MARCELO MENDES VIEIRA

**ESTUDOS EXPERIMENTAL DE
JATOS EVAPORATIVOS**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. José Roberto Simões Moreira

São Paulo
1999

À minha mãe

Izalina Mendes Vieira (*in memoriam*)

e

ao meu pai

Abel Vieira.

Agradecimentos

Agradeço à Fapesp e ao CNPq que financiaram este projeto.

Meus sinceros agradecimentos a todos do Laboratório SISEA, destacando os amigos André Luiz C. Quadros e Marcelo Silva Guimarães que muito 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 depositada 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 e, à Elisa Franco. São pessoas que de forma desprendida e desinteressada apoiaram-me, incentivaram-me, e ofereceram-me suporte necessário para realização deste trabalho.

Dedico o meu profundo respeito e carinho a esta minha companheira, Marimar, pelo seu auxílio e encorajamento a mim oferecidos.

E dedico a minha eterna gratidão aos meus pais que sempre buscaram ensinar a sabedoria de vida na simplicidade, dedicação e dignidade de suas ações e, com isso, proporcionaram-me 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, novembro de 1999.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iii
ÍNDICE	iv
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE ENSAIOS.....	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
1. INTRODUÇÃO	1
<i>1.1. Apresentação e revisão bibliográfica.....</i>	<i>1</i>
<i>1.2. Objetivos.....</i>	<i>8</i>
<i>1.3. Divisão da dissertação</i>	<i>9</i>
2. TEORIA	10
<i>2.1. Os fluidos</i>	<i>10</i>
<i>2.2. Líquido superaquecido</i>	<i>12</i>
<i>2.3. Ondas de evaporação</i>	<i>15</i>
<i>2.4. Análise qualitativa de um jato evaporativo</i>	<i>18</i>

3. ARRANJO EXPERIMENTAL	24
3.1. Sistema de pressurização e de vácuo	27
3.2. Sistema de aquecimento	30
3.3. Sistema de injeção	31
3.4. Sistema óptico	34
3.5. Sistema de aquisição de dados	37
3.6. Processamento matemático das imagens	41
3.7. Procedimento do ensaio	48
3.8. Análise de incerteza das medições	50
 4. RESULTADOS E ANÁLISES	 51
4.1. Parâmetros e condições de ensaio	51
4.1.1. Características da imagem do jato	51
4.1.2. Condições de ensaio	53
4.1.3. Resultados com jatos de ar	51
4.2. Análise qualitativa dos jatos	56
4.2.1. Tipos de jatos observados	56
4.2.1.1. Jato contínuo	56
4.2.1.2. Jato pulverizante	56
4.2.1.3. Jato com ondas de choque de formato elipsóide	57
4.2.1.4. Jato com ondas de choque de formato esférico	57
4.2.2. Análise do comprimento da coluna de líquido em jatos pulverizantes	58
4.2.3. Análise das ondas de choque formadas	60
4.2.4. Estágio de formação das ondas de choque em jatos pulverizantes	63
4.2.5. Análise do ângulo de expansão dos jatos pulverizantes	66
4.2.6. Análise da vazão	67
4.2.7. Tabelas dos ensaios realizados	71

4.3. Documentação fotográfica	75
4.3.1. Ensaios com n-dodecano	78
4.3.2. Ensaios com querosene.....	82
4.3.2.1. <i>Jatos contínuos</i>	82
4.3.2.2. <i>Jatos pulverizantes</i>	84
4.3.2.3. <i>Jatos com ondas de choque de formato elipsóide</i>	111
4.3.2.4. <i>Jatos com ondas de choque de formato esférico</i>	140
4.3.3. Ensaios com óleo diesel	142
4.3.4. Ensaios com ar.....	145
 5. CONCLUSÃO E CONTINUIDADE DO TRABALHO	 151
5.1. <i>Conclusão.....</i>	151
5.2. <i>Continuidade do trabalho</i>	152
 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 153
 APÊNDICE I - DESENVOLVIMENTO DO PROJETO ÓPTICO.....	 156
 APÊNDICE II - LISTAGEM DO PROGRAMA DE FILTRAGEM E	
PROCESSAMENTO MATEMÁTICO DE IMAGENS	166
 APÊNDICE III - INSTRUMENTAÇÃO, CALIBRAÇÃO E ANÁLISE DE INCERTEZA	 188
 APÊNDICE IV - ALGUMAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS.....	 208
 APÊNDICE V - ALGUNS DESENHOS E ESQUEMA DO PROJETO	 212
 APÊNDICE VI - LISTA DE PROCEDIMENTOS DO ENSAIO	 227

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Onda de evaporação em n-dodecano superaquecido. Condições: Temperatura do líquido 230 °C, pressão abaixo da onda de 0,59 bar, pressão acima da onda de evaporação de 0,37 bar e velocidade da onda de 47,2 cm/s (Simões Moreira, 1994).	2
Figura 1.2 - Injeção de combustível líquido superaquecido (Oza, 1983).	3
Figura 1.3 - Jato com evaporação completa e formação de onda de choque (Chaves e outros, 1992).	5
Figura 1.4 - Fotografia com (a) tempo de exposição de 1/250 s com iluminação lateral e, (b) tempo de 20 ns com iluminação por detrás do jato, Rietz (1990).	6
Figura 2.1 – Diagrama T-s de uma substância SCME (n-dodecano) e uma substância simples (água).	11
Figura 2.2 – Representação da região metaestável de um fluido em diagrama temperatura - volume específico.	14
Figura 2.3 – Gráfico da curva de saturação e espinodal do n-dodecano (Simões Moreira, 1994).	14
Figura 2.4 – Volume de controle da onda de evaporação.	16
Figura 2.5 – Representação das curvas de Rankine-Hugoniot e de Rayleigh em uma evaporação.	17
Figura 2.6 - Perfis de jatos (Peter e outros, 1994).	18
Figura 2.7 - Jatos de diferentes tipos dependentes do grau de superaquecimento (Chaves e outros, 1992).	19
Figura 2.8 - Distância normalizada em função da razão de pressões (Chaves e outros, 1992).	21
Figura 2.9 – Outros exemplos de jatos superaquecidos (Chaves e outros, 1992).	22
Figura 2.10 - Medições do fluxo mássico : -----, cálculo para incompressível (Bernoulli); _____, modelo de cálculo; *, resultados experimentais. $P_0 = 15$ bar e $P_e = 10$ mbar (Chaves e outros, 1992).	23
Figura 3.1 - Esquema geral do aparato experimental.	25
Figura 3.2 - Foto do reservatório, duto com visores, mesas ópticas com suportes, lentes, espelhos parabólicos e filtro espacial.	26
Figura 3.3 - Foto da bomba de vácuo e do painel com mano-vacuômetro de mercúrio e vacuômetro analógico de precisão.	26

