R_p &= 1,9
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 0,6794 \text{ g/s} \\
 u_1 &= 14,48 \text{ m/s} \\
 P_1 &= 44,3 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

1368002c

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 124,5 \text{ kPa} \\
 T_0 &= 93,8 \text{ }^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 44,66 \text{ kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 86,6 \text{ kPa} \\
 R_p &= 1,9
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 0,6802 \text{ g/s} \\
 u_1 &= 14,52 \text{ m/s} \\
 P_1 &= 45,6 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

1368050

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 125,1 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 93,4 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 1,70 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 85,6 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 50,4$$

$$\dot{m} = 0,8218 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 17,53 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 11,2 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

1368500

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 123,5 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 94,8 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 0,15 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 89,2 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 582,8$$

$$\dot{m} = 0,8022 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 17,14 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 14,7 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

5329010

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 500,3 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 56,4 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 2,53 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 27,0 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 10,7$$

$$\dot{m} = 1,7469 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 35,93 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 13,9 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

5329050

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 501,6 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 56,6 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 0,54 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 27,3 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 50,7$$

$$\dot{m} = 1,7531 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 36,07 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 11,8 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem tratada (mapa de cores: hsv).

5329100

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 501,6 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 56,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,20 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 27,3 \text{ kPa}$$

$$R_p = 137,7$$

$$\dot{m} = 1,7455 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 35,91 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 15,9 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

d) Combinação das imagens "b" e "c".

5329500

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 504,1 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 57,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,15 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 27,9 \text{ kPa}$$

$$R_p = 185,6$$

$$\dot{m} = 1,7453 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 35,93 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 18,4 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: hsv).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

5349010

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 496,8 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 77,3 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 5,07 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 52,8 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 10,4$$

$$\dot{m} = 1,7163 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 36,06 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 20,4 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

5349050

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 501,9 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 76,2 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 0,93 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 50,2 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 54,2$$

$$\dot{m} = 1,7079 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 35,85 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 30,4 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

b) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

5349100

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 496,3 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 76,7 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 0,48 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 51,9 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 108,2$$

$$\dot{m} = 1,6955 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 35,60 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 31,4 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

5349500

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 497,6 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 76,9 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 0,11 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 52,2 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 474,8$$

$$\dot{m} = 1,6993 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 35,69 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 30,6 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

7329002

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 750,4 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 56,1 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 12,40 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 26,6 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 2,1$$

$$\dot{m} = 2,1471 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 44,15 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 21,7 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

7329010

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 751,2 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 56,3 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 2,13 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 26,9 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 12,6$$

$$\dot{m} = 2,1330 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 43,87 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 31,8 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

7329050

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 751,6 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 56,1 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 0,64 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 26,6 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 41,6$$

$$\dot{m} = 2,1345 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 43,89 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 31,3 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

7329200

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 751,1 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 56,4 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 0,22 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 27,0 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 120,2$$

$$\dot{m} = 2,1605 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 44,44 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 13,3 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

7329500

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 752,0 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 56,4 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 0,21 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 27,0 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 130,1$$

$$\dot{m} = 2,1679 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 44,59 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 9,2 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

b) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

7349002

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 747,8 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 76,0 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 24,93 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 49,9 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 2,0$$

$$\dot{m} = 2,0818 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 43,69 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 52,3 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

7349010

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 753,0 && \text{kPa} \\
 T_0 &= 76,2 && ^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 4,90 && \text{kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 50,2 && \text{kPa} \\
 R_p &= 10,2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 2,1005 && \text{g/s} \\
 u_1 &= 44,09 && \text{m/s} \\
 P_1 &= 45,1 && \text{kPa}
 \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

7349050

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 749,2 && \text{kPa} \\
 T_0 &= 76,8 && ^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 1,00 && \text{kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 51,2 && \text{kPa} \\
 R_p &= 51,3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 2,0995 && \text{g/s} \\
 u_1 &= 44,09 && \text{m/s} \\
 P_1 &= 41,6 && \text{kPa}
 \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

7349100

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 752,5 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 77,0 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 0,54 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 51,5 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 94,7$$

$$\dot{m} = 2,0910 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 43,92 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 50,5 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

7349500

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 750,7 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 77,1 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 0,21 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 51,7 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 241,5$$

$$\dot{m} = 2,1138 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 44,40 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 33,5 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

7368001

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 752,8 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 96,0 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 93,33 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 92,2 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 1,0$$

$$\dot{m} = 1,9682 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 42,10 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 121,4 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

7368002

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 752,5 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 96,3 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 45,03 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 93,1 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 2,1$$

$$\dot{m} = 2,0601 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 44,08 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 61,6 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

7368010

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 750,1 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 95,7 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 9,00 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 91,5 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 10,2$$

$$\dot{m} = 2,0387 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 43,59 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 73,6 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

7368100

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 752,3 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 96,4 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 0,93 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 93,4 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 101,0$$

$$\dot{m} = 2,0292 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 43,42 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 81,6 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

7368500

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned} P_0 &= 748,4 \text{ kPa} \\ T_0 &= 95,3 \text{ }^\circ\text{C} \\ P_\infty &= 0,31 \text{ kPa} \\ P_{\text{sat}} &= 90,5 \text{ kPa} \\ R_p &= 288,6 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{m} &= 2,0112 \text{ g/s} \\ u_1 &= 42,99 \text{ m/s} \\ P_1 &= 89,9 \text{ kPa} \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

7368m10

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned} P_0 &= 750,9 \text{ kPa} \\ T_0 &= 95,2 \text{ }^\circ\text{C} \\ P_\infty &= 0,23 \text{ kPa} \\ P_{\text{sat}} &= 90,2 \text{ kPa} \\ R_p &= 391,4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{m} &= 2,0302 \text{ g/s} \\ u_1 &= 43,39 \text{ m/s} \\ P_1 &= 80,1 \text{ kPa} \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

c) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

7393002

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 753,6 \text{ kPa} \\
 T_0 &= 120,4 \text{ }^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 93,33 \text{ kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 177,6 \text{ kPa} \\
 R_p &= 1,9
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 1,8596 \text{ g/s} \\
 u_1 &= 40,89 \text{ m/s} \\
 P_1 &= 176,5 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

7393010

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 750,6 \text{ kPa} \\
 T_0 &= 121,4 \text{ }^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 17,94 \text{ kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 182,1 \text{ kPa} \\
 R_p &= 10,2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 1,8684 \text{ g/s} \\
 u_1 &= 41,14 \text{ m/s} \\
 P_1 &= 167,4 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

7393100

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 749,9 \text{ kPa} \\
 T_0 &= 121,0 \text{ }^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 1,80 \text{ kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 180,3 \text{ kPa} \\
 R_p &= 100,2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 1,8694 \text{ g/s} \\
 u_1 &= 41,14 \text{ m/s} \\
 P_1 &= 166,4 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

a) Imagem do gráfico obtido.

- Obs: não foram obtidas imagens do jato.

7393100b

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned} P_0 &= 751,9 \text{ kPa} \\ T_0 &= 120,9 \text{ }^\circ\text{C} \\ P_\infty &= 1,79 \text{ kPa} \\ P_{\text{sat}} &= 179,8 \text{ kPa} \\ R_p &= 100,5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{m} &= 1,8728 \text{ g/s} \\ u_1 &= 41,21 \text{ m/s} \\ P_1 &= 166,4 \text{ kPa} \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

7393500

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$\begin{aligned} P_0 &= 752,8 \text{ kPa} \\ T_0 &= 121,3 \text{ }^\circ\text{C} \\ P_\infty &= 0,32 \text{ kPa} \\ P_{\text{sat}} &= 181,6 \text{ kPa} \\ R_p &= 573,8 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{m} &= 1,8618 \text{ g/s} \\ u_1 &= 40,99 \text{ m/s} \\ P_1 &= 173,8 \text{ kPa} \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

c) Imagem da 2ª. câmara CCD.

7393m10

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 753,2 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 121,1 \text{ °C}$$

$$P_\infty = 0,20 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 180,7 \text{ kPa}$$

$$R_p = 885,8$$

$$\dot{m} = 1,8833 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 41,45 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 161,0 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

7404002

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 752,7 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 131,1 \text{ °C}$$

$$P_\infty = 126,16 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 229,9 \text{ kPa}$$

$$R_p = 1,8$$

$$\dot{m} = 1,7505 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 39,08 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 233,8 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

7404010

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 748,9 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 131,7 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 23,00 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 233,2 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 10,1$$

$$\dot{m} = 1,7478 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 39,06 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 231,1 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

7404100

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 753,0 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 131,7 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 2,28 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 233,2 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 102,5$$

$$\dot{m} = 1,7763 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 39,70 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 218,5 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

7404500

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 749,6 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 131,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,27 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 234,3 \text{ kPa}$$

$$R_p = 872,5$$

$$\dot{m} = 1,7599 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 39,34 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 224,6 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

c) Imagem da 2ª. câmara CCD.

7404m10

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 751,9 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 131,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,18 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 233,2 \text{ kPa}$$

$$R_p = 1277,6$$

$$\dot{m} = 1,7302 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 38,67 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 244,3 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

7435010

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 747,4 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 161,6 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 45,13 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 443,4 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 9,8$$

$$\dot{m} = 1,3277 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 31,47 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 430,0 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

7435100

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 749,3 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 161,8 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 4,60 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 445,1 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 96,8$$

$$\dot{m} = 1,3635 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 32,33 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 414,7 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

7435500

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 749,5 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 161,7 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 1,05 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 444,3 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 423,1$$

$$\dot{m} = 1,3561 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 32,15 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 418,5 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

7435m10

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 747,7 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 161,3 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 0,72 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 440,7 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 614,3$$

$$\dot{m} = 1,3720 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 32,50 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 409,4 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

7435m20

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 749,2 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 161,8 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 0,48 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 445,1 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 927,4$$

$$\dot{m} = 1,3746 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 32,60 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 409,2 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: hsv).

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

c) Imagem da 2ª. câmara CCD.

7451010

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 750,1 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 173,7 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 70,59 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 560,8 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 7,9$$

$$\dot{m} = 1,1684 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 28,59 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 496,1 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

7451050

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 753,8 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 176,9 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 13,74 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 596,2 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 43,4$$

$$\dot{m} = 1,0688 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 26,39 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 538,9 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

7451100

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 754,6 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 177,6 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 6,97 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 604,2 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 86,7$$

$$\dot{m} = 1,1722 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 29,01 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 496,3 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

7451500

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 756,6 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 177,6 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 1,57 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 604,2 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 386,0$$

$$\dot{m} = 1,0846 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 26,84 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 534,9 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

7451m20

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 752,4 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 178,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,29 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 619,2 \text{ kPa}$$

$$R_p = 2161,2$$

$$\dot{m} = 1,0648 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 26,45 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 537,9 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

7451m45

(bocal rugoso; 0,3 mm)

$$P_0 = 751,6 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 178,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,13 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 609,9 \text{ kPa}$$

$$R_p = 4551,5$$

$$\dot{m} = 0,9809 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 24,31 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 569,5 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

d) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

Anexo C

Resultados Experimentais do Bocal de Aço com 0,8 mm e do Bocal de Vidro de 0,35 mm (R08 e V03)

C.1. Medição das Vazões Mássicas – Série R08

Na Tab. C.1, os ensaios estão apresentados, primeiramente com o código do ensaio, dia de realização, seguido da pressão e temperatura de injeção que estão classificados (P_{inj} e T_{inj}). Nas colunas seguintes, estão colocados a pressão e temperatura de injeção medidas (P_0 e T_0), a pressão da câmara média (P_∞) e a razão entre a pressão de vapor e pressão da câmara (R_P). Em seguida está o número de Reynolds, Re , a vazão mássica, $\dot{m}$, o coeficiente de descarga, C_D , calculado através da Eq. (C.1) cuja curva foi levantada experimentalmente, e a vazão mássica estimada, $\dot{m}_e$, que é obtida através da equação de descarga do bocal para fluidos incompressíveis representada pela Eq. (B.2). O parâmetro, P_1 , é calculado através da Eq. (B.4) e se refere à pressão do líquido superaquecido na saída do bocal e depende da vazão mássica medida no ensaio.

$$C_D = 0,9954 - 16,827/\sqrt{Re} \quad (C.1)$$

Tabela C.1 – Tabela com os ensaios da série “R08” (bocal rugoso com 0,8 mm de diâmetro).

Código	dia	P_{inj} (kPa)	T_{inj} (°C)	P_0 (kPa)	T_0 (°C)	P_∞ (kPa)	R_P	Re	C_D	medido	estimado	P_1 (kPa)
										$\dot{m}$ (g/s)	$\dot{m}_e$ (g/s)	
R08\1056002	26-out-04	125	56	120,5	56,2	22,93	1,1	24617	0,9443	4,8989	5,0190	27,5
R08\1056500	26-out-04	125	56	121,4	55,6	0,39	61,5	25213	0,9457	5,0462	5,5999	23,1
R08\1056m10	26-out-04	125	56	119,0	55,4	0,35	68,3	25547	0,9465	5,1230	5,5503	17,9
R08\1095002	26-out-04	125	95	120,7	95,4	63,66	1,4	23528	0,9415	3,3555	3,7528	75,1
R08\1095500	26-out-04	125	95	121,2	94,9	0,37	241,4	27251	0,9503	3,9018	5,5146	60,7
R08\1095m10	26-out-04	125	95	122,7	94,7	0,31	293,9	27695	0,9513	3,9716	5,5562	60,2
R08\2095003	06-out-04	250	95	250,8	95,9	30,17	3,1	46503	0,9775	6,6063	7,6614	86,7
R08\2095500	23-set-04	250	95	249,7	97,6	4,14	23,4	46038	0,9771	6,4541	8,0720	92,7
R08\2095500b	23-set-04	250	95	244,3	97,8	4,45	21,8	45845	0,9769	6,4170	7,9752	89,0
R08\2095m10	23-set-04	250	95	249,0	97,2	4,05	23,6	45951	0,9770	6,4621	8,0629	91,7
R08\2120002	06-out-04	250	120	250,5	120,1	89,46	2,0	46087	0,9771	5,4423	6,4538	136,0
R08\2120500	06-out-04	250	120	247,4	121,7	0,52	349,7	42854	0,9738	5,0000	7,9553	149,9
R08\2120m10	06-out-04	250	120	246,5	120,7	0,42	424,5	43747	0,9748	5,1428	7,9555	143,7

C.2. Medição do Comprimento de Extinção do Núcleo Líquido – Série R08

Na Tab. C.2, são vistos os ensaios com os valores nominais de pressão e temperatura de injeção (P_{inj} e T_{inj}), seguida da pressão de saturação (P_{sat}) à temperatura de injeção (T_0), pressão da câmara (P_{∞}) e a razão entre a pressão de saturação e a pressão de injeção (P_{sat}/P_0). O comprimento de extinção (L_E) é a próxima coluna e depois, está a razão entre a comprimento de extinção do líquido e o diâmetro do bocal (L_E/D_b).

Tabela C.2 – Relação do comprimento do núcleo líquido de cada ensaio – Série R08 (bocal rugoso com 0,8 mm de diâmetro).

Ensaio	P_{inj} (kPa)	T_{inj} (°C)	P_0 (kPa)	T_0 (°C)	P_{sat} (kPa)	P_{∞} (kPa)	P_{sat}/P_0	L_E (mm)	L_E/D_b
R08\1056002	125	56	120,5	56,2	24,8	22,93	0,206	-	-
R08\1056500	125	56	121,4	55,6	24,2	0,39	0,200	16,2	20,29
R08\1056m10	125	56	119,0	55,4	24,0	0,35	0,202	15,4	19,35
R08\1095002	125	95	120,7	95,4	91,5	63,66	0,758	-	-
R08\1095500	125	95	121,2	94,9	90,2	0,37	0,744	6,3	7,94
R08\1095m10	125	95	122,7	94,7	89,6	0,31	0,730	6,2	7,71
R08\2095003	250	95	250,8	95,9	92,1	30,17	0,367	-	-
R08\2095500	250	95	249,7	97,6	96,7	4,14	0,387	-	-
R08\2095500b	250	95	244,3	97,8	97,2	4,45	0,398	11,2	14,02
R08\2095m10	250	95	249,0	97,2	95,6	4,05	0,384	10,7	13,45
R08\2120002	250	120	250,5	120,1	176,3	89,46	0,704	-	-
R08\2120500	250	120	247,4	121,7	183,4	0,52	0,741	7,8	9,82
R08\2120m10	250	120	246,5	120,7	178,9	0,42	0,726	7,5	9,41

C.3. Medição das Dimensões da Estrutura da Onda de Choque – Série R08

Na Tab. C.3, estão a dimensão radial da onda de choque, r_1 , e sua distância axial em relação à saída do bocal, r_2 , todos obtidos através de ensaios deste bocal de 0,8 mm. Nela estão apresentados os ensaios seguidos da série, categoria da pressão e temperatura de injeção (P_{inj} e T_{inj}). Logo após estão os valores experimentais da pressão e temperatura de injeção (P_0 e T_0). De um único ensaio são adquiridas várias imagens e, para cada uma delas, são correlacionadas a pressão da câmara (P_∞) e a razão entre as pressões de saturação e da câmara (R_p) com as dimensões do raio e da distância axial da onda de choque formada neste devido instante. As imagens principais de cada ensaio com as ondas de choque estão inseridas na seção seguinte.

Tabela C.3 – Relação das dimensões da onda de choque formada como o raio, r_1 e a distancia axial, r_2 (bocal rugoso com 0,8 mm de diâmetro).

Ensaio	P_{inj} (kPa)	T_{inj} (°C)	P_0 (kPa)	T_0 (°C)	Imagem	R_p (kPa)	P_∞ (kPa)	r_1 (mm)	r_2 (mm)
R08\1056002	125	56	120,5	56,2	1	--	--	--	--
R08\1056500	125	56	121,4	55,6	1	170,6	0,14	20,5	22,1
R08\1056500	125	56	121,4	55,6	2	78,1	0,31	14,7	18,3
R08\1056500	125	56	121,4	55,6	3	50,7	0,48	11,0	17,3
R08\1056500	125	56	121,4	55,6	4	37,5	0,65	8,2	17,6
R08\1056m10	125	56	119,0	55,4	1	192,7	0,12	19,1	21,5
R08\1056m10	125	56	119,0	55,4	2	87,0	0,28	12,9	18,9
R08\1056m10	125	56	119,0	55,4	3	56,2	0,43	10,1	17,6
R08\1056m10	125	56	119,0	55,4	4	41,5	0,58	7,5	18,9
R08\1095002	125	95	120,7	95,4	1	--	--	--	--
R08\1095500	125	95	121,2	94,9	1	599,7	0,15	25,5	20,8
R08\1095500	125	95	121,2	94,9	2	301,5	0,30	20,4	16,6
R08\1095500	125	95	121,2	94,9	3	201,4	0,45	15,4	14,6
R08\1095500	125	95	121,2	94,9	4	151,2	0,60	13,5	11,9
R08\1095m10	125	95	122,7	94,7	1	868,1	0,10	27,9	19,8
R08\1095m10	125	95	122,7	94,7	2	377,0	0,24	21,4	15,7
R08\1095m10	125	95	122,7	94,7	3	240,8	0,37	18,1	13,9
R08\1095m10	125	95	122,7	94,7	4	176,9	0,51	14,5	12,1
R08\2095003	250	95	250,8	95,9	1	--	--	--	--
R08\2095500	250	95	249,7	97,6	1	--	--	--	--
R08\2095500b	250	95	244,3	97,8	1	85,8	1,13	28,3	19,5
R08\2095500b	250	95	244,3	97,8	2	29,1	3,35	20,1	17,3
R08\2095500b	250	95	244,3	97,8	3	17,5	5,56	13,1	17,1
R08\2095500b	250	95	244,3	97,8	4	12,5	7,77	10,6	17,0
R08\2095m10	250	95	249,0	97,2	1	134,9	0,71	27,7	20,2
R08\2095m10	250	95	249,0	97,2	3	35,2	2,71	19,5	17,4
R08\2095m10	250	95	249,0	97,2	4	21,5	4,45	13,6	16,0
R08\2095m10	250	95	249,0	97,2	5	16,5	5,79	10,7	16,5
R08\2120002	250	120	250,5	120,1	1	--	--	--	--
R08\2120500	250	120	247,4	121,7	1	963,4	0,19	30,6	18,5
R08\2120500	250	120	247,4	121,7	2	322,3	0,57	17,6	14,0
R08\2120500	250	120	247,4	121,7	3	288,4	0,64	14,1	14,1
R08\2120500	250	120	247,4	121,7	4	213,6	0,86	12,4	14,0
R08\2120m10	250	120	246,5	120,7	1	1017,6	0,18	29,4	16,7
R08\2120m10	250	120	246,5	120,7	2	424,5	0,42	23,1	14,9
R08\2120m10	250	120	246,5	120,7	3	268,2	0,67	16,5	13,9

C.4. Imagens dos Ensaios da Série R08

Em cada ensaio, são colocados as condições de temperatura de injeção, T_0 , pressão de injeção, P_0 , pressão de saturação à temperatura de injeção, P_{sat} , e a razão entre pressão de vapor e pressão da câmara, R_P . A primeira, da sequência de imagens de cada ensaio, refere-se a uma das imagens típicas adquiridas através do método “Schlieren” e a escala dimensional de 50 mm é tomada através da plataforma que está na saída do bocal, conforme também é realçado apenas neste primeiro ensaio (1056002).