Figura 3.4 - Esquema do sistema de vácuo.	28
Figura 3.5 - Desenho do condensador de vapores.	28
Figura 3.6 - Foto do condensador de vapores.	29
Figura 3.7 - Esquema do sistema de aquecimento.	30
Figura 3.8 - Esquema da linha de injeção.	31
Figura 3.9 - Desenho do corpo de injeção.	33
Figura 3.10 - Desenho dos bocais.	34
Figura 3.11 - Geometria do aparato óptico.	35
Figura 3.12 - Equipamentos: espelhos, lâmpada, lente convergente e filtro espacial.	36
Figura 3.13 - Equipamento: espelhos, filtro espacial e câmara CCD.	37
Figura 3.14 - Sistema de aquisição de dados, onde o canal "0" dispara o injetor e o canal "1" dispara a aquisição das imagens.	38
Figura 3.15 - Esquema dos sinais de saída. A linha tracejada (---) corresponde ao sinal do acionamento do injetor e a linha contínua (—)corresponde ao sinal de disparo para as imagens.	38
Figura 3.16 - Comportamento dos sinais vistos lado a lado.	40
Figura 3.17 - Fotografia antes do jato.	41
Figura 3.18 - Foto durante o jato.	42
Figura 3.19 - Imagem filtrada (mapa de cores "gray").	43
Figura 3.20 - Foto do jato no mapa de cores "hsv".	45
Figura 3.21 - Foto do jato no mapa de cores "prism".	46
Figura 4.1 - Fotografia de um jato de querosene líquida sem evaporação.	51
Figura 4.2 - Jato de querosene inicialmente líquida com evaporação completa.	52
Figura 4.3 - Imagem tratada da Figura 4.2.	53
Figura 4.4 - Jato de ar com formação do disco de Mach. As condições são: $P_0 = 643$ kPa, $T_0 = 23,7$ °C , $P_\infty = 530$ Pa e $D_b = 0,70$ mm.	55

Figura 4.5 - Imagem filtrada da Figura 4.4.....	56
Figura 4.6 - Jato de perfil pulverizante - imagem tratada do ensaio n.º 31 (Querosene à $P_0 = 615 \text{ kPa}$, $T_0 = 95 \text{ °C}$, $P_\infty = 1200 \text{ Pa}$).....	56
Figura 4.7 - Jato de perfil elipsóide - imagem tratada do ensaio n.º 32 (Querosene à $P_0 = 650 \text{ kPa}$, $T_0 = 220 \text{ °C}$, $P_\infty = 10 \text{ Pa}$).	57
Figura 4.8 - Jato de perfil esferóide - imagem tratada do ensaio n.º 8 (Querosene à $P_0 = 500 \text{ kPa}$, $T_0 = 265 \text{ °C}$, $P_\infty = 400 \text{ Pa}$).....	58
Figura 4.9 - Gráfico do comprimento (x) do jato líquido em função da temperatura, dados referentes à Tabela 4.2. Obs.:Na legenda consta a pressão de injeção do ensaio.....	59
Figura 4.10 - Ilustração do comprimento da coluna de líquido.	60
Figura 4.11 - Gráfico da distância da onda de choque em função da temperatura de injeção.Dados referentes à Tabela 4.3. Obs.:Na legenda consta a pressão de injeção do ensaio. No caso do diesel, a pressão de injeção é de 500 kPa	61
Figura 4.12 - Gráfico da diâmetro do disco de Mach em função da temperatura de injeção. Dados referentes à Tabela 4.3. Obs.:Na legenda consta a pressão de injeção do ensaio. No caso do diesel, a pressão de injeção é de 500 kPa	63
Figura 4.13 - Dimensões medidas nas onda de choque.	63
Figura 4.14 - Jato com princípio de formação da onda de choque. Condições: querosene à $P_0=500\text{kPa}$, $P_\infty=1200 \text{ Pa}$ e $T_0=85^\circ\text{C}$	64
Figura 4.15 - Jato com princípio mais avançado de formação. Condições: querosene à $P_0=500\text{kPa}$, $P_\infty=1200 \text{ Pa}$ e $T_0=110^\circ\text{C}$	64
Figura 4.16 - Jato com onda de choque elipsóide, com a possibilidade de ainda muitas gotículas traspasarem a onda de choque. Condições: querosene à $P_0=500\text{kPa}$, $P_\infty=1200 \text{ Pa}$ e $T_0=155^\circ\text{C}$	65
Figura 4.17 - Jato com onda de choque elipsóide e evaporação total. Condições: querosene à $P_0=500\text{kPa}$, $P_\infty=1200 \text{ Pa}$ e $T_0=260^\circ\text{C}$	65
Figura 4.18 - Esquema da medição do ângulo do jato evaporativo.....	67
Figura 4.19 - Gráfico da vazão a uma pressão de injeção de $0,3 \text{ MPa}$	69
Figura 4.20 - Gráfico da vazão a uma pressão de injeção de $0,5 \text{ MPa}$	69
Figura 4.21 - Gráfico da vazão a uma pressão de injeção de $0,7 \text{ MPa}$	70

LISTA DE TABELA

<i>Tabela 3.1</i> - Exemplo imaginário de equivalência em mapas de cores.....	44
<i>Tabela 3.2</i> - Outro exemplo imaginário de equivalência em mapas de cores.....	45
<i>Tabela 3.3</i> - Relação dos mapas de cores do Matlab.	47
<i>Tabela 3.4</i> - Incertezas relativas as medições realizadas.....	50
<i>Tabela 4.1</i> - Ensaio com jatos de ar.....	54
<i>Tabela 4.2</i> - Dados dos jatos pulverizantes.	59
<i>Tabela 4.3</i> - Informações dimensionais das ondas de formato elipsóide.....	62
<i>Tabela 4.4</i> - Ângulos de expansão dos ensaios com querosene de n.º 12 a 17.....	66
<i>Tabela 4.5</i> - Análise da vazão.	68
<i>Tabela 4.6</i> - Relação de ensaios com querosene.	72
<i>Tabela 4.7</i> - Relação de ensaios com n-dodecano, óleo diesel e jato de ar.....	74

LISTA DE ENSAIOS

<i>Ensaio n.º 01</i>	78
<i>Ensaio n.º 02</i>	79
<i>Ensaio n.º 03</i>	80
<i>Ensaio n.º 04</i>	81
<i>Ensaio n.º 05</i>	81
<i>Ensaio n.º 07</i>	111
<i>Ensaio n.º 08</i>	140
<i>Ensaio n.º 09</i>	112
<i>Ensaio n.º 10</i>	113
<i>Ensaio n.º 11</i>	82
<i>Ensaio n.º 12</i>	84
<i>Ensaio n.º 13</i>	86
<i>Ensaio n.º 14</i>	88
<i>Ensaio n.º 15</i>	90
<i>Ensaio n.º 16</i>	92
<i>Ensaio n.º 17</i>	94
<i>Ensaio n.º 18</i>	82
<i>Ensaio n.º 19</i>	82
<i>Ensaio n.º 21</i>	114
<i>Ensaio n.º 22</i>	115
<i>Ensaio n.º 23</i>	116
<i>Ensaio n.º 24</i>	117
<i>Ensaio n.º 25</i>	118
<i>Ensaio n.º 26</i>	119
<i>Ensaio n.º 27</i>	120
<i>Ensaio n.º 28</i>	121
<i>Ensaio n.º 29</i>	122
<i>Ensaio n.º 30</i>	110
<i>Ensaio n.º 31</i>	96
<i>Ensaio n.º 32</i>	123

<i>Ensaio n.º 33</i>	124
<i>Ensaio n.º 34</i>	125
<i>Ensaio n.º 35</i>	97
<i>Ensaio n.º 36</i>	98
<i>Ensaio n.º 37</i>	99
<i>Ensaio n.º 38</i>	100
<i>Ensaio n.º 39</i>	101
<i>Ensaio n.º 40</i>	126
<i>Ensaio n.º 41</i>	127
<i>Ensaio n.º 42</i>	102
<i>Ensaio n.º 43</i>	128
<i>Ensaio n.º 44</i>	141
<i>Ensaio n.º 45</i>	142
<i>Ensaio n.º 46</i>	143
<i>Ensaio n.º 47</i>	129
<i>Ensaio n.º 48</i>	130
<i>Ensaio n.º 49</i>	131
<i>Ensaio n.º 50</i>	103
<i>Ensaio n.º 51</i>	104
<i>Ensaio n.º 52</i>	105
<i>Ensaio n.º 53</i>	82
<i>Ensaio n.º 54</i>	83
<i>Ensaio n.º 55</i>	83
<i>Ensaio n.º 56</i>	106
<i>Ensaio n.º 57</i>	108
<i>Ensaio n.º 58</i>	132
<i>Ensaio n.º 59</i>	134
<i>Ensaio n.º 60</i>	136
<i>Ensaio n.º 61</i>	138
<i>Ensaio n.º 62</i>	145
<i>Ensaio n.º 63</i>	147
<i>Ensaio n.º 64</i>	149

LISTA DE SÍMBOLOS

A	=	área na saída do bocal
C_D	=	coeficiente de descarga
C_v	=	calor específico à volume constante
$\tilde{C}_v$	=	calor específico adimensional à volume constante
D_b	=	diâmetro do bocal
D_M	=	diâmetro da onda de choque
h	=	entalpia específica
H	=	grau de superaquecimento, P_{sat} / P_e
J	=	vazão mássica superficial
P	=	pressão
P_{sat}	=	pressão de saturação do líquido à temperatura de injeção
P_∞ ou P_e	=	pressão da câmara de vácuo
Q_E	=	vazão experimental
Q_T	=	vazão teórica
$\bar{R}$	=	constante universal dos gases
T	=	temperatura
U	=	incerteza de uma medição
v	=	volume específico
W	=	velocidade relativa do fluido
x	=	comprimento da coluna de líquido do jato pulverizante
X_M	=	distância axial da onda de choque em relação ao bocal
ΔV	=	deslocamento do nível volumétrico da pipeta
Δt	=	intervalo de tempo de injeção

Subscritos:

$_0$	=	inicial ou de injeção
$_1$	=	à montante da onda de evaporação
$_2$	=	à jusante da onda de evaporação

c = ponto crítico

l = líquido

RESUMO

Foi construído um arranjo experimental para estudar o comportamento dos jatos evaporativos. Um injetor foi projetado para controlar e manter constantes a pressão e temperatura de reservatório durante a injeção. Um bocal cônico convergente de seção reta com diâmetro de saída de 0,30 mm e ângulo entre sua geratriz e seu eixo simetria igual à 10° forma o elemento principal do injetor. O jato é descarregado em uma câmara de baixa pressão de dimensões suficientemente grandes para manter a pressão constante durante o curto período de ensaio, igual à 1 s. Quando injetado, o líquido sofre uma repentina queda de pressão ocasionando sua evaporação. Os fluidos utilizados são os combustíveis querosene e óleo diesel, e a substância n-dodecano, os quais se caracterizam pela possibilidade de uma evaporação completa, de forma adiabática. Utilizou-se o método "schlieren" para a visualização do escoamento. A análise dos jatos é feita de forma qualitativa através dos registros fotográficos. Foram observados os seguintes tipos de jato: (1) contínuo, (2) pulverizante e (3) evaporação na superfície. O primeiro jato não implica em imediata mudança de fase tornando o jato de líquido emergente intacto. Com o aumento da temperatura de injeção, existe o espalhamento e a evaporação do jato, formando o segundo tipo de jato, onde é possível visualizar o campo do gradiente de densidade do escoamento e a formação de ondas de evaporação e de choque que pode ocorrer a uma distância proporcional a vários diâmetros à jusante. Em jatos com evaporação completa, foram constadas a formação de ondas de choque tanto de formas elipsóide como de esferóide para elevadas temperaturas. As fotografias digitais são submetidas à filtragem e processamento matemático para melhor destacar tais fenômenos do escoamento.

ABSTRACT

An experimental apparatus has been built to study the behaviour of flashing jets. An injector was designed to control and maintain the jet pressure and temperature at constant values during the injection process. A conical convergent nozzle whose main dimensions are 0,30 mm of exit diameter, 8 mm long, and a convergence half-angle of 10° is the central component of the injection system. The jet is discharged into a low-pressure chamber large enough to keep the reservoir pressure constant during the short test period of about 1 s. As the testing liquid expands in the nozzle it undergoes a sudden pressure drop causing its evaporation. The fluids are usual fuels, such as kerosene and diesel oil, and the substance n-dodecane, which are distinguishable by the possibility of a complete evaporation in an isentropic expansion process. The photographic method "schlieren" is used for flow visualisation. A qualitative analysis is made of the photographic documentation of the images obtained using a CCD camera. The images can be grouped into three categories of jets: (1) continuous, (2) shattering, and (3) with surface evaporation. The first regime has an undisturbed a liquid column, which remains more or less intact during the injection process. In the second type, the existing liquid jet is shattered by vapour nucleation and, in some cases, shock waves are clearly visible. It happens at higher temperature than the preceding evaporation mode. Finally, in special situations, the jet undergoes an evaporation at its surface and the two-phase mixture expands at a high speed followed by a shock wave before the mixture attains the pressure reservoir.

1. INTRODUÇÃO

1.1. *Apresentação e revisão bibliográfica*

A evaporação de líquidos metaestáveis, ou superaquecidos, tem 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, que tem sua temperatura de ebulição em $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$, à pressão atmosférica. Seu grau de metaestabilidade pode atingir uma temperatura de até $53\text{ }^{\circ}\text{C}$, nesta mesma pressão sem sofrer a vaporização. Isto se a nucleação de vapor for inibida, e se não houver a fase de vapor presente. Considerando agora o seguinte, se o propano, a $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$, 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 exemplo também foi constatado em outros hidrocarbonetos leves. A metaestabilidade tem um limite, também conhecido como limite de superaquecimento. Sob o critério termodinâmico, este limite de metaestabilidade se encontra quando $(\partial p / \partial v)_T = 0$ que forma uma curva conhecida por “espinodal”.

A evaporação de líquidos superaquecidos não acontece apenas de maneira explosiva. Simões Moreira e outros (1993) classificam que os líquidos superaquecidos podem sofrer uma “evaporação rápida”, que é um pouco mais amena ou controlada, em

relação 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 percorre o líquido superaquecido ou 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 indicada na Figura 1.1. Elevados graus de metaestabilidade foram obtidos em seus experimentos com n-dodecano. Nessa figura, uma onda de evaporação se propaga de cima para baixo em n-dodecano líquido e superaquecido.

Fig. 1.1 - Onda de evaporação em n-dodecano superaquecido.

Condições: Temperatura do líquido 230 °C, pressão abaixo da onda de 0,59 bar, pressão acima da onda de evaporação de 0,37 bar e velocidade da onda de 47,2 cm/s (Simões Moreira, 1994).

Fig. 1.2 - Injeção de combustível líquido superaquecido (Oza, 1984).

Determinadas substâncias podem sofrer uma mudança completa de fase em um processo isoentrópico. A possibilidade de uma completa mudança de fase, de forma 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. Experimentos foram realizados no sentido de simular este processo com estes fluidos. Dettleff e outros (1979) planejaram experimentos em um tubo de choque, onde indicou a existência de uma fase líquida formada durante a reflexão da onda na extremidade fechada do tubo. Simões Moreira (1994) e Simões Moreira e Shepherd (1999), demonstraram a possibilidade da completa evaporação utilizando a n-dodecano.

Constantes pesquisas são realizadas para a viabilização de combustíveis alternativos, e o melhor processo de injeção nos motores a combustão. Com o intuito de melhorar a atomização da injeção dos combustíveis, Oza (1984) utilizou substâncias puras como o metanol e o indolene em injetores que permitiam o pré-aquecimento do líquido e verificou que quanto maior o superaquecimento, mais esparsa era a pulverização do jato, como mostrado na Figura 1.2. E além destas substâncias, Oza (1984) também utilizou

propano e verificou que, quanto maior a razão entre as pressões de injeção e da câmara onde foi feita a injeção destas substâncias, maior era o cone de dispersão do jato pulverizado.