Dentro de cada ensaio, existem outras imagens que são aquelas tratadas matematicamente com filtro subtrativo e submetidas ao mapa de cor que melhor realça os fenômenos envolvidos assim como, a imagem obtida pela segunda câmara CCD, que utiliza o método de iluminação por detrás. Outras informações como vazão mássica ($\dot{m}$) também é acrescentado em cada ensaio, seguido da velocidade do jato (u_1) na saída do bocal, assim como sua pressão de líquido metaestável (P_1) calculada através da vazão obtida, considerando como incompressível.

R08\1056002

(bocal rugoso; 0,8 mm)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 120,5 \text{ kPa} \\
 T_0 &= 56,2 \text{ }^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 22,93 \text{ kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 24,8 \text{ kPa} \\
 R_p &= 1,1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 4,8989 \text{ g/s} \\
 u_1 &= 15,96 \text{ m/s} \\
 P_1 &= 27,5 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

Obs.: A pressão de saturação é praticamente igual a pressão da câmara promovendo uma evaporação superficial no filete líquido do jato.

R08\1056500

(bocal rugoso; 0,8 mm)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 121,4 \text{ kPa} \\
 T_0 &= 55,6 \text{ }^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 0,39 \text{ kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 24,2 \text{ kPa} \\
 R_p &= 61,5
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 5,0462 \text{ g/s} \\
 u_1 &= 16,43 \text{ m/s} \\
 P_1 &= 23,1 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

R08\1056m10

(bocal rugoso; 0,8 mm)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 119,0 \text{ kPa} \\
 T_0 &= 55,4 \text{ }^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 0,35 \text{ kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 24,0 \text{ kPa} \\
 R_p &= 68,3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 5,1230 \text{ g/s} \\
 u_1 &= 16,68 \text{ m/s} \\
 P_1 &= 17,9 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: hsv).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

R08\1095002

(bocal rugoso; 0,8 mm)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 120,7 \text{ kPa} \\
 T_0 &= 95,4 \text{ }^\circ\text{C} \\
 P_\infty &= 63,66 \text{ kPa} \\
 P_{\text{sat}} &= 91,5 \text{ kPa} \\
 R_p &= 1,4
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= 3,3555 \text{ g/s} \\
 u_1 &= 11,37 \text{ m/s} \\
 P_1 &= 75,1 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

R08\1095500

(bocal rugoso; 0,8 mm)

$$P_0 = 121,2 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 94,9 \text{ °C}$$

$$P_\infty = 0,37 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 90,2 \text{ kPa}$$

$$R_p = 241,4$$

$$\dot{m} = 3,9018 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 13,21 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 60,7 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

R08\1095m10

(bocal rugoso; 0,8 mm)

$$P_0 = 122,7 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 94,7 \text{ °C}$$

$$P_\infty = 0,31 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 89,6 \text{ kPa}$$

$$R_p = 293,9$$

$$\dot{m} = 3,9716 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 13,44 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 60,2 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

R08\2095003

(bocal rugoso; 0,8 mm)

$P_0 = 250,8 \text{ kPa}$

$T_0 = 95,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_{\infty} = 30,17 \text{ kPa}$

$P_{\text{sat}} = 92,1 \text{ kPa}$

$R_p = 3,1$

$\dot{m} = 6,6063 \text{ g/s}$

$u_1 = 22,39 \text{ m/s}$

$P_1 = 86,7 \text{ kPa}$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

R08\2095500

(bocal rugoso; 0,8 mm)

$P_0 = 249,7 \text{ kPa}$

$T_0 = 97,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_{\infty} = 4,14 \text{ kPa}$

$P_{\text{sat}} = 96,7 \text{ kPa}$

$R_p = 23,4$

$\dot{m} = 6,4541 \text{ g/s}$

$u_1 = 21,91 \text{ m/s}$

$P_1 = 92,7 \text{ kPa}$

Obs.: Este ensaio não possui imagens.

R08\2095500b

(bocal rugoso; 0,8 mm)

$P_0 = 244,3 \text{ kPa}$

$T_0 = 97,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_{\infty} = 4,45 \text{ kPa}$

$P_{\text{sat}} = 97,2 \text{ kPa}$

$R_p = 21,8$

$\dot{m} = 6,4170 \text{ g/s}$

$u_1 = 21,79 \text{ m/s}$

$P_1 = 89,0 \text{ kPa}$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

R08\2095m10

(bocal rugoso; 0,8 mm)

$$P_0 = 249,0 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 97,2 \text{ °C}$$

$$P_\infty = 4,05 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 95,6 \text{ kPa}$$

$$R_p = 23,6$$

$$\dot{m} = 6,4621 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 21,93 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 91,7 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

R08\2120002

(bocal rugoso; 0,8 mm)

$$P_0 = 250,5 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 120,1 \text{ °C}$$

$$P_\infty = 89,46 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 176,3 \text{ kPa}$$

$$R_p = 2,0$$

$$\dot{m} = 5,4423 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 18,95 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 136,0 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

Obs.: Só existe esta imagem do jato.

R08\2120500

(bocal rugoso; 0,8 mm)

$$P_0 = 247,4 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 121,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,52 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 183,4 \text{ kPa}$$

$$R_p = 349,7$$

$$\dot{m} = 5,0000 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 17,45 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 149,9 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

e) Combinação das imagens “c” e “d”.

R08\2120m10

(bocal rugoso; 0,8 mm)

$$P_0 = 246,5 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 120,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,42 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 178,9 \text{ kPa}$$

$$R_p = 424,5$$

$$\dot{m} = 5,1428 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 17,93 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 143,7 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

C.5. Medição das Vazões Mássicas – Série V03

Na Tab. C.4, os ensaios estão apresentados com o código do ensaio, dia de realização, seguido da pressão e temperatura de injeção nominais (P_{inj} e T_{inj}). Nas colunas seguintes, estão colocados a pressão e temperatura de injeção medidas (P_0 e T_0), a pressão da câmara média (P_∞) e a razão entre a pressão de vapor e pressão da câmara (R_P). A partir da nona coluna, consta o número de Reynolds, Re , que é calculado através da vazão mássica medida, $\dot{m}$, depois o coeficiente de descarga, C_D , cuja curva foi levantada experimentalmente (Eq. C.2), e a vazão mássica estimada, $\dot{m}_e$, é obtida através da equação de descarga do bocal (Eq. B.2). O parâmetro, P_1 , corresponde à pressão do líquido metaestável na saída do bocal e é determinada pela equação Eq. (B.4).

$$C_D = 0,9963 - 8,8247/\sqrt{Re} \quad (C.2)$$

Tabela C.4 – Tabela com os ensaios da série “V03” (bocal de vidro com 0,35 mm de diâmetro).

Código	dia	P_{inj} (kPa)	T_{inj} (°C)	P_0 (kPa)	T_0 (°C)	P_∞ (kPa)	R_P	Re	C_D	medido	estimado	P_1 (kPa)
										$\dot{m}$ (g/s)	$\dot{m}_e$ (g/s)	
V03\1329500	16-nov-04	125	56	123,5	56,7	0,27	92,3	12579	0,9176	1,1637	1,1955	6,7
V03\1329m10	16-nov-04	125	56	121,7	56,5	0,35	72,5	12444	0,9172	1,1534	1,1860	6,9
V03\1349100	05-nov-04	125	76	122,8	76,6	0,48	107,3	14339	0,9226	1,1119	1,1856	15,2
V03\1349500	05-nov-04	125	76	121,2	76,3	0,23	219,3	14143	0,9221	1,0995	1,1785	15,9
V03\1349m10	05-nov-04	125	76	123,9	76,6	0,24	215,3	14426	0,9228	1,1186	1,1923	15,1
V03\1368100	05-nov-04	125	95	123,2	94,4	0,86	102,8	15892	0,9263	1,0670	1,1803	23,2
V03\1368500	05-nov-04	125	95	123,7	95,0	0,23	397,6	16064	0,9267	1,0735	1,1859	22,5
V03\1368m10	05-nov-04	125	95	143,2	95,1	0,20	461,6	17631	0,9299	1,1773	1,2806	22,3
V03\2329100	15-dez-04	250	56	248,6	57,4	0,41	63,2	18036	0,9306	1,6576	1,7200	18,1
V03\2349500	15-dez-04	250	76	249,9	74,8	1,70	28,5	20739	0,9350	1,6326	1,7130	24,4
V03\2349m10	15-dez-04	250	76	249,7	76,7	0,52	98,3	20906	0,9353	1,6197	1,7153	27,5
V03\2368500	22-dez-04	250	95	250,8	94,4	0,34	259,6	24028	0,9394	1,6133	1,7127	28,6
V03\2393500	15-dez-04	250	120	250,4	120,1	0,60	293,9	27051	0,9427	1,4921	1,6918	56,1
V03\2393m10	15-dez-04	250	120	255,4	120,6	0,53	339,3	26895	0,9425	1,4779	1,7081	64,6
V03\5349500	22-dez-04	500	76	504,3	76,6	0,58	88,5	30522	0,9458	2,3667	2,4663	40,4
V03\5349m10	22-dez-04	500	76	501,0	76,3	0,46	110,1	30244	0,9456	2,3511	2,4583	43,2
V03\5393500	16-dez-04	500	120	496,5	122,5	0,75	252,0	40063	0,9522	2,1703	2,4037	92,3
V03\5393m10	16-dez-04	500	120	499,6	119,2	0,36	486,1	39622	0,9520	2,2003	2,4168	85,8

C.6. Medição do Comprimento de Extinção do Núcleo Líquido – Série V03

Na Tab. C.5, são vistos os valores obtidos dos ensaios com os valores nominais de pressão e temperatura de injeção (P_{inj} e T_{inj}), seguida da pressão de saturação (P_{sat}) à temperatura de injeção (T_0), pressão da câmara (P_{∞}) e a razão entre a pressão de saturação e a pressão de injeção (P_{sat}/P_0). O comprimento de extinção (L_E) é a próxima coluna e depois, está a razão entre a comprimento de extinção do líquido e o diâmetro do bocal (L_E/D_b).

Tabela C.5 – Relação do comprimento do núcleo líquido de cada ensaio – Série V03 (bocal de vidro com 0,35 mm de diâmetro).

Ensaio	P_{inj} (kPa)	T_{inj} (°C)	P_{sat} (kPa)	P_{∞} (kPa)	P_{sat} / P_0	L_E (mm)	L_E / D_b
V03\1329500	125	56	25,2	0,27	0,204	7,8	22,35
V03\1329m10	125	56	25,1	0,35	0,206	7,5	21,55
V03\1349100	125	76	51,2	0,48	0,417	6,1	17,51
V03\1349500	125	76	50,8	0,23	0,419	6,1	17,51
V03\1349m10	125	76	51,2	0,24	0,413	6,4	18,31
V03\1368100	125	95	88,8	0,86	0,721	4,6	13,13
V03\1368500	125	95	90,5	0,23	0,731	4,4	12,44
V03\1368m10	125	95	90,7	0,20	0,633	4,9	13,87
V03\2329100	250	56	25,9	0,41	0,104	10,9	31,21
V03\2349500	250	76	48,4	1,70	0,194	7,8	22,35
V03\2349m10	250	76	51,4	0,52	0,206	8,0	22,75
V03\2368500	250	95	88,8	0,34	0,354	5,6	15,96
V03\2393500	250	120	176,3	0,60	0,704	4,2	11,94
V03\2393m10	250	120	178,7	0,53	0,699	3,9	11,14
V03\5349500	500	76	51,2	0,58	0,102	11,0	31,53
V03\5349m10	500	76	50,8	0,46	0,101	11,2	32,01
V03\5393500	500	120	187,7	0,75	0,378	5,3	15,12
V03\5393m10	500	120	172,6	0,36	0,345	5,6	15,96

C.7. Medição das Dimensões da Estrutura da Onda de Choque – Série V03

Na Tab. C.6 estão apresentados os ensaios seguidos da série, categoria da pressão e temperatura de injeção. Logo após estão os valores exatos da pressão e temperatura de injeção. São adquiridas várias imagens de um único ensaio e, para cada uma delas, é correlacionada a pressão da câmara e a razão entre as pressões de saturação e da câmara com as dimensões do raio e da distância axial da onda de

choque formada neste devido instante. Na seção seguinte estão as imagens destes ensaios.

Tabela C.6 – Relação das dimensões da onda de choque formada como o raio, r_1 e a distancia axial, r_2 (bocal de vidro com 0,35 mm de diâmetro).

Ensaio	P_{inj} (kPa)	T_{inj} (°C)	P_0 (kPa)	T_0 (°C)	Imagem	R_p (kPa)	P_∞ (kPa)	r_1 (mm)	r_2 (mm)
V03\1329500	125	56	123,5	56,7	1	177	0,14	10,7	13,4
V03\1329500	125	56	123,5	56,7	3	120	0,21	9,6	11,7
V03\1329500	125	56	123,5	56,7	6	72	0,35	6,5	9,8
V03\1329500	125	56	123,5	56,7	7	69	0,37	5,7	9,8
V03\1329500	125	56	123,5	56,7	8	62	0,40	5,5	9,9
V03\1329m10	125	56	121,7	56,5	1	184	0,14	11,9	13,5
V03\1329m10	125	56	121,7	56,5	2	117	0,21	9,9	12,3
V03\1329m10	125	56	121,7	56,5	4	85	0,29	7,9	10,8
V03\1329m10	125	56	121,7	56,5	5	78	0,32	7,7	10,3
V03\1329m10	125	56	121,7	56,5	7	56	0,45	6,5	9,8
V03\1349100	125	76	122,8	76,6	1	147	0,35	7,6	8,2
V03\1349100	125	76	122,8	76,6	2	133	0,39	7,3	7,8
V03\1349100	125	76	122,8	76,6	5	103	0,50	6,0	7,1
V03\1349100	125	76	122,8	76,6	8	84	0,61	5,4	7,0
V03\1349500	125	76	121,2	76,3	1	527	0,10	15,9	12,4
V03\1349500	125	76	121,2	76,3	2	376	0,13	13,6	11,3
V03\1349500	125	76	121,2	76,3	6	175	0,29	9,0	8,4
V03\1349500	125	76	121,2	76,3	8	138	0,37	8,3	8,4
V03\1349m10	125	76	123,9	76,6	1	505	0,10	15,6	11,8
V03\1349m10	125	76	123,9	76,6	2	365	0,14	13,8	10,6
V03\1349m10	125	76	123,9	76,6	6	173	0,30	9,3	9,6
V03\1349m10	125	76	123,9	76,6	8	137	0,37	7,9	8,2
V03\1368100	125	95	123,2	94,4	1	123	0,72	6,1	6,0
V03\1368100	125	95	123,2	94,4	2	117	0,76	6,0	5,9
V03\1368100	125	95	123,2	94,4	4	105	0,84	5,8	5,9
V03\1368100	125	95	123,2	94,4	7	92	0,97	5,3	5,6
V03\1368500	125	95	123,7	95,0	1	1083	0,08	20,8	14,9
V03\1368500	125	95	123,7	95,0	2	725	0,12	17,5	13,1
V03\1368500	125	95	123,7	95,0	4	437	0,21	14,1	10,0
V03\1368500	125	95	123,7	95,0	6	313	0,29	12,1	9,5
V03\1368m10	125	95	143,2	95,1	1	1546	0,06	24,0	17,3
V03\1368m10	125	95	143,2	95,1	2	770	0,12	19,0	12,7
V03\1368m10	125	95	143,2	95,1	6	355	0,26	12,8	9,2
V03\1368m10	125	95	143,2	95,1	8	271	0,33	11,4	8,5
V03\2329100	250	56	248,6	57,4	1	99	0,26	8,7	12,9
V03\2329100	250	56	248,6	57,4	2	85	0,30	7,9	12,9
V03\2329100	250	56	248,6	57,4	4	67	0,39	5,3	12,5
V03\2329100	250	56	248,6	57,4	6	55	0,47	5,3	11,9
V03\2349500	250	76	249,9	74,8	1	29	1,67	5,7	9,2
V03\2349500	250	76	249,9	74,8	2	29	1,68	5,6	8,7
V03\2349500	250	76	249,9	74,8	4	29	1,69	5,0	8,7
V03\2349500	250	76	249,9	74,8	6	28	1,71	4,5	8,5

continua...

...continuação da Tab. C.6.

Ensaio	P_{inj} (kPa)	T_{inj} (°C)	P_0 (kPa)	T_0 (°C)	Imagem	R_P (kPa)	P_∞ (kPa)	r_1 (mm)	r_2 (mm)
V03\2349m10	250	76	249,7	76,7	1	140	0,37	10,8	10,3
V03\2349m10	250	76	249,7	76,7	2	125	0,41	10,0	10,2
V03\2349m10	250	76	249,7	76,7	4	103	0,50	8,5	10,1
V03\2349m10	250	76	249,7	76,7	6	87	0,59	7,1	8,8
V03\2368500	250	95	250,8	94,4	1	386	0,23	14,6	9,5
V03\2368500	250	95	250,8	94,4	2	339	0,26	13,0	9,4
V03\2368500	250	95	250,8	94,4	3	302	0,29	11,6	8,7
V03\2368500	250	95	250,8	94,4	4	272	0,33	10,8	8,4
V03\2393500	250	120	250,4	120,1	1	415	0,43	13,5	7,9
V03\2393500	250	120	250,4	120,1	2	371	0,48	12,1	6,3
V03\2393500	250	120	250,4	120,1	3	336	0,53	11,6	6,0
V03\2393500	250	120	250,4	120,1	6	261	0,68	9,8	5,4
V03\2393500	250	120	250,4	120,1	8	227	0,78	8,6	6,0
V03\2393m10	250	120	255,4	120,6	1	565	0,32	16,5	8,4
V03\2393m10	250	120	255,4	120,6	2	475	0,38	15,2	7,9
V03\2393m10	250	120	255,4	120,6	3	409	0,44	12,6	7,0
V03\2393m10	250	120	255,4	120,6	6	290	0,62	11,0	5,9
V03\2393m10	250	120	255,4	120,6	8	242	0,74	10,4	5,6
V03\5349500	500	76	504,3	76,6	1	112	0,46	11,6	15,9
V03\5349500	500	76	504,3	76,6	2	104	0,49	10,2	13,8
V03\5349500	500	76	504,3	76,6	3	97	0,53	8,3	13,0
V03\5349500	500	76	504,3	76,6	4	91	0,56	8,9	13,3
V03\5349m10	500	76	501,0	76,3	1	282	0,18	17,2	16,7
V03\5349m10	500	76	501,0	76,3	2	195	0,26	13,6	15,7
V03\5349m10	500	76	501,0	76,3	3	149	0,34	11,9	14,4
V03\5349m10	500	76	501,0	76,3	4	121	0,42	10,3	13,3
V03\5393500	500	120	496,5	122,5	1	282	0,67	13,0	7,8
V03\5393500	500	120	496,5	122,5	2	273	0,69	12,1	7,7
V03\5393500	500	120	496,5	122,5	3	264	0,71	11,2	7,4
V03\5393500	500	120	496,5	122,5	4	256	0,73	10,2	7,4
V03\5393m10	500	120	499,6	119,2	1	855	0,20	21,2	13,1
V03\5393m10	500	120	499,6	119,2	2	703	0,25	19,7	10,8
V03\5393m10	500	120	499,6	119,2	3	596	0,29	16,2	10,1
V03\5393m10	500	120	499,6	119,2	4	518	0,33	14,4	8,4

C.8. Imagens dos Ensaios da Série V03

A seguir são mostradas as imagens dos ensaios realizados utilizando a mesma substância iso-octano. Para cada ensaio são colocados as condições de temperatura de injeção, T_0 , pressão de injeção, P_0 , e a razão entre pressão de vapor e pressão da câmara, $R_p = P_{\text{sat}} / P_{\infty}$. A primeira, da sequência de imagens de cada ensaio, refere-se a uma das imagens originais adquiridas através do método “Schlieren” e a escala dimensional de 50 mm também é tomada através da plataforma que está na saída do bocal, conforme também é realçado apenas neste primeiro ensaio (1329500). Além disso, nas imagens da 2ª. câmara CCD, este ensaio apresenta uma escala dimensional de 5,2 mm que se refere a distância da linha de centro do jato até o canto do bocal, indicado na imagem. Apenas poucas imagens têm uma escala indicativa. Isto deve ocorrer quando a onda de choque pouco se destaca, não permitindo ao leitor este comparativo dimensional na imagem representativa.

Dentro de cada ensaio, existem outras imagens que são aquelas tratadas matematicamente com filtro subtrativo e submetidas ao mapa de cor que melhor realça os fenômenos envolvidos. As informações de pressão (P_0) e temperatura (T_0) de injeção do ensaio, assim como, a pressão média da câmara (P_{∞}) onde é descarregado o jato e a razão entre pressões de saturação e pressão média da câmara (R_p). A vazão mássica ($\dot{m}$) também é acrescentado em cada ensaio, seguido da velocidade do jato (u_1) na saída do bocal, assim como sua pressão de líquido metaestável (P_1) calculada através da vazão obtida, considerando como incompressível.