Peter e outros (1994), realizaram ensaios com água e caracterizou os tipos de jatos conforme o grau de superaquecimento do jato. Jatos com pequenos graus de superaquecimento possuíam a forma de um filete líquido contínuo que ao longo do percurso se quebrava devido a nucleações esporádicas (também chamado de "breakup points", na literatura inglesa), tal como observou Lienhard e Day (1970). Aumentando o grau de superaquecimento, também verificava o aumento da dispersão do jato. A temperatura e o tamanho das gotículas de água dispersas foram também dados coletados no ensaio. A câmara onde expandia o jato alcançava uma pressão mínima de 600 Pa o que proporcionava para um jato de água de 19 °C uma grande dispersão das gotículas, enquanto que, Fuchs e Legge (1979), com praticamente as mesmas condições de injeção, mas com pressão da câmara alcançando um maior vácuo de 0,1 Pa, conseguiu observar partículas de gelo devido ao resfriamento das gotículas durante a expansão do jato. Neste caso, estes simulavam a expulsão do condensado do vapor de água da atmosfera de dentro de cabines de naves espaciais em órbita. Chaves e outros (1992) realizaram ensaios com o fluorcarbonato C_6F_{14} (uma substância SCME), também observaram os diversos perfis destes jatos evaporativos semelhantes aos perfis de jatos registrados por Peter e outros (1994). Porém em estágios mais avançados de superaquecimento, eles observaram a evaporação completa do líquido, cujo vapor se expandia em um escoamento supersônico dando conseqüência a ondas de choque registrada em suas fotografias, como aquela vista na Figura 1.3.

Fig. 1.3 - Jato com evaporação completa e formação de onda de choque (Chaves e outros, 1992).

O método de interferometria (usado por Chaves e outros, 1992) revelou imagens que destacaram principalmente a estrutura das ondas de choque, enquanto que, o método "shadowgraph" (também Chaves 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 Rietz (1990), o tempo de exposição da fotografia é fundamental para tirar conclusões sobre a estrutura dos jatos evaporativos e, devido a isso, ele contesta as conclusões de Oza e Sinnamon (1983) que oferecem imagens nebulosas do jato evaporativo. Rietz comparou fotografias de jatos evaporativos de água com intervalos de exposição de $1/250\ \text{s}$ (Figura 1.4a) e $20\ \text{ns}$ de exposição (Figura 1.4b). As condições de ensaio são as mesmas porém, o caso "b", oferece uma melhor clareza, sendo possível observar um núcleo líquido e o desprendimento de gotículas, enquanto que, o primeiro caso oferece uma imagem nebulosa. 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, enquanto que, o segundo caso podem-se observar imagens bem definidas que melhor registram os fenômenos evaporativos. Rietz, Athans e Hirs (1995) e Athans (1995) usaram o método de visualização de iluminação lateral do evento, conhecido na literatura inglesa de "side-lighting", onde a fonte de luz incide na lateral e perpendicularmente ao eixo de visualização

do jato, e com o método de iluminação por detrás do evento do jato em relação ao observador ("back-lighting"), ambos realizaram seus experimentos. Athans e Hirsra também acrescentaram o método de "laser sheet" que nada mais é que o método de iluminação lateral com o feixe em formato de lâmina que corta a seção do jato paralela ao eixo do mesmo. Seus experimentos tinham um intervalo de exposição de $0,65\ \mu\text{s}$ para o método de iluminação por detrás do jato e de $5\ \text{ns}$ para os métodos de iluminação lateral e por lâmina de "laser".

Chaves e outros (1992) e Simões Moreira (1994 e 1999) empregaram a teoria das ondas de evaporação para explicar o efeito peculiar de evaporação na superfície do jato observado por alguns autores (Rietz, 1990, Chaves e outros, 1992, Peter e outros, 1994, Athans e Hirsra, 1995).

Fig. 1.4 - Fotografia com (a) tempo de exposição de $1/250\ \text{s}$ com iluminação lateral e, (b) tempo de $20\ \text{ns}$ com iluminação por detrás do jato, Rietz (1990).

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de uma bancada experimental onde se possa observar o comportamento destes jatos evaporativos. Os registros fotográficos ocorrem com um tempo de exposição de 250 μ s e se utiliza do método "schlieren" que além de iluminar por detrás do jato, permite que se registrem os gradientes de densidade em torno do jato. Substâncias como o n-dodecano, o óleo diesel e o querosene foram utilizados como fluidos de teste, onde 80% dos ensaios destes ensaios são com querosene e com isso fornecer os possíveis perfis de jatos evaporativos.

1.2. Objetivo

Este trabalho tem o objetivo de apresentar o desenvolvimento de uma bancada experimental onde se pode observar e registrar o comportamento destes jatos evaporativos. O experimento deve consistir na injeção do líquido de teste em uma câmara de baixa pressão controlada. Também devem ser controladas as condições de pressão e temperatura de injeção. A estabilidade de todas estas propriedades contribuirão para que o ensaio seja em regime permanente, embora realizado no curto intervalo de tempo de, aproximadamente, um segundo. A vazão volumétrica da injeção também é medida no experimento. O método para a visualização do escoamento do jato é o "schlieren" o qual oferece a oportunidade de visualizar o gradiente de densidade do fluido na região do escoamento. No entanto, o jato é expandido em uma câmara cujo o ambiente é bastante rarefeito, ou seja, uma pressão da ordem de 5 mbar, sendo assim, será um desafio alcançar sensibilidade tal para registrar o gradiente de densidade no escoamento já que o método depende da variação do índice de refração que é diretamente proporcional à densidade do fluido. Com isso, poder-se-á visualizar a estrutura do jato e, com o auxílio de ferramentas de filtragem matemática e manipulação das imagens obtidas, será possível analisar o jato de forma qualitativa. Espera-se visualizar dentro dos diversos tipos de escoamentos, que dependem do grau de superaquecimento do líquido, fenômenos como ondas de evaporação e ondas de choque.

1.3. Divisão da dissertação

O presente capítulo de introdução apresenta o problema e a revisão bibliográfica, colocando o problema em perspectiva. No Capítulo 2, faz-se uma revisão sobre a análise qualitativa dos jatos evaporativos, o comportamento dos líquidos (substâncias SCME) e a influência do grau de superaquecimento dos mesmos, e o fenômeno de ondas de evaporação envolvido nestes jatos. O Capítulo 3 oferece uma descrição de todo o arranjo experimental. O capítulo seguinte realiza uma análise qualitativa dos resultados obtidos dos jatos sendo publicadas todas as fotografias dos ensaios. O Capítulo 5 descreve as possibilidades de continuidade deste trabalho e as conclusões tiradas do mesmo. E, finalizando esta parte, o Capítulo 6 que cita as referências bibliográficas deste trabalho.

Em seguida, estão os apêndices. No primeiro apêndice são apresentados os principais tópicos no desenvolvimento do projeto óptico. No Apêndice II está escrito o código do programa utilizado para o processamento matemático das imagens. No Apêndice III, é descrito o processo de calibração e análise de incerteza utilizada. As propriedades termodinâmicas das substâncias mencionadas estão no Apêndice IV. Alguns desenhos e esquemas do projeto foram expostos no Apêndice V. E, por último, o Apêndice VI apresenta o roteiro para a realização do ensaio.

2. TEORIA

2.1. *Os fluidos*

De todos os testes, 80 % dos ensaios foram realizados com querosene. O restante foi realizado com n-dodecano e óleo diesel. Utilizou-se o querosene para simular o comportamento do n-dodecano que é uma substância de custo alto (aproximadamente US\$ 30,00 para cada 100 ml, sem as taxas de importação), da mesma maneira que feita com as substâncias puras como o indolene e ou iso-octano para simular a gasolina. As cadeias carbônicas do querosene variam entre 6 a 18 átomos de carbono e o composto possui uma viscosidade cinemática e massa específica à 20 °C de 2,2 cSt e 775 kg/m³, respectivamente, enquanto que, o n-dodecano tem uma fórmula igual a C₁₂H₂₆ e possui valores de 2,1 cSt e 758 kg/m³ na mesma temperatura.

O n-dodecano possui um alto valor de calor específico e, com isto, seu comportamento diferencia-se das substâncias simples comuns, como a água, como é mostrado na Figura 2.1. Pode-se notar que a curva de saturação de vapor é inclinada para a direita, dando uma característica que muitas vezes é chamada na literatura inglesa de comportamento “retrograde”, e aqui é chamada de SCME - Substâncias de Complexidade Molecular Elevada. Este termo também pode ser utilizado pelo fato destes fluidos apresentarem um elevado número de átomos em suas moléculas. Hidrocarbonetos com o número de átomos de carbono maior ou igual a oito possuem esta característica (Thompson e Sullivan, 1975). Como o querosene possui em média mais de 90% de seus componentes com essa cadeia carbônica, ele possui o comportamento aproximado de um fluido SCME,

assim como o óleo diesel. Um parâmetro que caracteriza estas substâncias é o adimensional do calor específico $\tilde{c}_v$ que é a razão de $c_v/\bar{R}$ onde o 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. Observando a Figura 2.1, 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, a princípio, sofrer esta completa evaporação de forma adiabática.

Fig. 2.1 – Diagrama T - s de uma substância SCME (n-dodecano) e uma substância simples (água).

2.2. *Líquido superaquecido*

Pelo equilíbrio termodinâmico estável em uma interface líquido-vapor plana, uma substância pura alcançando a linha de saturação iniciaria uma 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 líquido. Desta forma, diz-se que o fluido se encontra em um estado metaestável, também chamado de estado de líquido superaquecido. Tal comportamento ocorre em sistemas simples devido a ausência de forças externas ou efeitos de superfície. O estado metaestável pode ser alcançado por vários processos. O processo isobárico onde o líquido superaquecido sofreu um aumento de temperatura à uma pressão constante. No processo isotérmico um decréscimo de pressão é realizado mantendo a sua temperatura constante. Logo, para o processo adiabático reversível, existe um decréscimo de temperatura onde a sua entropia se mantém constante. A quantificação do superaquecimento do líquido foi avaliada por pela razão da pressão metaestável (P) pela pressão de saturação (P_{sat}) em um processo isoentrópico, e é definido como grau de superaquecimento (H), assim,

$$H = \frac{P_{sat}}{P}. \quad (2.1)$$

Existe um limite de superaquecimento a partir do qual o líquido torna-se mecanicamente instável e é forçado a mudar de fase. Este limite é dado por

$$\left. \frac{\partial P}{\partial v} \right|_T = 0. \quad (2.2)$$

Da mesma forma, o fluido no estado de vapor também pode assumir metaestabilidade, e é chamado de vapor subresfriado. O conjunto dos pontos que consistem no limite de superaquecimento das várias isotérmicas formam a curva espinodal. A Figura 2.2 ilustra um diagrama temperatura-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 que, a região esquerda associada ao superaquecimento de líquido e a direita ao subresfriamento do vapor.

Simões Moreira (1994) levantou as curvas de saturação e espinodal do n-dodecano e está ilustrado na Figura 2.3. As curvas espinodais foram determinadas pela equação de Lee-Kesler, mencionada em seu trabalho. A temperatura correspondente a pressão metaestável nula (vácuo) vale 353 °C, nas suas estimativas.

Para segurança de que também não haja nucleação homogênea, a máxima temperatura é determinada usando a seguinte regra prática conhecida na literatura: a temperatura não deve ultrapassar 90% da temperatura crítica (Skrípov, 1974), assim, a temperatura máxima é de 319 °C. Os presentes ensaios com n-dodecano não ultrapassarão 300 °C.

Fig. 2.2 – Representação da região metaestável de um fluido em diagrama temperatura - volume específico.

Fig. 2.3 – Gráfico da curva de saturação e espínodal do n-dodecano (Simões Moreira, 1994).

2.3. Ondas de evaporação

Na modelagem das ondas de evaporação, é assumido o mesmo procedimento que é utilizado na formulação de escoamentos descontínuos com reações químicas (isto é, combustão e detonação). Especialmente em propagação de chamas, como as ondas de deflagração (Thompson, 1988).

Imaginando uma onda de evaporação estacionária que tem a sua montante (índice “1”) um líquido metaestável e que, após 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 volume de controle unidimensional da Figura 2.4, são:

$$[J] = 0 \quad (2.3)$$

$$\left[P + \frac{W^2}{v}\right] = 0 \quad (2.4)$$

$$\left[h + \frac{1}{2}W^2\right] = 0 \quad (2.5)$$

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 o estado final e o inicial da grandeza inclusa, isto é, $[f] = f_2 - f_1$.

Fig. 2.4 – Volume de controle englobando uma onda de evaporação.

Para o cálculo de tal modelo, são necessárias as seguintes premissas:

- o volume de controle acompanha a onda de evaporação;
- a onda de evaporação fica na posição normal ao escoamento;
- o fenômeno alcançaria o regime permanente.

Combinando as equações (2.3), (2.4) e (2.5), pode-se obter as equações clássicas de Rankine-Hugoniot (Equação 2.6) e Rayleigh (Equação 2.7).

$$[h] = \frac{-1}{2}(v_1 + v_2)[P] \quad (2.6)$$

$$-J^2 = \frac{[P]}{[v]} \quad (2.7)$$

A representação da curva de Rankine-Hugoniot a partir de um estado (1) metaestável é a curva contínua da Figura 2.5, 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 , ilustrado na Figura 2.5. 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 a solução é chamada de condição de Chapman-Jouguet (ou simplesmente, C-J), 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-J.

Fig. 2.5 – Representação das curvas de Rankine-Hugoniot e de Rayleigh em uma evaporação.

2.4. *Análise qualitativa de um jato evaporativo*

Peter e outros (1994) realizaram ensaios com água. A classificação visual dos jatos foi feita conforme o grau de superaquecimento dos mesmos. Jatos contínuos, do tipo 1, conforme ilustrado na Figura 2.6, possuem o filete de líquido sem interrupção do mesmo e são jatos com pequenos graus de superaquecimento. Com o aumento do superaquecimento, o jato possui um espalhamento das gotículas e uma extensão do núcleo líquido (Figura 2.6, tipo 2), cuja a distância diminuía com o acréscimo do superaquecimento (tipo 3). Altos graus de superaquecimento tornavam um perfil de jato com uma pulverização completa na saída do bocal.

Fig. 2.6 - Perfis de jatos (Peter e outros, 1994).

Fig. 2.7 - Jatos de diferentes tipos dependentes do grau de superaquecimento (Chaves e outros, 1992).