V03\1329500

(bocal de vidro: 0,35 mm)

$$P_0 = 123,5 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 56,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,27 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 25,2 \text{ kPa}$$

$$R_p = 92,3$$

$$\dot{m} = 1,1637 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 17,4 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 6,7 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

d) Combinação das imagens "b" e "c".

e) Imagem representativa (3 s após abertura do injetor).

c) Imagem "e" tratada (mapa de cores: hsv).

Obs.: o "fechamento" inferior da onda de choque ocorre à 0,8 mm após a saída do bocal, quando a pressão da câmara aumenta para 0,35 kPa, relativo à imagem "e". Esta posição coincide com o local onde inicia a onda de evaporação vista na imagem "b". No entanto, quando o jato era descarregado em uma pressão da câmara menor, como na imagem "a" que é de 0,21 kPa, este "fechamento" ocorreu rente à saída do bocal.

V03\1329m10

(bocal de vidro: 0,35 mm)

$$P_0 = 121,7 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 56,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,35 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 25,1 \text{ kPa}$$

$$R_p = 72,5$$

$$\dot{m} = 1,1534 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 17,2 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 6,9 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: hsv).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

V03\1349100

(bocal de vidro: 0,35 mm)

$$P_0 = 122,8 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 76,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,48 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 51,2 \text{ kPa}$$

$$R_p = 107,3$$

$$\dot{m} = 1,1119 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 17,0 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 15,2 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

Obs.: comparando com os ensaios anteriores, o aumento da temperatura de injeção diminuiu a distância onde ocorre a onda de evaporação para ~0,4 mm.

V03\1349500

(bocal de vidro: 0,35 mm)

$$P_0 = 121,2 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 76,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,23 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 50,8 \text{ kPa}$$

$$R_p = 219,3$$

$$\dot{m} = 1,0995 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 16,8 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 15,9 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

V03\1349m10

(bocal de vidro: 0,35 mm)

$$P_0 = 123,9 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 76,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,24 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 51,2 \text{ kPa}$$

$$R_p = 215,3$$

$$\dot{m} = 1,1186 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 17,1 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 15,1 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

e) Combinação das imagens “c” e “d”.

Obs.: o “fechamento” da parte inferior da onda de choque ocorreu abaixo da saída do bocal. No ensaio anterior também aconteceu isto.

saída do bocal

V03\1368100

(bocal de vidro: 0,35 mm)

$$P_0 = 123,2 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 94,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,86 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 88,8 \text{ kPa}$$

$$R_p = 102,8$$

$$\dot{m} = 1,0670 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 16,5 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 23,2 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem tratada (mapa de cores: hsv).

V03\1368500

(bocal de vidro: 0,35 mm)

$$P_0 = 123,7 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 95,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,23 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 90,5 \text{ kPa}$$

$$R_p = 397,6$$

$$\dot{m} = 1,0735 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 16,7 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 22,5 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

Obs.: A onda de choque se expandiu tanto que se aproximou da parede externa do bocal, ou seja, na plataforma superior do injetor.

V03\1368m10

(bocal de vidro: 0,35 mm)

$$P_0 = 143,2 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 95,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,20 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 90,7 \text{ kPa}$$

$$R_p = 461,6$$

$$\dot{m} = 1,1773 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 18,3 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 22,3 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

V03\2329100

(bocal de vidro: 0,35 mm)

$$P_0 = 248,6 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 57,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,41 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 25,9 \text{ kPa}$$

$$R_p = 63,2$$

$$\dot{m} = 1,6576 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 24,8 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 18,1 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem da 2ª. câmara CCD.

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

d) Combinação das imagens “b” e “c”.

Obs.: A onda de choque tem seu “fechamento” à ~0,5mm acima da saída do jato do bocal, enquanto que a onda de evaporação iniciou à 2mm desta saída.

e) Imagem tratada (mapa de cores: hsv).

f) Imagem tratada 2ª. câmara CCD.

V03\2349500

(bocal de vidro: 0,35 mm)

$$P_0 = 249,9 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 74,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 1,70 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 48,4 \text{ kPa}$$

$$R_p = 28,5$$

$$\dot{m} = 1,6326 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 24,9 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 24,4 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

Obs.: Neste caso, a onda de evaporação e o “fechamento” da onda de choque estão muito próximos da saída do bocal.

V03\2349m10

(bocal de vidro: 0,35 mm)

$$P_0 = 249,7 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 76,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,52 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 51,4 \text{ kPa}$$

$$R_p = 98,3$$

$$\dot{m} = 1,6197 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 24,7 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 27,5 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: jet).

c) Imagem da 2ª. câmara CCD.

V03\2368500

(bocal de vidro: 0,35 mm)

$$P_0 = 250,8 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 94,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,34 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 88,8 \text{ kPa}$$

$$R_p = 259,6$$

$$\dot{m} = 1,6133 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 25,0 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 28,6 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

V03\2393500

(bocal de vidro: 0,35 mm)

$$P_0 = 250,4 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 120,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,60 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 176,3 \text{ kPa}$$

$$R_p = 293,9$$

$$\dot{m} = 1,4921 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 23,8 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 56,1 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

d) Sexta imagem obtida em 3 s após a imagem "a".

Obs.: Após 3 s, é comprovado que a onda de choque formada se contrai. Neste intervalo, a pressão da câmara aumentou de 0,43 para 0,68 kPa.

V03\2393m10

(bocal de vidro: 0,35 mm)

$$P_0 = 255,4 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 120,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,53 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 178,7 \text{ kPa}$$

$$R_p = 339,3$$

$$\dot{m} = 1,4779 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 23,6 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 64,6 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: hsv).

c) Imagem tratada (mapa de cores: hsv).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

V03\5349500

(bocal de vidro: 0,35 mm)

$$P_0 = 504,3 \text{ kPa}$$

$$T_0 = 76,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\infty} = 0,58 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 51,2 \text{ kPa}$$

$$R_p = 88,5$$

$$\dot{m} = 2,3667 \text{ g/s}$$

$$u_1 = 36,1 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 40,4 \text{ kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: hsv).

c) Imagem tratada (mapa de cores: hsv).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

e) Combinação da imagem "c" e "d".

V03\5349m10

(bocal de vidro: 0,35 mm)

$$P_0 = 501,0 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 76,3 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 0,46 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 50,8 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 110,1$$

$$\dot{m} = 2,3511 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 35,8 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 43,2 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: hot).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

V03\5393500

(bocal de vidro: 0,35 mm)

$$P_0 = 496,5 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 122,5 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 0,75 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 187,7 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 252,0$$

$$\dot{m} = 2,1703 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 34,8 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 92,3 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: hsv).

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

V03\5393m10

(bocal de vidro: 0,35 mm)

$$P_0 = 499,6 \quad \text{kPa}$$

$$T_0 = 119,2 \quad ^\circ\text{C}$$

$$P_\infty = 0,36 \quad \text{kPa}$$

$$P_{\text{sat}} = 172,6 \quad \text{kPa}$$

$$R_p = 486,1$$

$$\dot{m} = 2,2003 \quad \text{g/s}$$

$$u_1 = 35,1 \quad \text{m/s}$$

$$P_1 = 85,8 \quad \text{kPa}$$

a) Imagem representativa.

b) Imagem tratada (mapa de cores: prism).

c) Imagem tratada (mapa de cores: gray).

d) Imagem da 2ª. câmara CCD.

LISTA DE REFERÊNCIAS

- Abbott, M. M. e Van Ness, H. C., 1989, *Schaum's Outline of Theory and Problems of Thermodynamics*, 2° ed., McGraw-Hill.
- Alamgir, Md. e Lienhard, J. H., 1981, *Correlation of Undershoot During Hot-Water Depressurization*, Journal of Heat Transfer, Transactions of the ASME, Vol. 103, pp. 52-55.
- Angelo, E., 2004, *Análise Numérica da Dinâmica da Expansão de Líquidos Superaquecidos em Evaporação Rápida*, tese de doutorado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Angelo, E. e Simões-Moreira, J. R., 2004, *Liquid Jets Expanding into a Low-Pressure Environment – Numerical Solution*, artigo n.º AP-8, Third International Symposium of Two-Phase Flow Modeling and Experimentation, Pisa, Italia.
- ANSI/ASME, Norma PTC 19.1-1985, *Measurement Uncertainty*.
- Arcoumanis, C., Gavaises, M., Flora, H., Roth, H., 2001, *Visualisation of cavitation in diesel engine injectors*, Mec. Ind., Vol. 2, pp. 375–381.
- Attou, A.; Bolle, L.; Seynhaeve, J.M., 2000, *Experimental study of the critical flashing flow through a relief line: evidence of the double-choked flow phenomenon*. International Journal of Multiphase Flow, Vol. 26, p.921-947.
- Athans, R. E., 1994, *The Rapid Expansion of Near-Critical Retrograde Fluid*, tese de doutorado apresentada ao Rensselaer Polytechnic Institute, Nova York, EUA.
- Athans, R. E. e Hirs, A., 1995, *A Photographic Study of a Small Flashing Jets*, Flow Visualization and Image Processing of Multiphase System, ASME, Vol. 209, pp. 201-206.

- Badock, C., Wirth, R., Fath, A., Leipertz, A., 1999, *Investigation of cavitation in real size diesel injection nozzles*, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 20, pp. 538-544.
- Baumann, H. D., 1963, *The Introduction of a Critical Flow Factor for Valve Sizing*, ISA Transactions, Vol. 2, n° 2, pp. 107-111.
- Benjamin, M.W. e Miller, J. G., 1941, *The Flow of Saturated Water through Throttling Orifices*, Transaction of the A.S.M.E., July, pp. 419-429.
- Burnell, J. G., 1947, *Flow of Boiling Water through Nozzles*, Engineering, December 12, pp. 1109-1116.
- Carey, V. P., 1992, *Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena*, Hemisphere Publishing Corporation.
- Crist, S., Sherman, P. M., and Glass, D. R., 1966, *Study of the Highly Underexpanded Sonic Jet*, AIAA Journal, Vol. 3, n° 1, pp. 68-71.
- Darby, R., 2004, *On two-phase frozen and flashing flows in safety relief valves - Recommended calculation method and the proper use of the discharge coefficient*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 17, pp. 255-259.
- Dettlef, G., Thompson, P. A., Meier, G. E. A. e Speckmann, H. D., 1979, *An Experimental Study of Liquefaction Shock Waves*, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 95, pp. 279-304.
- Edwards High Vacuum International, 1996, *Instruction Manual - CG 16K Capsule Dial Gauge*.

- Emrich, R. J., 1985, *Radial Flow of Metastable Liquid*, Proceedings of the 15th International Symposium on Shock Waves and Shock Tubes, July 28 – Aug 2, Stanford University, Berkeley, California, EUA, pp. 745-752.
- Faeth, G. M., Hsiang, L. -P. e, Wu, P. -K., 1995, *Structure and Breakup Properties of Spray*, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 21, Suppl., pp. 99-127.
- Ferro, E., Ghiazza, E., Bosio, B., Costa, P., 2002, *Modelling of flash and stripping Phenomena in deaerators for seawater desalination*, Desalination, Vol. 142, pp.171-180.
- Fox, R. W. e McDonalds, A. T., 1995, *Introdução à Mecânica dos Fluidos*, Ed. Guanabara.
- Fuchs, H. e Legge, H., 1979, *Flow of a water jet into vacuum*, Acta Astronautica, Pergamon Press Ltd., Vol. 6, pp. 1213-1226.
- 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 nº 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.
- ISA, 1995, *Flow Equations for Sizing Control Valves*, Norma ISA-S75.01-1985 (R1995).
- Kitamura, Y., Morimitsu, H. e, Takahashi, T., 1986, *Critical Superheated for Flashing of Superheated Liquid Jets*, Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, Vol. 25, nº 2, pp. 205-211.

- Kurschat, Th., Chaves, H. e Meier, G. E. A., 1992, *Complete Adiabatic Evaporation of Highly Superheated Liquid Jets*, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 236, pp. 43–59.
- Jernqvist, A., Jernqvist, M., Aly, G., 2001, *Simulation of thermal desalination processes*, Desalination, Vol.134, pp.187-193.
- Labuntsov, D. A. e Avdeev, A. A., 1982, *Mechanism of Flow Blockage Involving Shock Boiling of Liquid*, Teplofizica Vysokich Temperatur, Vol. 20, nº 1, pp. 88–95.
- Labuntsov, D. A. e Avdeev, A. A., 1982, *Mechanism of Transient Blowdown of a Flashing Liquid*, Teplofizica Vysokich Temperatur, Vol. 20, nº 2, pp. 288–295.
- Lacerda, N. L., 1986, *On the Start Up of Supersonic Under Expanded Jets*, tese de doutorado apresentada ao California Institute of Technology, California, EUA.
- Lambrakis, K. C., 1972, *Negative Γ Fluids*, Dissertação, Rensselaer Polytechnic Institute, Nova York, EUA.
- Lasheras, J. C. e Hopfinger, E. J., 2000, *Liquid Jet Instability and Atomization in a Coaxial Gas Stream*, Annual Reviews Fluid Mechanics, Vol. 32, pp.275–308.
- Leung, J. C., 2004, *A theory on the discharge coefficient for safety relief valve*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 17, pp. 301–313.
- Lenzing, T., Friedel, L. Cremers, J. Alhusein, M., 1998, *Prediction of the maximum full lift safety valve two-phase flow capacity*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 11, pp. 307–321.
- Lienhart, J. H. e Day, J. B., 1970, *The Breakup of Superheated Liquid Jets*, Transaction of the ASME - Journal of Basic Engineering, Vol. 92, pp. 515-521.

- Lin, S. P. e Reitz, R. D., 1998, *Drop and Spray Formation From a Liquid Jet*, Annual Reviews Fluid Mechanics, Vol. 30, pp. 85–105.
- Okuyama, K., Tsukahara, S., Morita, N., I., Yoshihiro, 2004, *Transient behavior of boiling bubbles generated on the small heater of a thermal ink jet printhead*, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 28, pp. 825–834.
- Khoo, B.C., Klaseboer, E. e Hung K.C., 2005, *A collapsing bubble-induced micro-pump using the jetting effect*, Sensors and Actuators A, Vol. 118, pp. 152–161.
- Ogle, R. A., Megerle, M. V., Morrison III, D. R., Carpenter, A. R., 2004, *Explosion caused by flashing liquid in a process vessel*, Journal of Hazardous Materials, Vol. 115, pp. 133–140.
- Omega Engineering, Inc., 1993, *Thermocouple Reference Tables*.
- Oza, R. D., 1984, *On the Mechanism of Flashing Injection of Initially Subcooled Fuels*, Journal Fluid Engineering, Transactions of the ASME, Vol. 106, pp. 105–109.
- Oza, R. D. e Sinnamon, J. F., 1983, *An Experimental and Analitical Study of Flash-Boiling Fuel Injection*, SAE International Congress & Exposition, artigo n.º 830590, Detroit, Michigan, 28 fevereiro-4 março.
- Peter, E. M., Takimoto, A. e Hashiro, Y., 1994, *Flashing and Shattering Phenomena of Superheated Liquid Jets*, JSME International Journal, Série B, Vol. 37, nº 2, pp. 313–321.
- Pianthong, K., Zakrzewski, S., Behnia, M. e, Milton, B.E., 2002, *Supersonic Liquid Jets: Their Generation and Shock Wave Characteristic*, Shock Wave Journal, Vol. 11, nº 6, pp. 457–466.

- Pinti, D. L., Marty, B., 1998, *Separation of noble gas mixtures from petroleum and their isotopic analysis by mass spectrometry*, Journal of Chromatography A, Vol. 824, pp. 109–117.
- Ramamurthi, K. e Nandakumar, K., 1994, *Disintegration of Liquid Jets From Sharp-Edged Nozzles*, “Atomization and Spray”, Vol. 4, pp. 551-564.
- Reid, R. C., 1976, *Superheated Liquids*, American Scientist, Vol. 64, pp. 146-56.
- Reitz, R. D., 1990, *A Study Photographic of Flash-Boiling Atomization*, Aerosol Science and Technology, Vol. 12, pp. 561-569.
- Shepherd, J. E., McCahan, S. e Cho, J., 1989, *Evaporation Waves Model for Superheated Liquid*, *Adiabatic Waves in Liquid-Vapor Systems*, eds. Meier, G. E. A. e Thompson, P. A., Springer-Verlag, pp. 3-12.
- Simões-Moreira, J. R., e Bullard, C. W., 2003, *Pressure Drop and Flashing Mechanisms in Refrigerant Expansion Devices*, International Journal of Refrigeration, Vol. 26, nº 7.
- Simões-Moreira, J. R., Vieira, M. M. e, Angelo, E., 2002, *Highly Expanded Flashing Liquid Jets*, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 16, nº 3, pp. 415-424.
- Simões-Moreira, J. R., 2000, *Oblique Evaporation Waves*, Shock Waves — An International Journal on Shock Waves, Detonations and Explosions, Vol. 10, nº 4, pp. 229-234.
- Simões-Moreira, J. R. 1999, *Aplicação da Teoria das Ondas de Evaporação aos jatos evaporativos*, tese de livre docência apresentada, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

- Simões-Moreira, J. R. e Shepherd, J. E., 1999, *Evaporation Waves in Superheated Dodecane*, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 382, pp. 63-86.
- Simões-Moreira, J. R., 1994, *Adiabatic Evaporation Waves*, tese de doutorado apresentada ao Rensselaer Polytechnic Institute, Nova Iorque, EUA.
- Simões-Moreira, J. R., McCahan S., e Shepherd, J. E., 1993, *Complete Evaporation Waves*, artigo n.º 93-FE-7, ASME - Fluids Engineering Conference, EUA.
- Stawczyk, J., 2003, *Experimental evaluation of LPG tank explosion hazards*, Journal of Hazardous Materials, Vol. B 96, pp. 189–200.
- Skripov, V. P., 1974, *Metastable Liquids*, John Wiley & Sons.
- Thompson, P. A., 1988, *Compressible-Fluid Dynamics*.
- Thompson, P. A. e Sullivan, D. A., 1975, *On the Possibility of Complete Condensation Shock Waves in Retrograde Fluids*, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 95, pp. 279-304.
- van den Berg, A.C., van der Voort, M.M., Weerheijm, J. e Versloot, N.H.A, 2004, *Expansion-controlled evaporation: a safe approach to BLEVE blast*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 17, pp. 397–405.
- Vieira, M. M., 1999, *Estudo Experimental de Jatos Evaporativos*, Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Villani, E. e Simões Moreira, J. R., 1997, *Proditer - Programa Computacional Didático de Termodinâmica*, Trabalho de Formatura, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo e, Relatório Final de bolsa de iniciação científica FAPESP, processo nº 96/02070-9.

- Wang, X., Zhub, C., Ahluwalia, R., 2004, *Numerical simulation of evaporating spray jets in concurrent gas–solids pipe flows*, *Powder Technology*, Vol. 140, pp. 56–67.
- Wildgen, A. e Straub, J., 1989, *The Boiling Mechanism in Superheated Free Jets*, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 15, No. 2, pp. 193-207.
- Witlox, H. W. M. e Bowen, P. J., 2002, *Flashing Liquid Jets and Two-phase Dispersion*, HSE – Health and Safety Executive, #403/2002.
- Yildiz, D., Rambaud, P., Van Beeck, J.P.A.J., Buchlin, J-M., 2003, *Thermal characterization of a R134A two-phase flashing jet*, ICLASS 2003 – 9th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Sorrento, Italia, Julho 13-18.
- Yu, Z., Garcia, A. S., Johnston, K. P. e Williams, R. O., 2004, *Spray freezing into liquid nitrogen for highly stable protein nanostructured microparticles*, *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, Vol. 58, pp. 529–537.

Apêndice I

Análise de Incerteza e Calibrações

APÊNDICE I

ANÁLISE DE INCERTEZAS, INSTRUMENTAÇÃO E CALIBRAÇÕES

I.1. A Análise de Incerteza

Nesta seção são apresentados alguns procedimentos e termos de forma genérica e resumida que são utilizados na análise de incerteza da leitura das medidas aqui mencionadas.

Inicialmente, para a análise da incerteza de uma leitura, é necessário verificar os erros associados desta medida como: o limite de desvio e o limite de precisão. O limite de desvio é considerado um erro sistemático (B) que está associado a acurácia do equipamento, enquanto, o limite de precisão (P) está associado ao dobro do erro aleatório da leitura da medição, para uma confiabilidade de 95%. Este erro aleatório, na leitura de um equipamento, se refere à metade da menor escala legível. Desta forma, a incerteza total de uma certa leitura (U) pode ser escrita como:

$$U = \sqrt{B^2 + P^2} . \quad (\text{I.1a})$$

No entanto, se o erro aleatório provém de uma análise estatística de uma determinada medida, pode-se associá-lo ao desvio padrão da amostra (σ). Geralmente, nas análises a seguir, este procedimento é feito através de um levantamento de curva de ajuste em função dos dados obtidos experimentalmente. Neste caso, para uma confiabilidade de 95%, é necessário multiplicar este desvio por dois para obter o limite de precisão total deste parâmetro.

$$U = \sqrt{B^2 + (2 * \sigma)^2} . \quad (\text{I.1b})$$

Se existem medições independentes no procedimento, as incertezas associadas à calibração são obtidas pela raiz da soma dos quadrados da incerteza de cada equipamento envolvido na calibração.