Outro trabalho que também estuda estes tipos de jato, e que mais se aproxima com o fenômeno aqui pesquisado, é o de Chaves e outros (1992). As diversas configurações de jato foram constatadas em função do grau de superaquecimento $H = P_{sat}(T_0)/P_{\infty}$, onde

P_{sat} é a pressão do vapor para a respectiva temperatura inicial T_0 e pressão da câmara P_∞ ou P_e . Eles utilizaram, como fluido-teste, C_6F_{14} que é considerado um SCME (seus valores críticos são $T_c=178$ °C, $P_c=1,87$ MPa $v_c=1,58$ l/kg e $\tilde{C}_v=39,3$). 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 é feita em uma câmara de vácuo. A documentação fotográfica foi feita pelos métodos de “shadowgraph” e interferometria, sendo este utilizado para conseguir observar ondas de choque obtidas pelo alto grau de metaestabilidade. Como primeiro quadro, Figura 2.7a, tem-se um jato de líquido subresfriado, ou seja, $H < 1$. Com o incremento da temperatura inicial ou diminuição da pressão final tem como consequência o superaquecimento ($H > 1$), assim, segue-se na ilustração um superaquecimento que demonstra o início pontos de nucleação heterogênea de evaporação. Mais um acréscimo deste superaquecimento, e o número de nucleações aumenta, quebrando totalmente o perfil retilíneo do jato (Figura 2.7b). Quando aumenta-se ainda mais o superaquecimento, consegue-se chegar a condição sônica na expansão do fluido evaporado, tendo como consequência uma mudança radical na estrutura do jato (Figuras 2.7c e seguintes). Neste fenômeno, visualiza-se um núcleo líquido circundado por uma região supersônica terminada em um choque de forma elipsóide e estacionária e está exemplificado na Figura 2.7d. A Figura 2.7e mostra o núcleo líquido do jato. E na Figura 2.7f é mostrada uma evaporação com altíssimo superaquecimento. Os autores constataram uma correlação existente entre o diâmetro normalizado (ou seja, a razão entre a distância axial da onda de choque, X_M , pelo diâmetro do bocal, D_b), com as razões de pressão, ilustrado na Figura 2.8.

Nas Figuras 2.9 (a - f), estão destacados alguns casos singulares ilustrados onde ocorre a formação de ondas de choque. No primeiro caso, a temperatura inicial é tão baixa que o comportamento SCME não alcança a evaporação completa. Melhor ilustrada está o quadro b que mostra uma fotografia tirada pelo método “shadowgraph” onde a imagem mais escura representa as gotículas. Eles concluíram que as gotículas ao se destacarem do núcleo líquido, são resfriadas pela evaporação durante a expansão e, no choque axial ao jato, passam sem quase sofrer perturbação devido a inércia. Além disso, o artigo relata que as gotículas durante esta expansão, aumentam em até 100 vezes o seu tamanho.

Fig. 2.8 - Relação da distância normalizada (X_M / D_b) em função da razão de pressões (P_0 / P_e), encontrada por Chaves e outros (1992).

Fig. 2.9 – Outros exemplos de jatos superaquecidos (Chaves e outros, 1992).

A seguir, os dois quadros, c e d, representam o mesmo jato, sendo o primeiro obtido pelo método de interferometria e o segundo por “shadowgraph” e, demonstram a onda de choque e a evaporação completa da nuvem. A Figura 2.9e ilustra uma onda de choque elipsóide, enquanto que ao seu lado, a onda de choque possui um perfil mais esferóide devido ao elevado grau de superaquecimento dando consequência a nucleação ocorrida à

montante do bocal. Isto conduz a uma completa bloqueagem na saída do bocal. Esta bloqueagem ocorre quando a temperatura excede a temperatura de nucleação homogênea.

Analisando este último gráfico, Figura 2.10, pode-se tirar evidências de que houve uma nucleação homogênea, pois a vazão prevista pelo cálculo é bem maior que o dado experimental. A evidência aumenta quando a temperatura é maior que a temperatura máxima de nucleação homogênea (130°C). Os valores teóricos de vazão são obtidos pela teoria clássica de incompressíveis e, pelo modelo de cálculo proposto pelos autores.

Fig. 2.10 - Medições do fluxo mássico : -----, cálculo para incompressível (Bernoulli); _____, modelo de cálculo; *, resultados experimentais. $P_0 = 15$ bar e $P_e = 10$ mbar (Chaves e outros, 1992).

3. ARRANJO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Um arranjo experimental foi construído para testar os jatos evaporativos. Uma das condições importantes do arranjo era que o tempo de injeção fosse pequeno para se evitar o uso exagerado de fluido de teste, devido o seu elevado custo (no caso, o n-dodecano). Com isso, todo o experimento e a instrumentação foram dimensionados para que o regime permanente ocorresse muito rapidamente, na ordem de 1 s. Dessa forma, optou-se pelo arranjo experimental descrito neste trabalho e esquematizado na Figura 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 Figura 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 Figura 3.1. Durante a injeção são feitas medições da pressão e temperatura do fluido à montante do jato, junto ao bocal de injeção a fim de comprovar 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, tem-se o sistema óptico que é baseado no método “schliren”. Fotografias da bancada, de acessórios e das instalações podem ser vistas nas Figuras 3.2 e 3.3. Nas próximas seções cada um dos conjuntos do esquema da Figura 3.1 será discutido de forma pormenorizada.

Fig. 3.1 - Esquema Geral do Aparato Experimental

Fig. 3.2 - Foto do reservatório, duto com visores, mesas ópticas com suportes, lentes, espelhos parabólicos e filtro espacial.

Fig.3.3 - Foto 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

Esse sistema é responsável pelo controle e manutenção da pressão do ambiente onde o jato será expandido. Ele consiste de um reservatório e a seção de observação, cujo volume total é de aproximadamente 440 litros. Estimativas indicaram que esse volume é suficiente para proporcionar uma segurança de até dois jatos de testes, de volume de 3 cm³ de n-dodecano líquido, sem que pressão da câmara aumente demasiadamente.

Na operação deste sistema, deve-se despressurizar a câmara até que o vácuo alcance uma pressão absoluta de 0,1 mbar. 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 a obtenção de vácuo, o laboratório dispõe de uma bomba de vácuo de 18 m³/h de fabricação da Edwards, modelo E1M18. Isto dá uma capacidade de alcançar 10 mbar em cerca de 10 minutos, para o volume total do arranjo. O esquema da linha de vácuo está na Figura 3.4. Instalou-se antes da bomba um condensador de vapores (também conhecido como “dedo frio” ou “vacuum trap”), como ilustrado na Figura 3.5. A Figura 3.6 é uma fotografia do equipamento. 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. O nitrogênio líquido é usado para condensar os vapores.

Fig. 3.4 - Esquema do sistema de vácuo.

Fig. 3.5 - Desenho do condensador de vapores.

Fig. 3.6 - Foto do condensador de vapores.

Na linha de vácuo, a medição de pressão é feita por um mano-vacuômetro de coluna de mercúrio, que a abrange uma faixa de 220 kPa até 2500 Pa (equivalente a 2,2 até 0,025 bar ou, 1650 até 18,75 mmHg) absoluto e, na faixa de 2500 Pa a 50 Pa (ou 25 a 1 mbar), um vacuômetro analógico de precisão da Edwards, modelo CGK-16. As precisões destes equipamentos são de 94 Pa e 54 Pa (equivalente a 0,940 mbar e 0,540 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 menos que 1 Pa). Nesta faixa menor de pressão, a coluna de mercúrio é desconectada da linha de vácuo e pressurizada com a pressão atmosférica por uma válvula de três vias.

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

3.2. Sistema de aquecimento

Este sistema tem o objetivo de aquecer o líquido de teste a uma temperatura desejada de injeção. A faixa de temperatura, que pode ser ensaiada situa-se entre 20 a 300 °C. Esquematizado na Figura 3.7, o óleo é aquecido por uma resistência elétrica sendo em seguida dirigido para aquecer o conjunto de injeção.

Fig. 3.7 - Esquema do sistema de aquecimento.

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 sequência, 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.