A partir da incerteza verificada em uma leitura, é possível conferir a sua propagação de erro em outros parâmetros dependentes desta. No estudo feito neste trabalho, a propagação do erro em determinado parâmetro (no caso, como exemplificação genérica, o parâmetro X , dependente das leituras A_x , B_x , C_x , etc.), pode ser obtida através de:

$$U_X^2 = \left(\frac{\partial X}{\partial A_x} \right)^2 U_{A_x}^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial B_x} \right)^2 U_{B_x}^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial C_x} \right)^2 U_{C_x}^2 + \dots \quad (\text{I.2})$$

onde,

$$X = f(A_x, B_x, C_x, \dots).$$

Outros termos e procedimentos no estudo da propagação de erro também são necessários nesta análise, porém serão oportunamente explicados na seção onde estão sendo apresentados. É importante ressaltar que esta pequena explanação se baseia na norma ANSI/ASME PTC 19.1 Parte I, e foi resumida para apresentar o escopo da análise de incerteza aqui feita.

I.2. Medição da vazão

A medição da vazão experimental (Q) é obtida pela medição do deslocamento do nível volumétrico da pipeta (ΔV), como descrito na Seção 3.3 e o intervalo de injeção (Δt).

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (\text{I.3})$$

Na leitura do deslocamento volumétrico existe um limite de desvio ($B_{\Delta V}$) desprezível em relação ao limite de precisão ($P_{\Delta V}$) igual a 0,050 ml, que é o dobro da menor escala do instrumento. Desta forma, a incerteza desta medida ($U_{\Delta V}$) continua sendo igual a 0,050 ml.

Quanto à medição do intervalo de tempo da injeção, a incerteza está somente associada ao limite de precisão para identificação do transitório identificado nos dados da pressão de injeção (ver gráfico da Fig. 3.10), ou seja, quando a injeção dá início, a pressão diminui em média 1000 Pa em 0,002 s e quando fecha, a pressão aumenta em média 1000 Pa em 0,002 s, aproximadamente. Desta forma, pode-se

colocar com segurança um valor de 0,004 s de incerteza ($U_{\Delta t}$). Conhecendo as incertezas do deslocamento volumétrico e do instante, a análise da propagação destes erros na leitura da vazão, obtida pelas Eqs. (I.2 e I.3), pode ser vista na equação a seguir:

$$\frac{B_Q}{Q} = \sqrt{\left(\frac{U_{\Delta V}}{\Delta V}\right)^2 + (-1)^2 \cdot \left(\frac{U_{\Delta t}}{\Delta t}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0,050}{6,00}\right)^2 + \left(\frac{0,004}{3,000}\right)^2} = 0,00844 \quad (\text{I.4})$$

Tomando como base que os líquidos injetados tiveram um volume de injeção médio de 6,00 ml em um tempo de injeção efetivo de 3,00 s, tem-se uma razão do desvio sistemático da vazão de 0,844 %.

No entanto, além da medição do volume total, existe uma medição das vazões através dos sensores. A média das leituras destas vazões corresponde ao valor da vazão real tomada no experimento, conseqüentemente, deste valor médio deve se agregar um desvio da média. De 114 ensaios, a média dos desvios da média destas medições corresponde ao valor de 0,018 ml/s. A associação deste erro aleatório com o erro sistemático obtido na Eq. (I.4), fornece a incerteza total da leitura da vazão, aqui exposto na forma percentual.

$$\frac{U_Q}{Q} = \sqrt{\left(\frac{B_Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{2 * S_Q}{Q}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0,0169}{2,00}\right)^2 + \left(\frac{2 * 0,018}{2,00}\right)^2} = 0,0199 \text{ ou } 1,99\% \quad (\text{I.5})$$

I.3. Medição da pressão do sistema de vácuo

Neste sistema, a medição é feita após 5 minutos do desligamento da bomba de vácuo a fim de se alcançar o equilíbrio. Como foi visto na Seção 3.1, dois instrumentos fazem a medição de pressão: (1) vacuômetro analógico e (2) mano-vacuômetro de mercúrio. A seguir estão identificados na Tab. I.1 os desvios das leituras de cada um e o valor da incerteza, correspondendo sempre com um intervalo de 95% de confiabilidade.

O limite do desvio (B) do vacuômetro analógico é de 2% do fundo de escala, segundo o manual do instrumento (manual do fabricante Boc-Edwards do vacuômetro analógico, escala de 0 a 25 mbar), e o limite de precisão (P) é a

identificação da menor escala possível de se visualizar, que neste caso, é menor que a metade de sua resolução. A resolução é de 0,10 mbar.

Tabela I.1 - Incerteza da medição do sistema de vácuo (valores em mbar).

Equipamento	Intervalo de medição	Limite de Desvio (B)	Limite de Precisão (P)	Incerteza (U)
Vacuômetro analógico	0 a 2,5 kPa	0,50	0,20	0,54 mbar ou 0,054 kPa
Mano-vacuômetro de Hg	2,5 a 200 kPa	0,00	0,94	0,94 mbar ou 0,094 kPa

Para o mano-vacuômetro de mercúrio, o limite de desvio (B) é desprezível. Quanto ao limite de precisão (P), que é um erro aleatório, é a metade da menor escala de leitura, portanto é de 0,5 mmHg ou 0,667 mbar, como essa medição também é associada a medição no barômetro com o mesmo limite de precisão, tem-se que o valor total deste erro é a raiz quadrada da soma dos quadrados dos limites de precisão resultando em 0,943 mbar.

Além destes instrumentos, foi implantado a partir da série de ensaios “RUN2” um sensor para baixíssimas pressões, o modelo APGX-16 de fabricação da BOC-Edwards. Possui uma melhor qualidade de precisão e suas medições são registradas eletronicamente pelo sistema de aquisição de dados. No entanto, a cada imagem obtida em um ensaio, quando ela é relacionada com o tempo em que foi adquirida, existe um erro de 0,5 s, aproximadamente, correspondendo a uma variação de 0,05 kPa em média. Desta forma, o erro associado a esta leitura fica muito próximo do vacuômetro CGK16, não modificando a incerteza desta leitura nesta escala de pressão mais baixa, conseqüentemente, mantendo o mesmo valor no quadro da Tab I.1, praticamente.

I.4. Medição da pressão de injeção

A medição da pressão de injeção é feita através do transdutor, modelo XTE 190-250A, com escala de 0 a 1000 kPa, da marca Kulite. O procedimento de calibração é feito pressurizando a linha de injeção da bancada experimental onde é feita a leitura de valores da pressão da linha através do manômetro padrão da marca Heise (0 a 1000 kPa), com escala mínima de 0,5 kPa. Os dados da leitura do manômetro são comparados com os dados feitos pelo sistema de aquisição de dados que é utilizado na bancada experimental.

A Tab. I.2 apresenta as características básicas dos equipamentos envolvidos. Nesta tabela, o erro sistemático confere a acurácia do equipamento que seria 0,1% do fundo de escala, e o erro aleatório está associado à precisão de leitura que é a metade da escala. O primeiro erro se refere ao limite de desvio, enquanto que o dobro do erro aleatório equivale ao limite de precisão, basicamente. A raiz quadrada da soma dos quadrados dos limites de desvio e de precisão determina a incerteza de cada equipamento.

Os valores medidos e estimados pelo ajuste de curva encontrado pelo método dos mínimos quadrados estão na Tab. I.3 e estão representados no gráfico da Fig. I.2.

Tabela I.2 - Descrição e desvios dos equipamentos.

Equipamento	Manômetro Padrão	Sist. aquisição de dados
Tipo	analógico	Condicionador de sinais + Conversor A/D
Escala	0 a 1000 [kPa]	0 a 5 [V] – 12 bits
Fabricante	Heise	Lynx
Modelo	-	MSC1000 e CAD1236
Resolução	0,50 [kPa]	0,61035 [mV]
Erro Sistemático	1,00 [kPa]	-
Erro Aleatório	0,25 [kPa]	0,61035 [mV] => 0,197 [kPa]*
Lim. desvio: B	1,00 [kPa]	-
Lim. precisão: P	0,50 [kPa]	0,394 [kPa]
Incerteza: U	1,118 [kPa]	0,394 [kPa]

* conversão feita da derivada da Eq. I.6.

A equação de conversão linear da leitura no transdutor, V em volts, para a medida P , em kiloPascal, é:

$$P = 322,65 * V + 0,6104 \quad (I.6)$$

Figura I.1 - Gráfico da curva de calibração do transdutor de pressão.

O valor SEE ("Standard Error of Estimate"), representado na Tab. I.3, é o desvio padrão devido a correção dos valores estimados pela curva dada pela Eq. I.6, e pode ser calculado segundo a Eq. I.7, conforme determina a norma da ANSI/ASME PTC 19.1 Parte I,

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum (Erro)^2}{N - 2}} \quad (I.7)$$

onde, $\sum (Erro)^2$ é a somatória das diferenças dos valores estimados com os valores lidos em tal procedimento e, N é o número de amostras.

Tabela I.3 - Calibração do transdutor de pressão.

Leitura do conversor A/D [volts]	Pressão medida [kPa]	Ajuste Eq. I.5 [kPa]	Erro [kPa]
0,2906	93,200	94,372	-1,172
0,2913	93,450	94,598	-1,148
0,4570	147,500	148,061	-0,561
0,6202	201,000	200,718	0,282
0,6379	206,700	206,429	0,271
0,9323	302,300	301,417	0,883
0,9541	308,800	308,451	0,349
1,2209	395,500	394,534	0,966
1,5270	493,600	493,297	0,303
1,8567	599,200	599,675	-0,475
1,8639	602,500	601,998	0,502
2,1493	693,100	694,082	-0,982
2,1860	706,000	705,923	0,077
2,4307	784,000	784,876	-0,876
$\Sigma (\text{Erro})^2 =$			7,3036
SEE =			0,7802

Sendo assim, o valor de $\pm 2*SEE$ corresponde ao intervalo de confiança de 95% nos valores da curva estimada e convertida em Pascal é de 1,560 kPa.

Desta forma, combinando as incertezas do manômetro de precisão (U_{mano}), do sistema de aquisição de dados (U_{aq}) e da curva de ajuste ($2*SEE$), tem-se o valor da incerteza da primeira etapa igual a 1,959 kPa, conforme a Eq. I.8:

$$U_1 = \sqrt{(U_{mano})^2 + (U_{aq})^2 + (2*SEE)^2} = \sqrt{(1,118)^2 + (0,394)^2 + (1,560)^2} = 1,959 \text{ kPa} \quad (\text{I.8})$$

Cabe ressaltar que o transdutor de pressão está na linha de injeção a 40 cm do injetor e sua temperatura praticamente não se diferencia da temperatura ambiente, portanto, não sofre desvios devido à temperatura.

I.5. Medição da temperatura de injeção

A calibração da temperatura do sistema de injeção segue o mesmo procedimento da calibração do transdutor de pressão, que foi calibrado

conjuntamente com o condicionador de sinal e com o computador que possui a placa de aquisição de dados cujos equipamentos são utilizados na bancada experimental. Durante a calibração, o termopar esteve instalado na posição de funcionamento do injetor (ver Fig. 3.7). Onde estaria o fluido de teste, é utilizado um banho de óleo com um termômetro padrão para a devida calibração. O registro da leitura do termopar compete ao sistema de aquisição de dados que está associado aos equipamentos de conversão analógico-digital e condicionamento de sinais. O condicionador de sinal está ajustado no canal "2" para um ganho nominal de 300 vezes. Desta forma, foram levantados os dados indicados na Tab. I.4, onde a primeira coluna é a tensão medida pelo conversor A/D, seguida da leitura feita pelo termômetro padrão. Na terceira coluna está a temperatura estimada através do ajuste de curva (Eq. I.9) seguido do desvio estimado quando é feita a correção por regressão linear e, finalmente, estão apresentados os instrumentos padrões utilizados.

$$T = -10,9409 * V^2 + 95,8553 * V - 0,3296 \quad (I.9)$$

Esta curva de calibração está representada na Fig. I.2. No caso, T é a temperatura estimada em função da tensão elétrica lida pelo sistema que agrega o termopar, o condicionador de sinais e o conversor A/D.

Tabela I.4 – Calibração do Termopar.

Tensão x 300 (volts)	Temperatura Medida (°C)	Temperatura Estimada (°C)	Diferença pelo ajuste (°C)	Instrumento de Aferição
1,7892	136,0	136,15	0,15	termômetro 0-150 (escala 1°C)
1,8009	137,0	136,81	-0,19	termômetro 0-150 (escala 1°C)
1,5522	122,0	122,10	0,10	termômetro 0-150 (escala 1°C)
1,5347	121,0	121,01	0,01	termômetro 0-150 (escala 1°C)
1,5059	119,0	119,21	0,21	termômetro 0-150 (escala 1°C)
1,1771	97,0	97,34	0,34	termômetro 80-100 (escala 0,1°C)
1,1471	95,4	95,23	-0,17	termômetro 80-100 (escala 0,1°C)
1,1419	95,0	94,86	-0,14	termômetro 80-100 (escala 0,1°C)
1,0286	87,1	86,69	-0,41	termômetro 80-100 (escala 0,1°C)
0,9513	81,5	80,96	-0,54	termômetro 80-100 (escala 0,1°C)
0,5288	46,7	47,30	0,60	termômetro 40-60 (escala 0,1°C)
0,4899	43,5	44,00	0,50	termômetro 40-60 (escala 0,1°C)
0,3558	32,7	32,39	-0,31	termômetro 20-40 (escala 0,1°C)
0,3474	31,7	31,65	-0,05	termômetro 20-40 (escala 0,1°C)
0,1775	16,2	16,34	0,14	termômetro 0-20 (escala 0,1°C)
0,1876	17,1	17,27	0,17	termômetro 0-20 (escala 0,1°C)
0,1880	17,3	17,30	0,00	termômetro 0-20 (escala 0,1°C)
0,2014	18,6	18,53	-0,07	termômetro 0-20 (escala 0,1°C)
0,2085	19,2	19,18	-0,02	termômetro 0-20 (escala 0,1°C)
0	0	-0,33	-0,33	
		SEE:	0,299

Fig. I.2 – Curva de calibração do termopar.

Tabela I.7 - Calibração do condicionador e da placa de aquisição de sinais.

Equipamento	Condicionador de sinais	Placa de aquisição
Tipo	8 canais	16 canais
Escala	0 a 5 [V]	0 a 5 [V]
Ganho nominal	300	-
Fabricante	Lynx	Lynx
Modelo	Msc1000	Cad 1236
Resolução	-	12 bits
Erro sistemático	-	-
Erro aleatório	0,00061035 [V] => 0,05 [°C]	
Limite de desvio (B_T):	-	
Limite de precisão (P_T):	0,10 [°C]	
Incerteza (U_{aq}):	0,10 [°C]	

Na Tab. I.5, são expostas as especificações dos equipamentos do sistema de aquisição de dados. Nestes equipamentos apenas existem os erros aleatórios. A

associação destes erros aleatório, que é determinado pela precisão do sistema de aquisição de dados é de 0,10 °C.

A associação da incerteza do termômetro padrão associado com as incertezas do sistema de aquisição de dados e da curva de ajuste é:

$$U_1 = \sqrt{(U_{\text{termo}})^2 + (U_{\text{aq}})^2 + (2 * SEE)^2} = \sqrt{(1,00)^2 + (0,10)^2 + (2 * 0,30)^2} = 1,17^\circ\text{C} \quad (\text{I.10})$$

Desta forma, a incerteza total da temperatura de injeção é de 1,2 °C.

I.6. Determinação da incerteza do coeficiente de descarga

Para determinação do coeficiente de descarga (C_D) foi utilizado como fluido de teste a própria substância iso-octano, que era injetado no injetor da bancada, com pressões de injeção (P_0) previamente determinadas e medidas pelo transdutor. Cabe lembrar que, no levantamento do C_D , a pressão da câmara sempre foi maior que a pressão de vapor do líquido. A vazão experimental (Q) foi obtida através do deslocamento do nível na pipeta volumétrica (ΔV) e pelo intervalo de tempo de injeção (Δt) destacados pelo transitório que ocorre na pressão de injeção, e estava programado para durar em média 4,25 s, com um deslocamento médio de 8,5 ml. Seguindo o mesmo procedimento de cálculo da Seção I.2, o desvio sistemático da vazão é de 0,0119 ml ou 0,0060 %, para uma vazão de 2 ml/s. O volume específico (v_l) do iso-octano utilizado na calibração era de 0,001456 m³/kg a uma temperatura ambiente de 25°C. Os limites de variação desta densidade, conforme erro de ajuste de curva é de $\pm 0,000003$ m³/kg. O diâmetro do bocal (D_b) é de 0,3085 mm, com precisão de 0,001 mm, assim a área (A) do bocal é de 0,074748 mm², com uma incerteza de 0,0004846 mm². A pressão da câmara (P_∞) era atmosférica e seu valor correspondia à 93,46 kPa. Conforme a equação que determina o coeficiente de descarga baseada na Equação de Bernoulli, se tem:

$$C_D = \frac{Q}{A_b * \sqrt{2 * v_l * (P_0 - P_\infty)}} \quad (\text{I.11})$$

e a área,

$$A_b = \frac{\pi * D_b^2}{4}.$$

O erro do valor do coeficiente de descarga (C_D), por causa dos desvios de cada termo da Eq. I.11, é considerado um erro sistemático (B_{C_D}). Com isso, podemos escrever que o erro sistemático do coeficiente de descarga é obtido pela Eq. I.12, onde os termos com U são as incertezas das respectivas medições obtidas nas seções anteriores. No caso do erro de leitura da vazão, aqui é apenas considerado o desvio sistemático, pois na etapa seguinte, será acrescentado o erro aleatório incluso no levantamento da curva de calibração do C_D .

$$\left(\frac{B_{C_D}}{C_D}\right)^2 = (1)^2 \left(\frac{B_Q}{Q}\right)^2 + (-1)^2 \left(\frac{U_{Ab}}{A_b}\right)^2 + \left(\frac{-1}{2}\right)^2 \left(\frac{U_{v_l}}{v_l}\right)^2 + \left(\frac{-1}{2}\right)^2 \left(\frac{U_p}{(P_0 - P_\infty)}\right)^2 \quad (\text{I.12})$$

Resolvendo esta equação, encontra-se a variação máxima (B_{C_D} / C_D) de 1,32 %. Logo, para um valor médio de C_D igual a 0,922, tem-se o desvio B_{C_D} igual a 0,01217.

Para determinação do erro aleatório, foram realizados 25 ensaios que estão mostrados na Tab. I.8 e ilustrados na Fig. I.3, graficamente. Através dos dados experimentais, o cálculo do C_D foi ajustado pela curva que se encontra a seguir onde,

$$C_D = 0,9673 - \frac{5,6682}{\sqrt{\text{Re}}} \quad (\text{I.13})$$

Desta forma, é possível determinar o erro aleatório de tal coeficiente. Para uma confiabilidade de 95% deve-se tomar o *SEE* do ajuste da curva do C_D (ver Tab. I.8 onde é visto que o *SEE* é igual a 0,00633) e multiplicá-lo por 2 para obter o limite de precisão (P_{C_D}) de 0,01266.

Como o limite de desvio (B_{C_D}) do coeficiente de descarga é de 0,01217 e o limite de precisão é de 0,01266, pode-se obter a incerteza do coeficiente de descarga pelo seguinte cálculo:

$$U_{C_d} = \sqrt{(B_{C_D})^2 + (2 * SEE)^2} = \sqrt{(B_{C_D})^2 + (P_{C_D})^2} = 0,01756 \quad (\text{I.14})$$

Tabela I.8 - Ensaios para determinação do coeficiente de descarga (C_D) do bocal de aço de 0,3 mm de diâmetro.

Ensaio	Diferença de pressões ($P_0 - P_\infty$) [kPa]	$\dot{m}$ [kg/s]	Re [-]	C_D [-]	Ajuste C_D [-]
1	496,0	1,825E-03	15741	0,935	0,922
2	449,4	1,718E-03	14811	0,925	0,921
3	409,8	1,634E-03	14087	0,921	0,919
4	394,1	1,593E-03	13737	0,916	0,919
5	380,4	1,574E-03	13577	0,921	0,919
6	314,5	1,439E-03	12411	0,926	0,916
7	303,1	1,413E-03	12181	0,926	0,916
8	269,6	1,316E-03	11352	0,915	0,914
9	215,2	1,172E-03	10107	0,912	0,911
10	207,5	1,144E-03	9868	0,907	0,910
11	200,0	1,125E-03	9700	0,908	0,910
12	99,2	7,816E-04	6740	0,896	0,898
13	95,8	7,641E-04	6589	0,891	0,897
14	86,4	7,310E-04	6304	0,898	0,896
15	488,5	1,784E-03	15388	0,921	0,922
16	473,7	1,751E-03	15096	0,918	0,921
17	752,7	2,218E-03	19124	0,923	0,926
18	706,7	2,154E-03	18572	0,925	0,926
19	819,8	2,324E-03	20044	0,927	0,927
20	200,0	1,094E-03	16417	0,917	0,923
21	194,6	1,083E-03	16182	0,920	0,923
22	157,5	9,576E-04	16723	0,912	0,923
23	160,7	9,812E-04	17135	0,925	0,924
24	141,2	9,095E-04	13677	0,907	0,919
25	73,9	6,652E-04	11571	0,925	0,915
				SEE=	0,00633

Figura I.3 – Gráfico do coeficiente de descarga em função do C_D , para o bocal de aço de 0,3 mm de diâmetro.