3.3. Sistema de injeção

Compete a este sistema injetar o líquido de teste a uma pressão constante de injeção e em tempo determinado. A injeção não se estenderá a um intervalo superior à 1 segundo. Nesse intervalo deve-se garantir que as vazões transitórias entre a abertura e o fechamento do bocal sejam desprezíveis, já que deseja-se estudá-lo em condições de regime permanente.

Fig. 3.8 - Esquema da linha de injeção.

Neste sistema, ilustrado na Figura 3.8, estão contidas: (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 está contido e, (3) o cilindro pneumático de acionamento da injeção. A regularidade do sinal de pressão de injeção pode ser vista mais adiante na Seção 3.5, Figura 3.16.

No corpo de injetor, ilustrado na Figura 3.9, existem duas câmaras. A câmara central contém o líquido de teste. A segunda câmara é anular e por ela 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 ao 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. O bocal de injeção é do tipo cônico e convergente, feito de aço-carbono, com o perfil interno do canal usinado por eletroerosão. Um desenho esquemático do bocal encontra-se na Figura 3.10. 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.

Quanto ao esquema de funcionamento da injeção tem-se o cilindro de gás nitrogênio e o reservatório de expansão (Figura 3.8), com capacidade de cinco litros, responsáveis pela manutenção da pressão constante durante a injeção do jato. Em série com esses equipamentos está a pipeta graduada que indicará 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 isoentrópico) 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. Um transdutor de pressão, da marca Kulite, modelo XTE-190-100-A e com faixa de 0 a 700 kPa, é fixado na linha de injeção para descrever o comportamento durante o ensaio.

Fig. 3.9 - Desenho do corpo de injeção.

Fig. 3.10 - Desenho dos bocais.

3.4. Sistema óptico

O método "schlieren" consiste de um feixe luminoso paralelo que atravessa a região do fenômeno e depois é focalizado sobre um "pin-hole" (ou filtro espacial). Se um raio de luz sofrer um desvio considerável devido às variações de densidade do meio, este será refletido e não atravessará o "pin-hole" e, portanto, não será projetado sobre o filme ou anteparo. O raio de luz que atravessa uma região com uma variação de densidade desprezível é focalizado sobre o "pin-hole" e consegue atingir o filme. Assim as regiões onde o gradiente de densidade é elevado aparecem na imagem do filme como sombras. Isso caracteriza a intensidade luminosa na imagem como sendo inversamente proporcional ao gradiente da densidade.

Esse tradicional método foi empregado no presente trabalho para visualizar a onda de choque, entre outros fenômenos, que pode estar presente na evaporação de líquidos

altamente superaquecidos. Com estas imagens pretende-se medir as dimensões da região da onda de choque. A geometria óptica está mostrada na Figura 3.11. Na seqüência, as Figuras 3.12 e 3.13, são fotografias das mesas ópticas com os equipamentos ópticos.

Vê-se que no esquema da Figura 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, também chamado de faca, ou "pin-hole". Isso faz com que a fonte luminosa tome um caráter pontual, sendo que, o diâmetro do "pin-hole" é de 0,28 mm. Assim como na lente, a posição do "pin-hole" coincide com a distância focal do espelho parabólico, fazendo com que o feixe expandido após o "pin-hole", percorra através da seção do evento, de forma paralela. O segundo espelho recebe o feixe paralelo e focaliza-o no outro "pin-hole" com diâmetro de 0,42 mm.

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

Fig. 3.11 - Geometria do aparato óptico.

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

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

Basicamente, no aparato, utiliza-se uma lâmpada halógena de 40 W, cuja a 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.

3.5. Sistema de aquisição de dados

Existe um computador 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. As tomadas de dados serão feitas na medição de temperatura do líquido no corpo de injeção por um termopar do tipo “T”, pressão da linha por um transdutor de pressão, marca Kulite, modelo XTE-190-100-A e, posicionamento da haste do cilindro pneumático através de um sensor óptico. Para amplificar os dados, utiliza-se um módulo de 8 canais, modelo MSC-1000-V2-8.

Outro computador, com uma placa de aquisição de imagens, gerencia a aquisição das imagens do jato. Este recebe o sinal de saída de expansão, canal "1" do computador gerenciador para capturar as imagens do jato. O outro sinal de expansão, canal "0" do computador gerenciador, é responsável pelo acionamento da injeção. A imagem é obtida por uma câmara CCD, monocromática, com tamanho de sensor de 1/2 polegada, da marca Costar, modelo CV-M50. A placa de processamento de imagens é da Data Translation, modelo DT-3152, sendo utilizada as bibliotecas do "Frame Grabber - SDK", da Data Translation, para acioná-la. Na Figura 3.14, está esquematizado o sistema.

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

Fig. 3.15 - Esquema dos sinais de saída. A linha tracejada (---) corresponde ao sinal do acionamento do injetor e a linha contínua (___) corresponde ao sinal de disparo para as imagens.

O computador "1", conforme a Figura 3.14, monitora a temperatura do fluido de teste e a linha da pressão de injeção. Quando tais propriedades são alcançadas para o ensaio, via teclado, o sistema de aquisição de dados é acionado. Os dados de pressão,

temperatura e posição da haste já estão sendo coletados. Após 0,20 s, tira-se uma fotografia da seção sem o disparo efetivo do jato, cuja a imagem será a nossa referência para posterior tratamento da imagem, o que permite que se obtenham de imagens mais limpas do jato, cujo processamento matemático será visto mais adiante, Seção 3.6. 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, obtidas durante o jato. A Figura 3.15 mostra a carta de tempo do sinal do canal "1" e também, exibe o gráfico do canal "0" que aciona o injetor durante o intervalo de 5 V do sinal. Este canal ao mesmo tempo que energiza um relê de estado sólido, também aciona a válvula solenóide para o acionamento do cilindro pneumático, que movimenta a haste que dá aberturas ao bocal de injeção. No intervalo de 0,20 s, após o início do ensaio, ele é disparado mas existe 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, ela fica em torno de 0,75 s, pois a defasagem entre o sinal e o fechamento da injeção é de 0,04 s, aproximadamente.

Fig. 3.16 - Comportamento dos sinais vistos lado a lado.

Para mostrar como se comportam os dados durante o ensaio, seguem os gráficos de tempo da Figura 3.16. No mesmo gráfico são ilustrados o sinal referente 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, assim, 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. Isso ocorre devido aos dentes solidários à haste que proporcionam o fechamento e abertura do caminho óptico do sensor. Tomando o sinal do sensor, verifica-se que a rampa é bastante inclinada no disparo da injeção. Isso acontece devido a inércia da

energização do sensor e também pelo fato que a força para a abertura do injetor é menor que a força de fechamento no cilindro pneumático. No entanto, a medição do tempo da abertura é tomada pelo golpe da pressão, assim como, no fechamento. Ensaios com duração de 5,0 s, cujo o tempo de defasagem entre o início de deslocamento da haste e o golpe da pressão são insignificantes, comprovaram tal procedimento.

3.6. *Processamento matemático das imagens*

Existe uma primeira imagem que é obtida com a câmara de CCD, no instante de 0,20 s, antes da injeção. As seguintes, em intervalos de 0,20 s, são tiradas 4 quadros durante a injeção. Entre estas cinco fotografias, apenas uma, com melhor nitidez, é selecionada para análise. No exemplo a seguir, têm-se duas fotografias, onde a primeira, Figura 3.17, foi realizada antes do jato e a outra, na Figura 3.18, durante a injeção.

Fig. 3.17 - Fotografia antes do jato.

Fig. 3.18 - Foto durante o jato.