A incerteza obtida pela Eq. I.14 foi vinculada a uma diferença de pressão de 100 kPa. Esta diferença de pressão resulta na maior propagação do desvio do coeficiente de descarga. Para outras diferenças de pressão, segue a Tab. I.9, com valores mais exatos desta incerteza. Nela se encontra os valores das diferenças de pressão seguida da respectiva vazão esperada. Depois estão os valores dos limites sistemáticos e de precisão. A incerteza corresponde à associação dos dois limites.

Tabela I.9 – Incertezas relacionadas à medição do coeficiente de descarga em função da diferença entre a pressão de injeção e a pressão da câmara.

Diferença de pressões ($P_0 - P_\infty$) [kPa]	Q [ml/s]	B_{Cd} [-]	P_{Cd} [-]	U_{Cd} [-]	U_{Cd} / C_D [%]
100	1,24	0,01217	0,01266	0,01756	1,90
200	1,75	0,00933	0,01266	0,01573	1,71
300	2,15	0,00870	0,01266	0,01536	1,67
400	2,48	0,00847	0,01266	0,01523	1,65
500	2,77	0,00836	0,01266	0,01517	1,65
600	3,04	0,00830	0,01266	0,01514	1,64
700	3,28	0,00826	0,01266	0,01512	1,64

A seguir são apresentados os levantamentos experimentais do C_D do bocal de aço de 0,798 mm (ou simplesmente, 0,8 mm) de diâmetro e do bocal de vidro com 0,348 mm de diâmetro (ou simplesmente, 0,35 mm). O procedimento de levantamento das curvas destes bocais é o mesmo do bocal de aço de 0,3085 mm de diâmetro.

Tabela I.10 - Ensaios para determinação do coeficiente de descarga (C_D) do bocal de aço de 0,798 mm de diâmetro.

Ensaio	Diferença de pressões ($P_0 - P_\infty$) [kPa]	$\dot{m}$ [kg/s]	Re [-]	C_D [-]	Ajuste C_D [-]
1	544,0	1,245E-02	39095	0,910	0,910
2	495,7	1,202E-02	37753	0,920	0,909
3	477,1	1,171E-02	36788	0,914	0,908
4	444,0	1,107E-02	34755	0,895	0,905
5	392,9	1,053E-02	33064	0,905	0,903
6	367,3	1,021E-02	32081	0,909	0,901
7	329,4	9,595E-03	30135	0,901	0,899
8	317,4	9,421E-03	29588	0,902	0,898
9	297,1	9,037E-03	28383	0,894	0,896
10	249,5	8,223E-03	25828	0,888	0,891
11	203,1	7,392E-03	23216	0,884	0,885
12	164,2	6,587E-03	20689	0,876	0,878
13	145,8	6,196E-03	19459	0,875	0,875
14	115,2	5,462E-03	17156	0,868	0,867
15	97,7	5,019E-03	15764	0,866	0,861
16	466,2	1,129E-02	35464	0,914	0,906
17	449,3	1,093E-02	34328	0,898	0,905
18	433,6	1,075E-02	33767	0,897	0,904
19	417,8	1,061E-02	33331	0,901	0,903
20	365,5	9,802E-03	30785	0,887	0,900
21	342,5	9,410E-03	29556	0,896	0,898
				SEE=	0,00612

A Tab. I.10 indica os valores obtidos no levantamento do C_D do bocal de aço de 0,8 mm de diâmetro (ou 0,798 mm, precisamente). A curva levantada através destes valores é:

$$C_D = 0,9954 - \frac{16,827}{\sqrt{Re}} \quad (I.15)$$

Da mesma forma, para o bocal de vidro de 0,3 mm de diâmetro (ou 0,348 mm, precisamente), a Tab. I.11 apresenta os valores do levantamento do C_D e a equação que representa o comportamento do C_D em função do número de Reynolds é:

$$C_D = 0,9963 - \frac{8,8247}{\sqrt{Re}} . \quad (I.16)$$

As faixas de incerteza calculados no bocal de aço de 0,3 mm serão as mesmas para estes bocais.

Tabela I.11 - Ensaios para determinação do coeficiente de descarga (C_D) do bocal de vidro de 0,348 mm de diâmetro.

Ensaio	Diferença de pressões ($P_0 - P_\infty$) [kPa]	$\dot{m}$ [kg/s]	Re [-]	C_D [-]	Ajuste C_D [-]
1	111,7	1,153E-03	8476	0,903	0,900
2	104,0	1,104E-03	8112	0,896	0,898
3	87,7	1,009E-03	7418	0,892	0,894
4	71,3	9,061E-04	6659	0,888	0,888
5	68,8	8,895E-04	6537	0,887	0,887
6	51,2	7,614E-04	5595	0,880	0,878
7	161,0	1,369E-03	20189	0,936	0,934
8	199,1	1,529E-03	19309	0,931	0,933
				SEE=	0,00216

I.7. Determinação da pressão do líquido metaestável

Antes de iniciar com o procedimento de cálculo da incerteza deste parâmetro, é necessário recapitular os limites de erros e incertezas já calculados. Na Tab. I.12, são mostrados as leituras de volume, de tempo, de vazão, pressão de injeção, temperatura de injeção, volume específico, diâmetro de saída do bocal, área na saída do bocal e, coeficiente de descarga. Na coluna seguinte, estão expostas as unidades destas leituras, com exceção do coeficiente de descarga que é um adimensional. A seguir, tem-se a grandeza das medidas envolvidas. Com relação ao coeficiente de descarga, cada pressão de injeção resultará em um valor deste coeficiente, assim como, incertezas e limites sistemáticos e de precisão associados. Isto porque a vazão é proporcional à raiz da diferença de pressões e, o coeficiente de descarga também é proporcional a diferença de pressões por causa da influência da vazão em cima do número de Reynolds.

Tabela I.12 – Quadro das incertezas e limites envolvidos na medição da pressão do líquido na saída do bocal.

Leitura	Unidade	Grandeza (<i>X</i>)	Limite Sistemático (<i>B</i>)	Limite de Precisão (<i>P</i>)	Incerteza (<i>U</i>)	Relação (<i>U/X</i>)
Volume	[ml]	6,00	-	0,050	0,0500	0,0083
Tempo	[s]	3,00	-	0,004	0,0040	0,0013
Vazão	[ml / s]	2,000	0,01688	0,036	0,0398	0,0199
Pressão de Injeção (<i>P</i> ₀)	[kPa]	100	1,1854	1,560	1,959	0,0196
		200	1,1854	1,560	1,959	0,0098
		300	1,1854	1,560	1,959	0,0065
		400	1,1854	1,560	1,959	0,0049
		500	1,1854	1,560	1,959	0,0039
		600	1,1854	1,560	1,959	0,0033
		700	1,1854	1,560	1,959	0,0028
Temperatura de injeção	[°C]	120	1,0050	0,600	1,17	
Volume específico	[m ³ /kg]	0,001620	0,000003	-	0,000003	0,0019
Diâmetro do bocal	[mm]	0,3085	0,001	-	0,0010	0,0032
Área	[mm ²]	0,074748	0,0004846	-	0,0005	0,0065
<i>C</i> _D	<i>P</i> ₀ = 100 kPa	0,923	0,01217	0,01266	0,01756	0,0190
	<i>P</i> ₀ = 200 kPa	0,930	0,00933	0,01266	0,01573	0,0171
	<i>P</i> ₀ = 300 kPa	0,934	0,00870	0,01266	0,01536	0,0167
	<i>P</i> ₀ = 400 kPa	0,936	0,00847	0,01266	0,01523	0,0165
	<i>P</i> ₀ = 500 kPa	0,938	0,00836	0,01266	0,01517	0,0165
	<i>P</i> ₀ = 600 kPa	0,939	0,00830	0,01266	0,01514	0,0164
	<i>P</i> ₀ = 700 kPa	0,940	0,00826	0,01266	0,01512	0,0164

Neste parâmetro, é necessário tomar a hipótese de que o escoamento é incompressível na expansão do bocal, e que não existe a evaporação internamente a ele. Através da equação clássica de Bernoulli adaptada para determinação da vazão em bocais e, utilizando o coeficiente de descarga, a diferença entre a pressão a montante e a jusante, que é a pressão metaestável do líquido (*P*₁) pode ser escrita como:

$$DP = (P_0 - P_1) = \frac{Q^2}{2 * v_l * C_D^2 * A_b^2} \quad (\text{I.17})$$

Desta equação, existem leituras cujas incertezas correlacionam entre si, como os limites sistemáticos do *C*_D e da área do bocal. Uma forma de avaliar esta

correlação, evitando redundância de erros que comprometeria a incerteza total da determinação da diferença de pressão é utilizar a seguinte fórmula sugerida pela norma da ASME e reformulada para este caso específico.

$$\begin{aligned}
 \Delta DP^2 = & \left(\frac{\partial DP}{\partial Q} \right)^2 \cdot \Delta Q^2 + \left(\frac{\partial DP}{\partial v} \right)^2 \cdot \Delta v^2 + \left(\frac{\partial DP}{\partial A_b} \right)^2 \cdot \Delta A_b^2 + \left(\frac{\partial DP}{\partial C_D} \right)^2 \cdot \Delta C_D^2 + \\
 & + 2\rho_{Q,v} \cdot \left(\frac{\partial DP}{\partial Q} \right) \cdot \left(\frac{\partial DP}{\partial v} \right) \cdot \Delta Q \cdot \Delta v + 2\rho_{Q,A} \cdot \left(\frac{\partial DP}{\partial Q} \right) \cdot \left(\frac{\partial DP}{\partial A_b} \right) \cdot \Delta Q \cdot \Delta A_b + 2\rho_{Q,Cd} \cdot \left(\frac{\partial DP}{\partial Q} \right) \cdot \left(\frac{\partial DP}{\partial C_D} \right) \cdot \Delta Q \cdot \Delta C_D + \\
 & + 2\rho_{A,v} \cdot \left(\frac{\partial DP}{\partial A_b} \right) \cdot \left(\frac{\partial DP}{\partial v} \right) \cdot \Delta A_b \cdot \Delta v + 2\rho_{A,Cd} \cdot \left(\frac{\partial DP}{\partial A_b} \right) \cdot \left(\frac{\partial DP}{\partial C_D} \right) \cdot \Delta A_b \cdot \Delta C_D + \\
 & + 2\rho_{v,Cd} \cdot \left(\frac{\partial DP}{\partial v} \right) \cdot \left(\frac{\partial DP}{\partial C_D} \right) \cdot \Delta v \cdot \Delta C_D \quad (I.18)
 \end{aligned}$$

Desta equação, existe um índice de correlação que se refere ao símbolo ρ . De todas as leituras, como já foi dito, as únicas que tem uma correlação com os erros sistemáticos é a medida da área, A_b , e o valor do C_D . Portanto $\rho_{A,Cd}$ é igual a um e as outras correlações têm valores nulos. Logo a equação se resume a

$$\begin{aligned}
 \Delta DP^2 = & \left(\frac{\partial DP}{\partial Q} \right)^2 \cdot \Delta Q^2 + \left(\frac{\partial DP}{\partial v} \right)^2 \cdot \Delta v^2 + \left(\frac{\partial DP}{\partial A_b} \right)^2 \cdot \Delta A_b^2 + \left(\frac{\partial DP}{\partial C_D} \right)^2 \cdot \Delta C_D^2 + \\
 & + 2\rho_{A,Cd} \cdot \left(\frac{\partial DP}{\partial A_b} \right) \cdot \left(\frac{\partial DP}{\partial C_D} \right) \cdot \Delta A_b \cdot \Delta C_D \quad (I.19)
 \end{aligned}$$

Sabendo que, pela Eq. (I.17),

$$\frac{\partial DP}{\partial Q} = \frac{Q}{v \cdot C_D^2 \cdot A_b^2}, \quad (I.20a)$$

$$\frac{\partial DP}{\partial v} = \frac{-Q^2}{4v^2 \cdot C_D^2 \cdot A_b^2}, \quad (I.20b)$$

$$\frac{\partial DP}{\partial A_b} = \frac{-Q^2}{v \cdot C_D^2 \cdot A_b^3}, \quad (I.20c)$$

$$\frac{\partial DP}{\partial C_D} = \frac{-Q^2}{v \cdot C_D^3 \cdot A_b^2}. \quad (I.20d)$$

E também,

$$\frac{\partial C_D}{\partial A_b} = \frac{\partial}{\partial A_b} \left(\frac{Q}{A_b \cdot \sqrt{2v \cdot DP}} \right) = \frac{-Q}{A_b^2 \cdot \sqrt{2v \cdot DP}} = \frac{-C_D}{A_b} \Rightarrow \frac{\Delta C_D'}{C_D} = \frac{-\Delta A'}{A} \quad (\text{I.20e})$$

Utilizando as expressões acima e substituindo os termos de variação da leitura onde:

$$\Delta Q = B_Q, \quad \Delta v = U_v = B_A, \quad \Delta C_D = B_{Cd}, \quad \Delta A_b = U_{Ab} = B_{Ab}, \quad \Delta A' = B_A \quad \text{e}$$

conseqüentemente, $\frac{\Delta C_D'}{C_D} = \frac{-B_{Ab}}{A_b} = \frac{-U_{Ab}}{A_b}$, pode se reescrever a Eq. I.19 como:

$$\frac{B_{DP}^2}{DP^2} = \frac{1}{4} \left(\frac{B_v}{v} \right)^2 + 4 \cdot \left[\left(\frac{B_Q}{Q} \right)^2 + \left(\frac{B_{Cd}}{C_D} \right)^2 - \left(\frac{B_{Ab}}{A_b} \right)^2 \right]$$

ou,

$$\frac{B_{DP}}{P_0 - P_1} = \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{B_v}{v} \right)^2 + 4 \cdot \left[\left(\frac{B_Q}{Q} \right)^2 + \left(\frac{B_{Cd}}{C_D} \right)^2 - \left(\frac{B_{Ab}}{A_b} \right)^2 \right]} \quad (\text{I.21})$$

Da equação acima, foi obtido o erro sistemático. O erro aleatório da medida da diferença de pressão está associado apenas ao erro aleatório da vazão. Pela Eq. (I.17), é verificado que a vazão está elevada ao quadrado, este limite de precisão da vazão se propagará pelo dobro do valor no limite de precisão das diferenças de pressões logo,

$$\frac{P_{DP}}{P_0 - P} = 2 \cdot \left(\frac{P_Q}{Q} \right) \quad (\text{I.22})$$

Com a associação destes dois limites, pode-se determinar a incerteza total deste parâmetro onde,

$$U_{DP} = \sqrt{B_{DP}^2 + P_{DP}^2} \quad (\text{I.23})$$

Finalmente, a incerteza da pressão do líquido na saída do bocal pode ser obtida através da associação da incerteza da pressão de injeção. Esta associação mostra que a incerteza deste parâmetro é basicamente dependente da diferença entre a pressão de injeção e a pressão metaestável calculada

$$U_{P1} = \sqrt{U_{DP}^2 + U_{P0}^2} \quad (\text{I.24})$$

A tabela a seguir ilustrada os limites e incertezas da diferença das pressões. Como na Tab. I.13, esta tabela mostra os limites de precisão e sistemáticos e as

incertezas associadas respectivas às grandezas das diferenças de pressão de injeção e pressão na saída do bocal ($P_0 - P_1$), assim como, apenas à pressão metaestável do líquido (P_1).

Tabela I.13 – Quadro das incertezas e limites envolvidos na medição da pressão do líquido na saída do bocal.

Leitura	Unidade	Grandeza	Limite Sistemático	Limite de Precisão	Incerteza	Relação
		(X)	(B)	(P)	(U)	(U / X)
$P_0 - P_1$	[kPa]	100	4,594	-	4,594	0,0459
		200	8,539	-	8,539	0,0427
		300	12,621	-	12,621	0,0421
		400	16,739	-	16,739	0,0418
		500	20,871	-	20,871	0,0417
		600	25,012	-	25,012	0,0417
		700	29,157	-	29,157	0,0417
para ($P_0 - P_1$)						
P_1	[kPa]	100	4,995	-	4,995	-
		200	8,761	-	8,761	-
		300	12,772	-	12,772	-
		400	16,853	-	16,853	-
		500	20,963	-	20,963	-
		600	25,089	-	25,089	-
		700	29,223	-	29,223	-

I.8. Precisão dimensional da imagem

Para determinar as dimensões da onda de choque, ou o comprimento da parte líquida do jato, é utilizada a relação de equivalência métrica do tamanho do “pixel”. Geralmente, é da ordem de 6 “pixels” por milímetro, dependendo da regulagem da lente objetiva da câmara. A distância tomada como referência é o diâmetro do corpo do injetor, que é de 50,7 mm e está esquematizado na Fig. I.3 e uma fotografia desta verificação se encontra na Fig. I.4. Para comprovar tal procedimento de análise de medições, colocou-se um tubo de ensaio de vidro, totalmente transparente, com diâmetro externo de 15,85 mm nas posições horizontal e vertical, sendo que, a medida de referência era de 50,70 mm correspondia a 342 “pixels”. O resultado

esperado do diâmetro do tubo de ensaio comparado com o valor real se encontra na Tab. I.14, a seguir.

Tabela I.14 - Comparativo das dimensões encontradas.

	Diâmetro encontrado	Diferença
Posição horizontal	15,93 mm (ou 109 “pixels”)	0.08 mm
Posição vertical	15,92 mm (ou 108 “pixels”)	0,07 mm

Fig. I.3 - Esquema do procedimento da análise dimensional

Fig. I.4 - Imagem do tubo de ensaio.

Apêndice II

Processamento

Matemático das Imagens

II. Processamento Matemático das Imagens

Existe uma primeira imagem que é obtida com a câmara de CCD, no instante imediatamente anterior ao jato. As seguintes, em intervalos de $0,50\text{ s}$, no mínimo, 4 quadros são obtidas durante a injeção. No exemplo a seguir, têm-se duas imagens, em que a primeira, Fig. II.1a, foi realizada antes do jato e a outra, na Fig. II.1b, durante a injeção.

Figura II.1 – a) Fotografia obtida antes do jato (referência) e b) é uma das fotografias adquiridas durante o jato.

Para filtrar a imagem, destacando apenas o jato, a segunda imagem é subtraída da primeira imagem de referência. Para isto, na imagem existe o “pixel” (ponto de menor resolução da imagem). Todas as imagens são obtidas com uma

disposição matricial de 640 x 480 "pixels". O filtro opera com a subtração de cada "pixel" da imagem que contém o jato, pelo "pixel" de mesma coordenada existente na imagem de referência, ou seja, a primeira imagem sem o jato. Depois, a matriz da imagem filtrada é normalizada onde o seu menor valor da matriz terá o valor nulo e o maior possuirá o valor 255 (256 tons de cinza, ou seja, 8 bits) dando um melhor contraste da imagem. Este cálculo foi programado no "MATLAB" e foi desenvolvido por Guimarães (1999). O filtro subtrativo constitui a divisão entre os valores dos "pixels" porque a magnitude deles está em escala logarítmica e a câmara CCD tem sensibilidade linear. Na Fig. II.2 tem-se a imagem filtrada do jato.

Como observação, estas fotografias, assim como outras fotografias de jatos deste trabalho, possuem um aglomerado de pequenas manchas ou "respingos" (Fig. II.1). Neste caso, elas apareceram por causa de um defeito que ocorreu no sensor CCD da câmara e com o processamento matemático foi possível subtraí-las da imagem.

Figura II.2 - Imagem filtrada (mapa de cores "gray").

Em decorrência de vibrações das mesas ópticas e do injetor, outros ruídos de amplitude moderada nas regiões que circundam o injetor e a janela, são identificados na subtração das imagens (Fig. II.2). Para minimizar este problema, e destacar ainda mais o jato, é mudada a paleta de cores da imagem, pois é uma opção do tipo "toolbox" do Matlab. Por exemplo, os mapas de cores do tipo, "gray", "hot", "pink", "bone", e "copper", são mapas que delineiam certas linhas do sistema RGB (iniciais de "red", "green" e "blue", significando respectivamente vermelho, verde e azul) de

cores onde, o "gray" trabalha com tons de cinza, o "hot" com tons de amarelo e vermelho, o "pink" com tons cor de rosa e marrom claro, "bone" com tons de azul, e "copper" com tons de cobre, e todos estes mapas, tendem ao tom preto para os "pixels" próximos do valor zero. Os outros mapas de cores, "jet", "cool" e "hsv", trabalham no sistema de cores que se baseiam nos valores de matiz, luminosidade e saturação.

Tabela II.1 - Exemplo ilustrativo de equivalência em mapas de cores.

Cor	preto (0 até 4)	tons de cinza (5 até 250)			branco (251 até 255)
Intervalo					
Cor	preto (0 até 4)	tons de marrom (5 até 85)	tons de vermelho (86 até 170)	tons de amarelo (171 até 250)	branco (251 até 255)
Intervalo					

É ilustrado na Tab. II.1, em forma de exemplo, um esquema de como funciona a transformação entre os mapa de cores em uma imagem 8 bits. Este caso é um caso imaginário que muito se assemelha ao mapa de cores "hot".

Na Fig. II.3, é mostrada uma fotografia no mapa de cores "hsv", que melhor destacou o perfil do jato e a formação da onda de choque. Praticamente, todos estes mapas de cores exercem a mesma função, mas, no entanto, apenas alguns mapas de cores oferecem melhor nitidez. Neste exemplo, com o mapa "hsv", a imagem destacou melhor o jato. Com o "gray" não existia clareza.

Outros mapas de cores que destacam o gradiente de tonalidade de uma cor na imagem, é o "prism", o "flag", o "arcir" e o "rand". Estes mapas são importantes porque trabalham na imagem com um tom de cor e dividem-na em várias cores como um prisma, mas repetindo estas mesmas cores em outros tons. Na Tab. II.2 são ilustrados estes mapas de cores.

Figura II.3 – Imagem do jato no mapa de cores "hsv".

Tabela II.2 – Apresentação de um outro exemplo ilustrativo de equivalência em mapas de cores.

Preto 0 até 4	Tons de cinza 5 até 250									Branco 251 até 255
Preto 0 até 4	Tons de marrom 7 até 75			Tons de vermelho 76 até 175			Tons de amarelo 176 até 250			Branco 251 até 255
Preto 0 até 4	R	G	B	R	G	B	R	G	B	Branco 251 até 255
	4-25	26-50	51-75	76-109	110-140	141-175	176-200	201-225	226-250	

* Onde, "R" significa tons de vermelho, "G", tons de verde e "B", tons de azul.

Exemplificando isto, a Fig. II.4 mostra uma imagem com o mapa de cores "prism" que, se comparado à imagem anterior (Fig. II.3), e enfocando para a região do escoamento dos gases após a onda de choque, é possível observar que o mapa "prism" oferece uma boa noção do gradiente de densidade e escoamento nesta região. Muitas vezes, quando existe grande variação do gradiente de tonalidades em determinadas regiões da imagem, mapas de cores como o "prism", "flag", "arcir" e "rand" não oferecem nitidez na imagem. É o caso da região compreendida pelas ondas de choque.

É importante salientar que a mudança do mapa de cores, ou paleta de cores, não modifica a matriz numérica da imagem.

Figura II.4 – Imagem do jato no mapa de cores "prism". Com este mapa foi possível observar o gradiente de densidade que ocorre após passar pela onda de choque.

A seguir, na Tab. II.3, estão representados todos os mapas de cores que são utilizados neste trabalho.

Tabela II.3 - Tonalidade dos mapas de cores do Matlab.

Nome	Paleta de cores
"gray"	0 - - 255
"bone"
"copper"
"pink"
"hot"
"hsv"
"cool"
"jet"
"prism"
"flag"
"arcir"
"rand"

Muitas das imagens filtradas não estão apresentadas de maneira proporcional quando são expostas neste trabalho. Neste caso, é aplicado outro recurso na filtragem

das imagens que faz o enquadramento do jato apenas, desprezando o cenário restante da fotografia. Com isto, não existe a interferência de muitos ruídos que estão na adjacência do escoamento do jato, tornando mais nítido o fenômeno estudado. Um exemplo pode ser visto na Fig. II.5.

Figura II.5 – A primeira imagem ilustra um realce de um ruído decorrente da filtragem. Para retirá-lo, é feito um novo enquadramento da imagem subtraindo do cenário o local desta ocorrência. Isto também proporciona uma melhor nitidez dos fenômenos envolvidos no escoamento.

Apêndice III

Solução Proposta para a Onda de Evaporação

III. SOLUÇÃO PROPOSTA PARA A ONDA DE EVAPORAÇÃO

Marcelo Mendes Vieira

abril/2005

(desenvolvido no “software” Maple 7)

Condição de Chapman-Jouguet dentro da Zona de Saturação

Este apêndice é parte suplementar da Seção 2.3 e o objetivo é mostrar o roteiro do cálculo desenvolvido para a solução proposta da onda de evaporação. O modelo aqui discutido admite que o fluido, com pressão e temperatura iniciais ($P0$ e $T0$), sofre uma queda da pressão ($P1$) de forma isotérmica, abaixo de sua pressão de saturação, assumindo a condição de metaestabilidade. Após alcançar, $P1$, o líquido metaestável expande em uma mistura líquido-vapor (índice 2) através de uma onda de evaporação. Portanto, para a solução do problema, são conhecidos os parâmetros: $P0$, $T0$ e $P1$, falta determinar as propriedades termodinâmicas do estado “2”, admitindo que o fluido evapora sob a condição de Chapman-Jouguet e, à jusante da onda, o fluido está na zona de saturação.

Como observação, as linhas que iniciam com o sinal “>” indicam os comandos utilizados no “Maple”. Em seguida, centralizado à página, as equações, ou resultados numéricos ou gráficos, são os resultados obtidos por estes comandos.

Equação de Rankine-Hugoniot (R_H):

> $R_H := h2 - h1 = 1/2 * (P2 - P1) * (v2 + v1)$;

$$R_H := h2 - h1 = \frac{1}{2} (P2 - P1) (v2 + v1)$$

> $R_H := h2 - h1 = 1/2 * (P2 - P1) * (v2 + v1)$;

$$R_H := h2 - h1 = \frac{1}{2} (P2 - P1) (v2 + v1)$$

Determinação da entalpia da mistura líquido-vapor, $h2$:

$h2 => h2L + x2 * (hV2 - hL2) = h2L + (v2 - v2L) * (hV2 - hL2) / (vV2 - vL2)$:

> $h2 := h2L + (v2 - v2L) * [\Delta h_{LV} / \Delta v_{LV}]$;

$$h2 := h2L + (v2 - v2L) \left[\frac{\Delta h_{LV}}{\Delta v_{LV}} \right]$$

Utilizando a Eq. de Clapeyron (" $dP/dT = (hV - hL) / T(vV - vL)$ ") e a Eq. de Antoine simplificada (com A e B constantes), a expressão " $[(hV2 - hL2) / (vV2 - vL2)]$ " pode ser escrita como:

> $dP/dT = \Delta h_{LV} / \Delta v_{LV} / T$; $\ln(P) = A - B/T$;

$dP/dT = B \cdot P / T^2$; $[(\Delta h_{LV} / \Delta v_{LV})] = B \cdot P2 / T2$;

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta h_{LV}}{\Delta v_{LV} T}$$

$$\ln(P) = A - \frac{B}{T} \quad \Rightarrow \quad \frac{dP}{dT} = \frac{B \cdot P}{T^2}$$

$$\Rightarrow \left[\frac{\Delta_{h_{LV}}}{\Delta_{v_{LV}}} \right] = \frac{B P_2}{T_2}$$

$$> \text{R_H}; \quad h_{2L} + (v_2 - v_{2L}) \left[\frac{\Delta_{h_{LV}}}{\Delta_{v_{LV}}} \right] - h_1 = \frac{1}{2} (P_2 - P_1) (v_2 + v_1)$$

Substituindo:

$$> \text{R_H} := h_{2L} + (v_2 - v_{2L}) * [B * P_2 / T_2] - h_1 = 1/2 * (P_2 - P_1) * (v_2 + v_1);$$

$$R_H := h_{2L} + (v_2 - v_{2L}) \left[\frac{B P_2}{T_2} \right] - h_1 = \frac{1}{2} (P_2 - P_1) (v_2 + v_1)$$

Admitindo que a diferença entre as entalpias do líquido pode ser escrita como:
 $(h_{2L} - h_1) = C_p * (T_0 - T_2)$, onde C_p é o calor específico para o líquido saturado, tem-se:

$$> h_1 := C_p * T_0; \quad h_{2L} := C_p * T_2;$$

Sabendo também que $\ln P = A - B/T$:

$$> T_0 := B / (A - \ln(P_v)); \quad T_2 := B / (A - \ln(P_2));$$

E considerando que os dois volumes específicos do líquido são iguais, $v_{2L} = v_1$;

$$> v_{2L} := v_1;$$

$$v_{2L} := v_1$$

Substituindo os termos acima na expressão R_H , têm-se:

$$> \text{R_H};$$

$$\frac{C_p B}{A - \ln(P_2)} + (v_2 - v_1) [P_2 (A - \ln(P_2))] - \frac{C_p B}{A - \ln(P_v)} = \frac{1}{2} (P_2 - P_1) (v_2 + v_1)$$

Isolando v_2 :

$$> C_p * B / (A - \ln(P_2)) + (v_2 - v_1) * P_2 * (A - \ln(P_2)) - C_p * B / (A - \ln(P_v)) - 1/2 * (P_2 - P_1) * (v_2 + v_1) = 0;$$

$$\frac{C_p B}{A - \ln(P_2)} + (v_2 - v_1) P_2 (A - \ln(P_2)) - \frac{C_p B}{A - \ln(P_v)} - \frac{1}{2} (P_2 - P_1) (v_2 + v_1) = 0$$

$$> \text{collect}(\%, [v_2, v_1], \text{distributed});$$

$$\left(P_2 (A - \ln(P_2)) - \frac{1}{2} P_2 + \frac{1}{2} P_1 \right) v_2 + \frac{C_p B}{A - \ln(P_2)} - \frac{C_p B}{A - \ln(P_v)} + \left(-P_2 (A - \ln(P_2)) - \frac{1}{2} P_2 + \frac{1}{2} P_1 \right) v_1 = 0$$

$$> v_2 = [C_p * B * (1 / (A - \ln(P_v)) - 1 / (A - \ln(P_2))) + (P_2 * (A - \ln(P_2)) + 1/2 * P_2 - 1/2 * P_1) * v_1] / [P_2 * (A - \ln(P_2)) - 1/2 * P_2 + 1/2 * P_1];$$

$$v_2 = \frac{\left[C_p B \left(\frac{1}{A - \ln(P_v)} - \frac{1}{A - \ln(P_2)} \right) + \left(P_2 (A - \ln(P_2)) + \frac{1}{2} P_2 - \frac{1}{2} P_1 \right) v_1 \right]}{\left[P_2 (A - \ln(P_2)) - \frac{1}{2} P_2 + \frac{1}{2} P_1 \right]}$$

$$> v_2 = [C_p * B * ((\ln(P_v) - \ln(P_2)) / (A - \ln(P_v))) / (A - \ln(P_2)) + (P_2 * (A - \ln(P_2)) + 1/2 * P_2 - 1/2 * P_1) * v_1] / [P_2 * (A -$$

$$v_2 = \frac{\ln(P_2) - 1/2 \cdot P_2 + 1/2 \cdot P_1}{\left[\frac{C_p B (\ln(P_v) - \ln(P_2))}{(A - \ln(P_v))(A - \ln(P_2))} + \left(P_2 (A - \ln(P_2)) + \frac{1}{2} P_2 - \frac{1}{2} P_1 \right) v_1 \right]} \left[P_2 (A - \ln(P_2)) - \frac{1}{2} P_2 + \frac{1}{2} P_1 \right]$$

Nesta equação, o volume à jusante é apenas dependente da pressão, P_2 . As outras variáveis são conhecidas.

EQUAÇÃO (I'), determinada pela equação de Rankine-Hugoniot:

$$v_2(P_2) := \frac{C_p B (\ln(P_v) - \ln(P_2))}{(A - \ln(P_v))(A - \ln(P_2)) P_2 \left(A - \ln(P_2) - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{P_1}{P_2} \right) + \left(A - \ln(P_2) + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \frac{P_1}{P_2} \right) v_1} \left(A - \ln(P_2) - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{P_1}{P_2} \right) v_1$$

Estudo do termo que é multiplicado pelo volume inicial, v_1

Objetivo deste estudo: considerar que este termo pode ser igualado a 1.

Pelas soluções numéricas é sabido que: $1/2 < (P_2/P_1) < 1$. Isto pode simplificar a equação acima nos termos:

Como P_2/P_1 está contido no intervalo 0,5..1,0, pode-se calcular o comportamento deste termo que multiplica v_1 adotando valores de P_2/P_1 iguais a 1/2, 3/4 e 1, como segue:

$$\begin{aligned} &> P_1 := P_2; \quad (A - \ln(P_2) + 1/2 - 1/2 \cdot P_1/P_2) / (A - \ln(P_2) - 1/2 + 1/2 \cdot P_1/P_2); \\ &P_1 := 4/3 \cdot P_2; \quad (A - \ln(P_2) + 1/2 - 1/2 \cdot P_1/P_2) / (A - \ln(P_2) - 1/2 + 1/2 \cdot P_1/P_2); \\ &P_1 := 2/1 \cdot P_2; \quad (A - \ln(P_2) + 1/2 - 1/2 \cdot P_1/P_2) / (A - \ln(P_2) - 1/2 + 1/2 \cdot P_1/P_2); \\ &\text{unassign('P1', 'P2')}; \end{aligned}$$

$$P_1 := P_2 \Rightarrow 1$$

$$P_1 := \frac{4}{3} P_2 \Rightarrow \frac{A - \ln(P_2) - \frac{1}{6}}{A - \ln(P_2) + \frac{1}{6}}$$

$$P1 := 2 P2 \Rightarrow \frac{A - \ln(P2) - \frac{1}{2}}{A - \ln(P2) + \frac{1}{2}}$$

Quando $P1$ é igual a $P2$, o numerador e o denominador do segundo termo da soma são exatamente iguais. Quando a razão $P2/P1$ é igual a $3/4$, a diferença é de $2/6$. Para um grau de metaestabilidade elevado, $P2/P1$ é igual a $0,5$, e a diferença entre os dois termos é igual a 1 . Para a iso-octano, a constante "A" (para pressão em Pa e temperatura em K) tem um valor igual a 22 . O erro introduzido por esta simplificação com relação a constante "A-Ln(P2)" é praticamente desprezível, caso $P1$ fosse próximo do ponto crítico. Conferindo, a expressão "A-Ln(Pc) = (21-Ln(2583000))" é igual a $7,23$, ainda assim, este termo tem uma magnitude 20 vezes maior que o erro introduzido para $P2/P1=3/4$. Quando esta razão assume esta magnitude, $P2/P1=3/4$, $v2$ é muito maior que $v1$, e isto torna o segundo termo menos expressivo na somatória da expressão. A seguir tem um exemplo de uma onda com pressão de saturação próxima do ponto crítico (90% Pc):

```
> Pv:=0.9*2583000: P1:=0.8*Pv: P2:=0.75*P1:
> Cp:=2400: A:=22: B:=4000:
> Cp*B*(ln(Pv)-ln(P2))/(A-ln(Pv))/(A-ln(P2))/P2/(A-
ln(P2)-1/2+1/2*P1/P2)+(A-ln(P2)+1/2-1/2*P1/P2)*v1/(A-
ln(P2)-1/2+1/2*P1/P2);
.007607190395 + .9584288989 v1

> " vol. especific. do liquido"; v1:=0.002; Cp*B*(ln(Pv)-
ln(P2))/(A-ln(Pv))/(A-ln(P2))/P2/(A-ln(P2)-
1/2+1/2*P1/P2)+(A-ln(P2)+1/2-1/2*P1/P2)*v1/(A-ln(P2)-
1/2+1/2*P1/P2);
v1 := .002
.009524048193
```

Para o volume específico inicial de $0,002 \text{ m}^3/\text{kg}$ (condição próxima do ponto crítico), o erro entre o valor verdadeiro e o valor do volume obtido através da aproximação do segundo termo igualado a 1 é de $-0,87\%$ (resultado abaixo):

```
> (% - (Cp*B*(ln(Pv)-ln(P2))/(A-ln(Pv))/(A-ln(P2))/P2/(A-
ln(P2)-1/2+1/2*P1/P2)+v1))/%;
-.008729712441

> unassign('Pv','P1','P2','Cp','A','B','v1');
```

O gráfico a seguir mostra o comportamento do termo que multiplica o volume inicial, $v1$, em função do **grau de metaestabilidade**, G . Nele é possível observar que este fator ficou compreendido entre $0,91$ e $1,00$, para este caso da temperatura inicial próxima do ponto crítico. Se diminuir esta temperatura, o menor valor do intervalo tende a elevar.

Para determinação do gráfico acima, foi utilizada a seguinte **equação que se aproxima ao comportamento da relação $P2/P1$** em função do grau de metaestabilidade, G :

> $P2/P1 := (1+2*G) / (1+5*G)$; f_{vL} ; $f_{vL} := f_{vL}$:

$$\frac{P2}{P1} := \frac{1+2G}{1+5G}$$

Simplificando a Equação I', admitindo que o termo que multiplica $v1$ é igual a 1, tem-se a seguinte expressão:

EQUAÇÃO (I):

> $v2(P2) := C_p * B * (\ln(Pv) - \ln(P2)) / (A - \ln(Pv)) / (A - \ln(P2)) / P2 / (A - \ln(P2) - 1/2 + 1/2 * P1/P2) + v1$;

$$v2(P2) := \frac{C_p B (\ln(Pv) - \ln(P2))}{(A - \ln(Pv)) (A - \ln(P2)) P2 \left(A - \ln(P2) - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{P1}{P2} \right)} + v1$$

Introduzindo a Condição de Chapman-Jouguet

Pela condição de Chapman-Jouguet, $d(J*J)=0$, condição de máxima vazão com velocidade sônica, sabendo que, a Eq. de Rayleigh é:

> $J(P2, v2) := \sqrt{-(P2 - P1) / (v2 - v1)}$;

$$J(P2, v2) := \sqrt{-\frac{P2 - P1}{v2 - v1}}$$

> $d(J^2) := 2*dJ=0$;

$$d(J^2) := 2 dJ = 0$$

> $dJ = d(J, P2) * DP2 + d(J, v2) * Dv2$;

$$dJ = d(J, P2) DP2 + d(J, v2) Dv2$$

> $dJ := \text{diff}(\sqrt{-(P2 - P1) / (v2 - v1)}, P2) * DP2 + \text{diff}(\sqrt{-(P2 - P1) / (v2 - v1)}, v2) * Dv2 = 0$;

$$dJ := -\frac{1}{2} \frac{DP2}{\sqrt{-\frac{P2-P1}{v2-v1}} (v2-v1)} + \frac{\frac{1}{2} (P2-P1) Dv2}{\sqrt{-\frac{P2-P1}{v2-v1}} (v2-v1)^2} = 0$$

Simplificando a equação acima, tem-se:

EQUAÇÃO (II):

> **Dv2/DP2 = (v2-v1) / (P1-P2) ;**

$$\frac{Dv2}{DP2} = \frac{v2-v1}{P1-P2}$$

Com as EQUAÇÕES I e II é possível determinar $P2$. Para isto a derivada de $Dv2/DP2$ é:

> **Dv2:=diff(v2(P2),P2) ;**

$$\begin{aligned} Dv2 := & - \frac{Cp B}{P2^2 (A - \ln(Pv)) (A - \ln(P2)) \left(A - \ln(P2) - \frac{1}{2} + \frac{\frac{1}{2} P1}{P2} \right)} \\ & + \frac{Cp B (\ln(Pv) - \ln(P2))}{(A - \ln(Pv)) (A - \ln(P2))^2 P2^2 \left(A - \ln(P2) - \frac{1}{2} + \frac{\frac{1}{2} P1}{P2} \right)} \\ & - \frac{Cp B (\ln(Pv) - \ln(P2))}{(A - \ln(Pv)) (A - \ln(P2)) P2^2 \left(A - \ln(P2) - \frac{1}{2} + \frac{\frac{1}{2} P1}{P2} \right)} \\ & - \frac{Cp B (\ln(Pv) - \ln(P2)) \left(-\frac{1}{P2} - \frac{1}{2} \frac{P1}{P2^2} \right)}{(A - \ln(Pv)) (A - \ln(P2)) P2 \left(A - \ln(P2) - \frac{1}{2} + \frac{\frac{1}{2} P1}{P2} \right)^2} \end{aligned}$$

Substituindo a derivada de v_2 na **Eq. II** e, combinando a **Eq. I** em **II**, obtem-se:

$$> \mathbf{Dv_2 = (v_2 (P_2) - v_1) / (P_2 - P_1) ;}$$

$$\begin{aligned}
 & - \frac{C_p B}{P_2^2 (A - \ln(P_v)) (A - \ln(P_2)) \left(A - \ln(P_2) - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{P_1}{P_2} \right)} \\
 & + \frac{C_p B (\ln(P_v) - \ln(P_2))}{(A - \ln(P_v)) (A - \ln(P_2))^2 P_2^2 \left(A - \ln(P_2) - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{P_1}{P_2} \right)} \\
 & - \frac{C_p B (\ln(P_v) - \ln(P_2))}{(A - \ln(P_v)) (A - \ln(P_2)) P_2^2 \left(A - \ln(P_2) - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{P_1}{P_2} \right)} \\
 & - \frac{C_p B (\ln(P_v) - \ln(P_2)) \left(-\frac{1}{P_2} - \frac{1}{2} \frac{P_1}{P_2^2} \right)}{(A - \ln(P_v)) (A - \ln(P_2)) P_2 \left(A - \ln(P_2) - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{P_1}{P_2} \right)^2} = \\
 & \frac{(A - \ln(P_v)) (A - \ln(P_2)) P_2 \left(A - \ln(P_2) - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{P_1}{P_2} \right)}{(A - \ln(P_v)) (A - \ln(P_2)) P_2 \left(A - \ln(P_2) - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{P_1}{P_2} \right) (P_2 - P_1)}
 \end{aligned}$$

➤ Combinando os termos da equação acima, tem-se:

$$\begin{aligned}
 & (-1/P_2 + ((\ln(P_v) - \ln(P_2)) / (A - \ln(P_2))) / P_2) - (\ln(P_v) - \ln(P_2)) / P_2 - (\ln(P_v) - \ln(P_2)) / (A - \ln(P_2)) - \\
 & 1/2 + 1/2 * P_1 / P_2 * (-1/P_2 - 1/2 * P_1 / P_2^2) = (\ln(P_v) - \ln(P_2)) / (P_2 - P_1) ;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - \frac{1}{P_2} + \frac{\ln(P_v) - \ln(P_2)}{(A - \ln(P_2)) P_2} - \frac{\ln(P_v) - \ln(P_2)}{P_2} - \frac{(\ln(P_v) - \ln(P_2)) \left(-\frac{1}{P_2} - \frac{1}{2} \frac{P_1}{P_2^2} \right)}{A - \ln(P_2) - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{P_1}{P_2}} = \\
 & \frac{\ln(P_v) - \ln(P_2)}{P_2 - P_1}
 \end{aligned}$$

$$> \mathbf{eq1 := -1 / (\ln(P_v) - \ln(P_2)) + 1 / (A - \ln(P_2)) - 1 - 1 / (A - \ln(P_2) - 1/2 + 1/2 * P_1 / P_2) * (-1 - 1/2 * P_1 / P_2) = P_2 / (P_2 - P_1) ;}$$

$$\begin{aligned}
 eq1 := & - \frac{1}{\ln(P_v) - \ln(P_2)} + \frac{1}{A - \ln(P_2)} - 1 - \frac{-1 - \frac{1}{2} \frac{P_1}{P_2}}{A - \ln(P_2) - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{P_1}{P_2}} = \frac{P_2}{P_2 - P_1}
 \end{aligned}$$

Aqui é substituído $P2/P1=Pr$;

$$> \text{eq1} := -1 / (\ln(Pv) - \ln(P2)) + 1 / (A - \ln(P2)) - 1 - 1 / (A - \ln(P2) - 1/2 + 1/2/Pr) * (-1 - 1/2/Pr) = -Pr / (1 - Pr);$$

$$\text{eq1} := -\frac{1}{\ln(Pv) - \ln(P2)} + \frac{1}{A - \ln(P2)} - 1 - \frac{-1 - \frac{1}{2} \frac{1}{Pr}}{A - \ln(P2) - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{1}{Pr}} = -\frac{Pr}{1 - Pr}$$

$$> \text{eq1} := (1 - Pr) / (\ln(Pv) - \ln(P2)) - (1 - Pr) / (A - \ln(P2)) + (1 - Pr) + (1 - Pr) / (A - \ln(P2) - 1/2 + 1/2/Pr) * (-1 - 1/2 * 1/Pr) - Pr = 0;$$

$$\text{eq1} := \frac{1 - Pr}{\ln(Pv) - \ln(P2)} - \frac{1 - Pr}{A - \ln(P2)} + 1 - 2 Pr + \frac{(1 - Pr) \left(-1 - \frac{1}{2} \frac{1}{Pr} \right)}{A - \ln(P2) - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{1}{Pr}} = 0$$

A pressão à montante da onda, $P1$, pode ser escrita como: $P1=(1-G)*Pv$, onde **G é o grau de metaestabilidade**. Como $P2=Pr*P1$, logo:

$$> \ln(P2) := \ln(1 - G) + \ln(Pv) + \ln(Pr);$$

$$\ln(P2) := \ln(1 - G) + \ln(Pv) + \ln(Pr)$$

> eq1;

$$\frac{1 - Pr}{-\ln(1 - G) - \ln(Pr)} - \frac{1 - Pr}{A - \ln(1 - G) - \ln(Pv) - \ln(Pr)} + 1 - 2 Pr + \frac{(1 - Pr) \left(-1 - \frac{1}{2} \frac{1}{Pr} \right)}{A - \ln(1 - G) - \ln(Pv) - \ln(Pr) - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{1}{Pr}} = 0$$

Eis a equação que mostra que a razão das pressões da onda é função do grau de metaestabilidade e da pressão de vapor:

EQUAÇÃO IIIa:

> eq1:=eq1;

$$\text{eq1} := \frac{1 - Pr}{-\ln(1 - G) - \ln(Pr)} - \frac{1 - Pr}{A - \ln(1 - G) - \ln(Pv) - \ln(Pr)} + 1 - 2 Pr + \frac{(1 - Pr) \left(-1 - \frac{1}{2} \frac{1}{Pr} \right)}{A - \ln(1 - G) - \ln(Pv) - \ln(Pr) - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{1}{Pr}} = 0$$

- Cabe lembrar que pode ser substituída a expressão " $A - \ln(Pv)$ " por " $B/T0$ ", pois: $T0 := B / (A - \ln(Pv))$.

Exemplo 1: Iso-octano à 131°C ($Pv=220$ kPa) e pressão inicial igual a pressão de

saturação (P_v). Para isto é necessário obter as constantes A e B.
Pelo livro do Vargaftik, iso-octano a 20 °C as propriedades são:

$$T = 20\text{ °C}$$

$$T = 293,15\text{ K}$$

$$P_v = 5,15\text{ kPa}$$

$$v_L = 0,001444\text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_V = 4,4444\text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h_{LV} = 309,4\text{ kJ/kg}$$

Sabendo que $B = (h_{LV}/v_{LV}) \cdot (T/P_v)$ e $A = \ln(P_v) + B/T$:

$$B = 3963,7;$$

$$A = 22,07.$$

```
> ln(Pv) := evalf(ln(220000)); A := 22.07;
```

$$\ln(P_v) := 12.30138283$$

$$A := 22.07$$

```
> eq2 := eq1;
```

$$eq2 := \frac{1 - Pr}{-\ln(1 - G) - \ln(Pr)} - \frac{1 - Pr}{9.76861717 - \ln(1 - G) - \ln(Pr)} + 1 - 2 Pr$$

$$+ \frac{(1 - Pr) \left(-1 - \frac{1}{2} \frac{1}{Pr} \right)}{9.268617170 - \ln(1 - G) - \ln(Pr) + \frac{1}{2} \frac{1}{Pr}} = 0$$

```
> with(plots):
```

```
implicitplot(eq2, G=0.0001..0.9999, Pr=0.48..0.9999,
title="iso-octano \n T0=131°C(Psat=220kPa) e P0=Psat",
labels=["Grau de metaestabilidade, G", "P2 /P1"],
grid=[200,100], axes=boxed, resolution=200, view=[0..1,
0.48..1]);
```

Warning, the name changecoords has been redefined

```
> G:=0.000001; fsolve(eq2,Pr,0..1); unassign('G', 'Pr');
G:=1/2; fsolve(eq2,Pr,0..1); unassign('G', 'Pr');
G:=.9999999; fsolve(eq2,Pr,0..1); unassign('G', 'Pr');
```

$$G := .1 \cdot 10^{-5} \Rightarrow Pr = .9991043152$$

$$G := \frac{1}{2} \Rightarrow Pr = .6146788395$$

$$G := .9999999 \Rightarrow Pr = .4864074550$$

➤ `restart;`

Expressão para pressão inicial maior que a pressão de saturação

Caso a pressão de injeção assume um valor acima da pressão de saturação, deve-se resolver a onda de evaporação acrescentando ao valor da entalpia inicial do líquido a expressão " $v_1 \cdot (P_0 - P_{sat})$ ", ou seja, " $h_1 \sim C_p \cdot T_0 + v_1 \cdot (P_0 - P_{sat})$ ", portanto, a equação final pode ser escrita como:

```
> eq3 := (1-Pr) / (Phi - ln(1-G) - ln(Pr)) - (1-Pr) / (A - ln(1-G) -
ln(Pv) - ln(Pr)) + 1 - 2*Pr + (1-Pr) / (A - ln(1-G) - ln(Pv) - ln(Pr) -
1/2 + 1/2/Pr) * (-1 - 1/2*1/Pr) = 0;
```

$$eq3 := \frac{1-Pr}{\Phi - \ln(1-G) - \ln(Pr)} - \frac{1-Pr}{A - \ln(1-G) - \ln(Pv) - \ln(Pr)} + 1 - 2Pr + \frac{(1-Pr) \left(-1 - \frac{1}{2} \frac{1}{Pr} \right)}{A - \ln(1-G) - \ln(Pv) - \ln(Pr) - \frac{1}{2} + \frac{1}{2Pr}} = 0$$

Como $T_0 := B / (A - \ln(Pv))$, a equação acima pode ser escrita da seguinte forma:

```
> (1-Pr) / (Phi - ln(1-G) - ln(Pr)) - (1-Pr) / (B/T0 - ln(1-G) -
ln(Pr)) + 1 - 2*Pr + (1-Pr) / (B/T0 - ln(1-G) - ln(Pr) - 1/2 + 1/2/Pr) * (-
1 - 1/2*1/Pr) = 0;
```

EQUAÇÃO III:

$$\frac{1-Pr}{\Phi - \ln(1-G) - \ln(Pr)} - \frac{1-Pr}{\frac{B}{T_0} - \ln(1-G) - \ln(Pr)} + 1 - 2Pr + \frac{(1-Pr) \left(-1 - \frac{1}{2} \frac{1}{Pr} \right)}{\frac{B}{T_0} - \ln(1-G) - \ln(Pr) - \frac{1}{2} + \frac{1}{2Pr}} = 0$$

onde,

```
> Phi := v1 * (P0 - Pv) * (A - ln(Pv)) * (A - ln(Pv) - ln(1-G) -
```

$\ln(Pr)) / Cp / B;$

$$\Phi := \frac{vI (P0 - Pv) (A - \ln(Pv)) (A - \ln(1 - G) - \ln(Pv) - \ln(Pr))}{Cp B}$$

Exemplo 2: Iso-octano com temperatura inicial de 56 °C ($P_v = 25$ kPa) e pressão de 750 kPa:

```
> Pv:=25000; ln(Pv):=evalf(ln(Pv)); A:=22.07; B:=3963.7;
Cp:=2400; P0:= 750000; v1:=0.0015;
> eq3;
```

$$\frac{1 - Pr}{.01630688245 - 1.001365350 \ln(1 - G) - 1.001365350 \ln(Pr)}$$

$$- \frac{1 - Pr}{11.94336890 - \ln(1 - G) - \ln(Pr)} + 1 - 2 Pr$$

$$+ \frac{(1 - Pr) \left(-1 - \frac{1}{2} \frac{1}{Pr} \right)}{11.44336890 - \ln(1 - G) - \ln(Pr) + \frac{1}{2Pr}} = 0$$

```
Phi; .01630688245 - .001365350312 ln(1 - G) - .001365350312 ln(Pr)
```

```
> with(plots):
implicitplot(eq3 , G=0.0001..0.9999, Pr=0.48..0.9999,
title="iso-octano \n T0=56°C(Psat=25 kPa) e P0=750 kPa",
labels=["Grau de metaestabilidade, G" , `P2 /P1`],
grid=[100,100], axes=boxed, resolution=200,view=[0..1,
0.4..1]);
```

Warning, the name changecoords has been redefined

```

> G := 0 ; fsolve(eq3,Pr,0..1); unassign('G', 'Pr'); Pr = .8999163913
G := 1/2 ; fsolve(eq3,Pr,0..1); unassign('G', 'Pr'); Pr = .6197466868
G := .9999999 ; fsolve(eq3,Pr,0..1); unassign('G', 'Pr'); Pr =
.4886120289
➤ restart;

```

Comparação entre a solução numérica e pela solução da Equação III:

A máxima diferença entre os dois métodos (numérico e analítico) foi de 2%.

Simplificação da Equação III:

A equação III ainda pode ser simplificada:

```

> eq1 := (1-Pr) / (-ln(1-G) - ln(Pr)) - (1-Pr) / (A - ln(1-G) -
ln(Pv) - ln(Pr)) + 1 - 2*Pr + (1-Pr) / (A - ln(1-G) - ln(Pv) - ln(Pr)) -
1/2 + 1/2/Pr) * (-1 - 1/2*1/Pr) = 0;

```

$$\begin{aligned}
 eq1 := & \frac{1-Pr}{-\ln(1-G) - \ln(Pr)} - \frac{1-Pr}{A - \ln(1-G) - \ln(Pv) - \ln(Pr)} + 1 - 2Pr \\
 & + \frac{(1-Pr) \left(-1 - \frac{1}{2} \frac{1}{Pr} \right)}{A - \ln(1-G) - \ln(Pv) - \ln(Pr) - \frac{1}{2} + \frac{1}{2Pr}} = 0
 \end{aligned}$$

A Eq. III (acima) possui dois termos cujos denominadores têm valores aproximados e estão indicados pelas setas. Por isto, estes denominadores serão

substituídos por um denominador médio, como segue:

$$> 1/2 * \{A - \ln(1-G) - \ln(P_v) - \ln(P_r)\} + 1/2 * \{A - \ln(1-G) - \ln(P_v) - \ln(P_r) - 1/2 + 1/2/P_r\} = A - \ln(P_v) - \ln(1-G) - \ln(P_r) - 1/4 + 1/4/P_r;$$

$$\frac{1}{2} \{A - \ln(1-G) - \ln(P_v) - \ln(P_r)\} + \frac{1}{2} \left\{ A - \ln(1-G) - \ln(P_v) - \ln(P_r) - \frac{1}{2} + \frac{1}{2/P_r} \right\}$$

Denominador para os dois termos:

$$\Rightarrow = A - \ln(P_v) - \ln(1-G) - \ln(P_r) - \frac{1}{4} + \frac{1}{4/P_r}$$

Desta forma, a Equação III pode ser reescrita como:

$$> \text{eq4} := (1 - P_r) / (\Phi - \ln(1-G) - \ln(P_r)) + ((1 - P_r) * (-1 - 1/2 * 1/P_r)) / (A - \ln(P_v) - \ln(1-G) - \ln(P_r) - 1/4 + 1/4/P_r) + 1 - 2 * P_r = 0;$$

EQUAÇÃO IV:

$$\text{eq4} := \frac{1 - 2 \frac{P_2}{P_1} + \frac{1 - \frac{P_2}{P_1}}{\Phi - \ln(1-G) - \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)} + \frac{\left(1 - \frac{P_2}{P_1}\right) \left(-2 - \frac{1}{2} \frac{P_1}{P_2}\right)}{\frac{B}{T_0} - \ln(1-G) - \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) - \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \frac{P_1}{P_2}} = 0$$

$$> \Phi := v_1 * (P_0 - P_{sat}) * (A - \ln(P_v)) * (A - \ln(P_v) - \ln(1-G) - \ln(P_r)) / C_p / B;$$

$$\Phi = \frac{v_1 (P_0 - P_{sat}) \left(\frac{B}{T_0} - \ln(1-G) - \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \right)}{C_{pL} T_0}$$

Exemplo 3:

$$> P_v := 25000; \ln(P_v) := \text{evalf}(\ln(P_v)); A := 22.07; B := 3963.7; C_p := 2400; P_0 := 750000; v_1 := 0.0015;$$

$$P_v := 25000; \ln(25000) := 10.12663110; A := 22.07; B := 3963.7$$

$$C_p := 2400; P_0 := 750000; v_1 := .0015$$

$$> \text{eq4};$$

$$\frac{1 - Pr}{.01630688245 - 1.001365350 \ln(1 - G) - 1.001365350 \ln(Pr)} + \frac{(1 - Pr) \left(-2 - \frac{1}{2} \frac{1}{Pr} \right)}{11.69336890 - \ln(1 - G) - \ln(Pr) + \frac{1}{Pr}} + 1 - 2 Pr = 0$$

Phi;
 $.01630688245 - .001365350312 \ln(1 - G) - .001365350312 \ln(Pr)$

```
> with(plots):
implicitplot(eq4 , G=0.0001..0.9999, Pr=0.48..0.9999,
title="iso-octano \n T0=56°C(Psat=25 kPa) e P0=750 kPa",
labels=["Grau de metaestabilidade, G" , `P2 /P1`],
grid=[100,100], axes=boxed, resolution=200,view=[0..1,
0.4..1]);
```

```
> G:=0; fsolve(eq4,Pr,0.1..1); unassign('G', 'Pr');
G:=1/2; fsolve(eq4,Pr,0.1..1); unassign('G', 'Pr');
G:=.9999999; fsolve(eq4,Pr,0.1..1); unassign('G', 'Pr');
G:=0
```

$Pr = .8999121871$ (0,89991639)

$G := \frac{1}{2}$

$Pr = .6196285133$ (0,61974668)

$G := .9999999$

$Pr = .4885297157$ (0,48861203)

- Os resultados deste exemplo (em azul), que foram calculados através da Eq. IV (esta vem da simplificação da Eq. III), são bastante semelhantes aos resultados do Exemplo 2 (resolvidos pela Eq. III), que estão entre parênteses.

Apêndice IV

Aplicativo Computacional para
Aquisições de Imagens e
Apresentação de Algumas Tentativas
de Métodos Ópticos para
Visualização do Jato

APÊNDICE IV

Este apêndice tem o objetivo de apresentar alguns recursos da câmara CCD e da placa de aquisição de imagens explorados pelo aplicativo computacional de aquisição de imagens desenvolvido neste trabalho. Em seguida são mostradas algumas tentativas de métodos ópticos para aquisição de imagens que não tiveram sucesso, mas que ainda podem ser explorados. No final, são mostrados alguns trechos do manual da câmara CV-M50 que indicam os recursos aqui mencionados.

IV.1. O APLICATIVO COMPUTACIONAL PARA AQUISIÇÃO DE IMAGENS

IV.1.1. Características da Placa de Aquisição de Imagens – DT3152 da marca Data Translation

A placa de aquisição de imagens possui os seguintes recursos:

- Digitaliza imagem preto e branco com profundidade de 8 bits e resolução de 640x480;
- aceita sinal digital para adquirir a imagem (“trigger”);
- possui 8 sinais digitais de saída disponíveis (DA0, DA1, DA2, DA3, DA4, DA5, DA6 e DA7);
- possui 4 canais de entrada de sinal de vídeo;
- envia sinais de controle para a câmera de CCD do tipo: sinal de frequência de controle do vertical (VD, ou “vertical frequency”, sinal que controla a mudança de campos) e sinal de frequência de controle (HD, ou “horizontal frequency”, sinal que controla a mudança da linha, na varredura do campo).

Como são utilizados estes recursos:

- esta placa dispara o início do processo de aquisição de dados, enviando um sinal digital para a placa de aquisição de dados (pelo DA0);
- em seguida, esta placa controla o tempo de exposição da primeira câmara CCD através dos sinais HD e VD;
- para adquirir uma imagem, a placa recebe um sinal digital da placa de aquisição de dados (CAD1236 da Lynx) através do recurso “trigger”. Geralmente, após adquirir as imagens obtidas pelo “Schlieren” (total de quatro imagens), ela recebe um último sinal de disparo para obter a imagem da 2^a. câmara do sistema de “iluminação por detrás”. Até este momento, ainda não ocorreu a injeção;
- em seguida, a placa de aquisição de imagens, envia um sinal digital (DA1) para disparar o injetor;
- enquanto ocorre a injeção, ela faz aquisição do número de imagens do jato predeterminadas pelo usuário, sendo a aquisição também obtida pelo recurso de “trigger”. Além disso, ela também faz a aquisição da imagem da 2^a. câmara CCD;
- a injeção é interrompida através da ausência de tensão do sinal de saída (DA1) no controle do cilindro pneumático;
- e o monitoramento do ensaio se encerra após 1 s do fechamento da injeção, praticamente.

IV.1.2. Características da Câmara CCD – CV-M50 da Coastar

A câmara CCD possui os seguintes recursos:

- funciona de modo entrelaçado;
- a imagem é preta e branca;
- aceita monitoramento do sinal vertical para regular o tempo de exposição do sensor CCD.

Como já foi visto a placa de aquisição de imagem pode controlar o tempo de exposição da câmara CCD através dos sinais de controle vertical e horizontal. Para isto, é necessário configurar a câmara CCD no recurso “Long Time Exposure” (ver manual da câmara CCD, CV-M50). Este recurso viabilizou o sincronismo entre o tempo de exposição da câmara CCD e o disparo da lâmpada do tipo “flash”. No final deste apêndice, é mostrada uma parte do manual da câmara CCD com a descrição da configuração desta função.

IV.1.3. Características da Placa de Aquisição de Dados (CAD 1236 da Lynx) para Monitoramento da Aquisição de Imagens

Para este monitoramento de aquisição de imagens a placa CAD 1236 dispõe de dois sinais de saída, do tipo digital, com recurso de frequência no modo retangular de onda.

Um sinal (“trigger”) é enviado para a placa de aquisição de imagens que faz o disparo da aquisição da imagem. O outro sinal é responsável para acionar a lâmpada de “flash”. Como já foi visto no Capítulo 3, este sinal é combinado com o sinal que monitora o tempo de abertura da câmara CCD para que o Flash dispare quando a câmara CCD estiver apta para obter a imagem. Caso contrário, o disparo pode ocorrer quando o sensor CCD não estiver habilitado e, conseqüentemente, não haverá imagem.

IV.1.4. A Interface do Programa de Aquisição de Imagens

O programa tem uma interface que possibilita visualizar o campo de expansão do jato na câmara de baixa pressão para ajustar o alinhamento das duas câmaras CCDs. Também o usuário ajusta o número de imagens que quer obter durante a injeção sabendo que cada imagem é adquirida em um intervalo de 0,5 s (ver Fig. IV.1), portanto, se a

opção é de 6 imagens do jato, o ensaio deve ter no mínimo uma duração de 3 s. A opção de ajuste do tempo de exposição do CCD para adquirir a imagem já está predeterminada no aplicativo computacional e pode ser vista na Fig. IV.2.

Figura IV.1 – Interface do aplicativo que configura o tempo de injeção e a quantidade de imagens obtidas no jato.

Figura IV.2 – Interface do aplicativo onde estão configuradas as frequências de varredura do campo (Vertical Frequency) e das linhas (Horizontal Frequency) para monitorar o tempo de exposição da câmara CCD.

Na Fig. 3.20 do Capítulo 3, é mostrada a interface do programa com o botão de acionamento do ensaio, onde está escrito “Inicia” com a quantidade de imagens que devem ser obtidas. Nele existe todo o código para realização da sequência de eventos que o aplicativo realiza durante a injeção, como foi visto na Seção IV.1.1.

O código computacional deste aplicativo é apresentado a seguir:

O aplicativo “AqJatos” foi desenvolvido através da biblioteca de funções “DtActive Open Layers”, da Data Translation, cuja linguagem computacional está em “Visual Basic”.

```

VERSION 5.00
Begin VB.Form frmEnsaio
    Dim N_image As Long
    Dim i As Integer
    Dim tempo As Integer
    Dim conta As Integer
    Dim pausa As Integer
    Public cam2 As Integer
    Dim aux As Integer

    Private Sub cmdPassthru_Click()

        On Error GoTo ErrHandler

        'Configura os tempos de exposição da câmara CCD
        frmMain.DTAOLFG1.SyncMasterEnabled = False
        frmMain.DTAOLFG1.VerticalFrequency = 10
        frmMain.DTAOLFG1.VerticalPulseWidth = 30000000
        frmMain.DTAOLFG1.HorizontalPulseWidth = 58000
        frmMain.DTAOLFG1.SyncMasterEnabled = True
        frmMain.DTAOLFG1.VideoInputSource = Chan0

        Call frmMain.DTAOLFG1.StartPassthru

    Exit Sub

    ErrHandler:
        MsgBox (Err.Description)
    End Sub

    Private Sub Form_Load()

        On Error GoTo ErrHandler

        'Inicia filmagem da camera CCD
        N_image = (frmTempos.Nfotos)
        cmdInicia.Caption = "Inicia(Quantidade:" + CStr(frmTempos.Nfotos) + "
            imagens)"
        Lbl_duracao.Caption = CStr(frmTempos.T_duracao) + " s"
        tempo = 0
        conta = 0
    
```

Exit Sub

ErrorHandler:
 MsgBox (Err.Description)

End Sub

Private Sub cmdCancela_Click()

 On Error GoTo ErrorHandler

'Unload Ensaio form
 Unload frmEnsaio

'Para visualizacao da filmagem da camera
 Call frmMain.DTAOLFG1.StopPassthru
 frmMain.DTAOLFG1.SyncMasterEnabled = False
 frmMain.DTAOLFG1.DigIOPattern = 0
 frmMain.DTAOLFG1.VideoInputSource = Chan0

Exit Sub

ErrorHandler:
 MsgBox (Err.Description)

End Sub

Private Sub cmdInicia_Click()

 On Error GoTo ErrorHandler

'Opção de utilização da 2ª. câmara CCD
 If Optcamera2.Value = True Then
 cam2 = 1
 camera2 = True
 Else
 cam2 = 0
 camera2 = False
 End If

'Configura os tempos de exposição da câmara CCD
 Call frmMain.DTAOLFG1.StopPassthru
 frmEnsaio.MousePointer = 11 'ampulheta
 frmMain.DTAOLFG1.VideoInputSource = Chan0
 frmMain.DTAOLFG1.SyncMasterEnabled = False
 frmMain.DTAOLFG1.VerticalFrequency = 10

```
frmMain.DTAOLFG1.VerticalPulseWidth = 30000000
frmMain.DTAOLFG1.HorizontalPulseWidth = 58000
frmMain.DTAOLFG1.SyncMasterEnabled = False
```

'ativar os parametros do trigger da placa de imagem

```
frmMain.DTAOLFG1.TriggerType = ExternalTrigger
frmMain.DTAOLFG1.TriggerTransition = OnLowToHigh
'frmMain.DTAOLFG1.MultTriggerType = ExternalTrigger
'frmMain.DTAOLFG1.MultTriggerTransition = OnLowToHigh
'frmMain.DTAOLFG1.MultTriggerMode = TriggerForEach
```

'Destroi da memoria antigas imagens para salvar novas, caso exista.

```
For i = 1 To (frmMain.DTAOLFG1.FrameCount)
    If frmMain.DTAOLFG1.FrameCount > 0 Then
        Call frmMain.DTAOLFG1.DestroyFrame(IdQuadro(i))
    End If
Next i
```

```
aux = N_image + 4 + cam2 + cam2
```

For i = 1 To aux 'este laço reserva a memoria para as imagens

```
'Allocate a frame buffer.
IdQuadro(i) = frmMain.DTAOLFG1.AllocateFrame(FrameLeft, FrameTop,
        FrameWidth, FrameHeight, FrameHorizontalScale, FrameVerticalScale,
        FrameType, DefaultImage)
Next i
```

```
pausa = 0
```

Espera.Enabled = True 'habilita contador para aquisição das primeiras imagens

```
Exit Sub
```

```
ErrorHandler:
```

```
MsgBox (Err.Description)
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Espera_Timer()
```

```
    pausa = pausa + 1
```

```
    If (cam2 = 1) Then
```

```
        frmMain.DTAOLFG1.SyncMasterEnabled = False
```

```
    End If
```

```
    If (pausa = 6) Then
```

```
        frmMain.DTAOLFG1.SyncMasterEnabled = True
```

'ativar a porta DigOut7 da placa para um sinal de TTL elevado

'1 = 00000001 (em binário) e o valor 1 corresponde ao sinal elevado de

TTL

```
    frmMain.DTAOLFG1.DigIOPattern = 1 'dispara Aqdados
```

```
    Espera.Enabled = False
```

```

        contador.Enabled = True 'habilita contador para aquisição das
                                primeiras imagens
    End If
End Sub

Private Sub contador_Timer()

    'adquirir as quatro primeiras imagens
    If (conta > 0) And (conta < 5) Then 'este laço realiza a aquisição
        frmMain.DTAOLFG1.DigIOPattern = 1
        'Hide picture box if it's currently visible.
        frmMain.Picture1.Visible = False
        'Acquire an image into the frame buffer. wait
        Call frmMain.DTAOLFG1.AcquireFrames(1, IdQuadro(conta), False)
        'Display acquired image.
        Call frmMain.DTAOLFG1.DrawAcquiredFrame(, IdQuadro(conta))
    End If
    conta = conta + 1

    If (conta = 5) And (cam2 = 1) Then
        frmMain.DTAOLFG1.VideoInputSource = Chan2
    End If

    If (conta = 6) And (cam2 = 1) Then
        'adquirir a imagem da camera secundaria
        'Hide picture box if it's currently visible.
        frmMain.Picture1.Visible = False
        'Acquire an image into the frame buffer. wait
        Call frmMain.DTAOLFG1.AcquireFrames(1, IdQuadro(5), False)
        'Display acquired image.
        Call frmMain.DTAOLFG1.DrawAcquiredFrame(, IdQuadro(5))
        frmMain.DTAOLFG1.VideoInputSource = Chan0
    End If

    If (conta = 9) Then
        'ativam-se as portas DigOut7 e 6 da placa para um sinal de TTL elevado
        '3 = 00000011 (em binario) e o valor 1 corresponde ao sinal elevado de
TTL
        frmMain.DTAOLFG1.DigIOPattern = 3 'abre injetor
    End If
    If (conta > 10) Then
        contador.Enabled = False 'desabilita este contador
        contador1.Enabled = True 'habilita contador para aquisição das
                                imagens do jato
        conta = 0
    End If

End Sub

```

```

Private Sub contador1_Timer()

    On Error GoTo ErrHandler

    If conta <= N_image Then
        Text2.Text = CStr(conta)
    End If
    conta = conta + 1

    'adquirir as imagens do jato
    If conta <= N_image Then
        frmMain.DTAOLFG1.VideoInputSource = Chan0
        'Hide picture box if it's currently visible.
        frmMain.Picture1.Visible = False
        'Acquire an image into the frame buffer. wait
        Call frmMain.DTAOLFG1.AcquireFrames(1, IdQuadro(conta + 4 + cam2),
            False)
        'Display acquired image.
        Call frmMain.DTAOLFG1.DrawAcquiredFrame(, IdQuadro(conta + 4 +
cam2))
    End If
    If (conta = N_image) And (cam2 = 1) Then
        frmMain.DTAOLFG1.VideoInputSource = Chan2
    End If

    If conta = (N_image + 2) Then
        If cam2 = 1 Then
            'frmMain.DTAOLFG1.TriggerType = SoftwareTrigger
            'Hide picture box if it's currently visible.
            frmMain.Picture1.Visible = False
            'Acquire an image into the frame buffer. wait
            Call frmMain.DTAOLFG1.AcquireFrames(1, IdQuadro(conta + 3 +
cam2), False)
            'Display acquired image.
            Call frmMain.DTAOLFG1.DrawAcquiredFrame(, IdQuadro(conta + 3 +
cam2))
            frmMain.DTAOLFG1.VideoInputSource = Chan0
        Else
            frmMain.DTAOLFG1.VideoInputSource = Chan0
        End If
    End If

    If (tempo > Int(10 * frmTempos.T_duracao - 4 * N_image - 8)) And (conta >
N_image + 1) Then
        'cada imagem leva ~0,5 s de tempo
        frmMain.DTAOLFG1.DigIOPattern = 0 'fecha injecao
        contador1.Enabled = False
        Text1.Text = CStr(tempo / 2)
    End If

```



```

'Unload Ensaio form.
Unload frmEnsaio
'sai a ampulheta e volta ao normal
frmEnsaio.MousePointer = 0
'desabilita trigger
frmMain.DTAOLFG1.TriggerType = SoftwareTrigger
'Make the "Salvar" form visible.
frmSalvar.Show vbModal
End If
tempo = tempo + 1 'tempo estah em quatro decimos de segundo 0,100s

Exit Sub

ErrorHandler:
    MsgBox (Err.Description)

End Sub

Private Sub Form_Unload(Cancel As Integer)

    On Error GoTo ErrorHandler

    Call frmMain.DTAOLFG1.StopPassthru
    'sinal "0" para todas as saidas
    frmMain.DTAOLFG1.DigIOPattern = 0
    'desabilita trigger externo
    frmMain.DTAOLFG1.TriggerType = SoftwareTrigger
    frmMain.DTAOLFG1.VideoInputSource = Chan0

Exit Sub

ErrorHandler:
    MsgBox (Err.Description)

End Sub

```

IV.2. TENTATIVAS DE MÉTODOS ÓPTICOS PARA VISUALIZAÇÃO DOS JATOS

IV.2.1. Iluminação por “Lâmina de laser” ou “laser sheet”

Testes foram realizados para obtenção de imagens com iluminação lateral por lâmina (“laser sheet”). Esta técnica visa observar a estrutura interna do núcleo líquido e o desvio da trajetória da gotícula após a onda de evaporação.

Pode-se observar nesta técnica através da imagem obtida que a parte líquida do jato fica iluminada, diferente do “Schlieren” que possui esta porção com a tonalidade quase que totalmente escura. Isto ocorre porque a iluminação do “Schlieren” fica por detrás com relação ao observador e nesta técnica, a iluminação é lateral, de preferência a 90°, em relação ao observador. Sendo uma lâmina de “laser”, a imagem observada decorre da reflexão da luz nas gotículas. Também, a imagem observada se refere a uma secção transversal do jato apenas, sem integrar informações das outras secções, dando oportunidade de se extrair conclusões sobre o comportamento do fluido na região do núcleo líquido.

A Fig. IV.3 mostra a disposição da fonte de “laser” com potência de 5 mW que ilumina o jato. A Fig. IV.4 ilustra a área que a lâmina de “laser” abrange quando alinhada a saída do bocal. E na Fig. IV.5 é apresentada a imagem obtida do jato. Neste teste, pode-se concluir que a quantidade de luz ainda é insuficiente para obter uma boa imagem com um menor tempo de exposição.

Figura IV.3 – Esquema da disposição da iluminação com a lâmina lateral de “laser”.

Figura IV.4 – Fotografia da lamina de “laser” que ilumina o jato. A fonte de “laser” está atrás do injetor.

Figura IV.5 – Imagem de um jato obtido com a lâmina de “laser”. No caso, o tempo de exposição foi de 1/60s.

IV.2.2. Imagem Termográfica

A câmara CCD CV-M50 possui uma faixa sensível à radiação infravermelha. Foi utilizada uma ponta de solda (instrumento para soldar componentes eletrônicos) aquecida como teste preliminar para obtenção deste tipo de imagem termográfica, que está mostrada na Fig. IV.6. Na figura, a radiação de sua temperatura está correlacionada com a iluminação da ponta de solda obtida na imagem. Infelizmente, para um ensaio com temperatura de injeção de 160 °C, não foi possível obter uma imagem termográfica do jato.

Figura IV.6 – Imagem termográfica de uma ponta de solda aquecida.

A seguir, são extraídos trechos do manual da câmara CCD com as características, procedimento de configuração do “Long Time Exposure” (utilizado no sincronismo da câmara com o “flash”) e faixa de comprimentos de ondas sensíveis ao sensor CCD.

CV-M50

1. General

The CV-M50 is a monochrome 1/2" CCD camera designed for automated imaging applications featuring high performance and unique functions within a uniform and compact housing.

The high-speed shutter function and asynchronous random trigger function allow the camera to capture high quality images of fast moving objects. It is suitable for industrial applications such as on-line inspection and measurements.

In addition to conventional random trigger modes, the newly added pulse width control shutter mode makes it possible control the accumulation time by the trigger pulse width.

2. Standard Composition

The standard camera composition consists of the camera main body, tripod mount plate and operation manual.

3. Main Features

- 1/2" interline transfer CCD sensor with 768 (h) x 494 (v) pixels for EIA and 752 (h) x 582 (v) pixels for CCIR.
- High horizontal resolution. 570 TV lines for EIA, 560 TV lines for CCIR.
- Excellent S/N. Better than 56dB.
- High sensitivity. Minimum 0.05 lx illumination on CCD sensor.
- Improved smear performance and higher dynamic range.
- Random trigger modes with edge pre-select shutter, start/stop shutter and pulse width control shutter.
- Random trigger shutter up to 1/10,000 sec.
- Long-time exposure mode from a single field to several seconds.
- WEN -, EEN - and pixel clock output to support further advanced image capturing.
- Internal or external HD/VD synchronization.
- Easy shutter and functions mode setting from rear panel.
- Lens mount for C-mount lens.
- The camera features a robust package, lightweight and compact size.

CV-M50

6.3.4. Long Time Exposure Mode

The Long time exposure will work in 3 modes:

1. Interlaced with field accumulation.
2. Interlaced with frame accumulation.
3. Non-interlaced with field accumulation.

The exposure time is the interval between 2 ext. VD pulses sent to the camera VD input. Each ext. VD pulse will reset and restart the internal VD in the camera as for ext. HD/VD input. So the camera is synchronized to the external HD/VD supply after each VD input.

An exposure starts after input of an external VD pulse, and ends after the next input of ext. VD, which again starts a new exposure.

The long time exposure is a continuous process where each external VD will synchronize the camera, stop an exposure, start a new exposure and read out the previous accumulated signal as interlaced or non-interlaced fields.

The exposure control can be done by feeding every N^{th} VD pulse from the external HD/VD supply to the camera. N is the wanted exposure time in number of fields. This is typically done in the frame grabber PC.

The range for long time exposure is from 1 V (a single field) to ∞ . However the dark current signal will increase by longer time, so >2 seconds are not recommended at normal ambient temperature.

To use this mode:

- Set:
- SW1-1, 2 and 3 to OFF
 - SW1-4 to OFF for normal shutter.
 - SW1-5 to ON for frame accumulation or OFF for field accumulation.
 - SW1-6 to OFF for 2:1 interlaced or ON for non-interlaced.
 - Jumper JP6 on PK8057 to CLOSE
- Input:
- Ext. VD pulses with the exposure interval to pin 7 on 12 pin multi connector.
 - Ext. HD to pin 6 on 12 pin multi connector.
 - 75 Ohm termination is done with SW2-1 and SW2-2 on PK8057 board.

The timing for the external VD interval has to be as follow. (V is the time for a single field)

- Interlaced with field accumulation. 1 V or more
- Interlaced with frame accumulation. 2 V or integral number of 2V
- Non-interlaced with field accumulation. 2 V or more

Note: The external HD/VD sync. generator, which supply the ext. VD and HD signals should follow the scanning standard for the camera setting.

	EIA	CCIR
Interlaced and field accumulation.	1 V = 262.5 H	1 V = 312.5 H
Interlaced and frame accumulation.	2 V = 525.0 H	2 V = 625.0 H
Non-interlaced and field accumulation.	2 V = 524.0 H	2 V = 624.0 H

Refer to Timing Chart and Cautions on next page.

Detailed switch and jumper setting is described in "7. Mode Setting".

For connections see 5. "Pin Assignment".

*CV-M50***Cautions in the Long Time Exposure Mode.**

1. Theoretical exposure time is as follows. EIA: 1/30 sec. to ∞ , CCIR: 1/25 sec. to ∞ .
2. It is recommended not to use exposure > 2 sec. since visible dark-current noise may occur.
3. Ext. HD signal (4.0 Vp-p ± 2.0 V at 75 Ohm terminated) has to be input continuously
The falling edge of Int. HD signal and Ext. VD signal are phase-synchronized.
4. Timing of ext. VD signal in each accumulation mode has to be set, as described before.

a) 2:1 Interlaced mode (Field accumulation mode)

b) 2:1 Interlaced mode (Frame accumulation mode)

c) Non interlaced mode (Field accumulation mode)

CV-M50

10. Specifications

Scanning system	CQR 625 lines 25 frames/sec.	EIA 525 lines 30 frames/sec.
CCD sensor	Monochrome 1/2" HyperHAD IT CCD	
Sensing area	6.6 mm (h) x 4.8 mm (v)	
Effective pixels	752 (h) x 582 (v)	768 (h) x 494 (v)
Elements in video output	737 (h) x 575 (v)	758 (h) x 486 (v)
Cell size	8.6 (h) x 8.3 (v) μm	8.4 (h) x 9.8 (v) μm
Resolution (horizontal)	580 TV lines	570 TV lines
Resolution (vertical)	575 TV lines	485 TV lines
Sensitivity on sensor	0.05 lx	
S/N ratio	>56 dB (AGC off, Gamma 1)	
Video output	Composite V/S signal 1.0 Vpp, 75 Ohm	
Gamma	0.45 - 1.0	
Gain	Manual - Automatic 0 to +15 dB by potentiometer or AGC	
Scanning	2:1 Interlace - non-interlace	
Accumulation	Field - frame	
Synchronization	Int. X-tal. Ext HD/VD or random trigger	
HD sync. input/output	4V, 75 Ohm*	
VD sync. input/output	4V, 75 Ohm*	
Trigger input	4V, 75 Ohm*	
Trigger input duration	>HD interval	
WEN output (write enable)	4V, 75 Ohm	
EEN output (exposure enable)	4V, 75 Ohm	
Pixel clock output (optional)	4V, 75 Ohm sine	
Normal shutter	Off, 1/100, 1/250, 1/500, 1/1000, 1/2000, 1/4500, 1/10,000 sec.	
Edge pre-select shutter	1/60, 1/100, 1/250, 1/500, 1/1000, 1/2000, 1/4500, 1/10,000 sec.	
Pulse width controlled shutter	>1 H (6.4 $\mu\text{sec.}$) to <60 msec.	
Start/stop trigger shutter	1/77 sec to 1/10,000 sec.	
Long time exposure	1 field to ∞ . Duration between next. VD pulses	
Operating temperature	-5°C to +45°C	
Humidity	20 - 80% non-condensing	
Storage temp./humidity	-25°C to 60°C/20 - 90%	
Power	12V DC $\pm 10\%$, 2.5W	
Lens mount	C-mount	
Dimensions	40 x 50 x 80 mm (HxWxD)	
Mass	230 g	

* HD sync., VD sync./Trigger input or output by internal jumpers.
 Factory setting: HD/VD input. Inputs TTL or 75 Ohm terminated by internal jumpers. Factory setting: 75 Ohm terminated.

Note: Above specifications are subject to change without notice.

10.1. Spectral Sensitivity

Apêndice V

Alguns Esquemas e Fotografias da Bancada Experimental

APENDICE V

Neste apêndice estão apresentadas três fotografias e dois esquemas da instalação do laboratório.

Figura V.1 – Alguns componentes do sistema de injeção.

Figura V.2 – Mesa óptica com a camara CCD.

Figura V.3 – Mesa óptica com a camara CCD.

Figura V.4 – Esquema do sensor de posição.

Figura V.5 – Esquema da seção de observação com algumas dimensões.