Para filtrar a imagem, destacando desta forma a imagem do jato, a segunda imagem é subtraída da primeira imagem. O filtro subtrativo opera com a divisão do valor numérico de cada "pixel" (ponto de menor resolução da imagem, sendo que, todas as imagens são obtidas com uma resolução de 640 x 480 "pixels") da imagem com o jato pelo "pixel" de mesma coordenada existente na primeira imagem, 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, onde esta operação, especificamente, se encontra no arquivo "calcfilt.m" (Guimarães, 1999). A divisão entre os valores dos "pixels" é feita no filtro subtrativo porque estão em escala logarítmica e a câmara CCD tem sensibilidade linear. Na Figura 3.19 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". Elas aparecem

devido a um defeito que ocorreu no sensor CCD da câmara e com o processamento matemático foi possível subtraí-los da imagem.

Fig. 3.19 - Imagem filtrada (mapa de cores "gray").

Mesmo assim, devido a vibrações das mesas óptica e do injetor, ocorrem alguns ruídos de grande amplitude nas regiões que circundam o injetor e a janela, depois que houve a subtração das imagens. Desta forma para destacar ainda mais o jato, muda-se a paleta de cores da imagem. Tanto a filtragem como a mudança de paleta de cores foram feitas em um programa desenvolvido no Matlab (Apêndice II), sendo as diversas paletas ou mapa de cores ferramentas "toolbox" do próprio Matlab (Guimarães, 1999).

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 3.1 - Exemplo imaginário 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 (5 até 85)	tons de vermelho (86 até 170)	tons de amarelo (171 até 250)	branco (251 até 255)

É ilustrada na Tabela 3.1, 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 Figura 3.20, 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 ou um mapa de cores oferece melhor nitidez. Neste exemplo foi a imagem com o mapa "hsv" que melhor destacou 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, assim poder-se-á representar este procedimento na Tabela 3.2.

Fig. 3.20 - Foto do jato no mapa de cores "hsv".

Tabela 3.2 - Outro exemplo imaginário 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 5 até 75			tons de vermelho 76 até 175			tons de amarelo 176 até 250			branco 251 até 255
preto 0 até 4	R 4-25	G 26-50	B 51-75	R 76-109	G 110-140	B 141-175	R 176-200	G 201-225	B 226-250	branco 251 até 255

* Onde, "R" significa tons de vermelho , "G", tons de verde e "B", tons de azul.

Exemplificando isto, a Figura 3.21, mostra uma imagem com o mapa de cores "prism" que, se comparado a imagem anterior, Figura 3.20, enfocando a região do escoamento dos gases após a onda de choque, vê se uma cor em tom amarelo escuro, que no mapa "prism", nos oferece uma boa noção do gradiente de densidade e escoamento nesta região. Muitas vezes, quando a variação do gradiente de tonalidades é grande em

determinadas regiões da imagem, mapas de cores como o "prism", "flag", "arcir" e "rand" não oferecem nitidez na imagem.

Fig. 3.21 - Foto do jato no mapa de cores "prism".

A seguir, na Tabela 3.3, estão representados todos os mapas de cores que são utilizados neste trabalho.

Tabela 3.3 - Tonalidade dos mapas de cores do Matlab.

"gray"	0- - 255
"bone"
"copper"
"pink"
"hot"
"hsv"
"cool"
"jet"
"prism"
"flag"
"arcir"
"rand"

3.7. *Procedimento do ensaio*

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

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

Antes do ensaio, os computadores devem estar preparados com os programas de gerenciamento de dados (Aqdados, da empresa Lynx) e de aquisição de imagens (Acq2hst).

Sabendo que, as pressões de injeção e da câmara de vácuo constam nos valores desejados e a temperatura do fluido foi alcançada, falta apenas anotar o nível inicial do

volume do fluído. Em seguida, acionar-se-á o ensaio propriamente dito pelo computador principal, que adquire os dados de pressão, temperatura de injeção, posição da haste, assim como, enviará os comandos de disparo do injetor e de aquisição de imagens. Para tanto, o segundo computador recebe o sinal do computador principal e armazena as imagens. Após o ensaio efetivo, registra-se o nível total injetado do líquido, e também, carrega-se os dados obtidos em arquivos.

Dos dados de pressão analisam-se a média, o desvio padrão e o perfil do gráfico. Extraí-se também o tempo inicial e o tempo final de injeção, como visto na Seção 3.5. Dos dados de temperatura apenas é tirada a temperatura média porque o desvio padrão é da ordem de 0,20 °C.

O formulário da lista de procedimento do ensaio se encontra no Apêndice VI.

3.8. *Análise de incerteza das medições*

A seguir, estão expostas na Tabela 3.4 as medições e estimativas que são executadas, neste experimento, com os respectivos intervalos e incertezas associadas as mesmas. O procedimento e cálculo de tais incertezas se encontram no Apêndice III.

Tabela 3.4 - Incertezas relativas as medições realizadas.

Medições	Faixa	Incerteza
Pressão da câmara de vácuo	0 a 2500 Pa	54 Pa
Pressão de injeção	0 a 700 kPa	2,1 kPa
Temperatura de injeção	0 a 320 °C	1,7 °C
Vazão experimental	0 a 3,5 ml	2,6 %
Vazão teórica	0 a 3,5 ml	4,5 %

4. RESULTADOS E ANÁLISES

4.1. *Parâmetros e condições de ensaio*

4.1.1. Características da imagem do jato

Quando um feixe de luz colimado passa por um meio de densidade variável há um desvio da luz. No presente caso, a luz que atravessa a região de exaustão do jato encontra um meio líquido e regiões de mistura bifásica que oferecem um grande desvio da luz em consequência ao acentuado diferencial de densidade. Esses desvios são registrados como pontos ou regiões escuras na imagem capturada. Para exemplificar tal fenômeno, tem-se na Figura 4.1 a fotografia de um ensaio de injeção de querosene, o qual não sofreu evaporação. Este líquido é translúcido e nesta figura dá a impressão de ser opaco, pois toda a luz que traspassou a coluna de líquido foi bloqueada no filtro espacial por causa do desvio do caminho óptico.

Fig. 4.1 - Fotografia de um jato de querosene líquida sem evaporação.

Por outro lado, na expansão do jato evaporativo existe uma concentração maior da fase de vapor quando próximo do centro, e com o afastamento radial torna-se mais rarefeito. Isso pode claramente ser identificado nas fotografias da Figuras 4.2 e 4.3 nas quais é visível um núcleo líquido, identificado por uma região com uma tonalidade de cor bem definida, acompanhado por evaporação que é possível ser identificada pela variação da densidade devido a variação de tonalidade.

Observando estas imagens (Figura 4.2 e 4.3), assim como as imagens das Figuras 4.6, 4.7, 4.8 entre outras, e focalizando nestas imagens a região de interface entre o núcleo líquido e a região de expansão da mistura de vapor, pode-se tomar como hipótese de que esta interface seja uma onda de evaporação.

Fig. 4.2 - Jato de querosene inicialmente líquida com evaporação completa.

Fig. 4.3 - Imagem tratada da Figura 4.2.

4.1.2. Condições de ensaio

Basicamente, apenas dois parâmetros foram significativos nos resultados deste trabalho: a temperatura de injeção e a pressão de injeção. A condição de pressão do reservatório, que foi realizada na faixa de 10 a 2500 Pa, não foi muito eficiente para se determinar alguma alteração do comportamento do jato.

Praticamente quase todo o trabalho aqui realizado foi com querosene e, assim como o óleo diesel, são formados por uma mistura de hidrocarbonetos. As cadeias carbônicas do querosene variam entre 6 a 18 átomos de carbono e possui uma viscosidade cinemática e massa específica à 20 °C de 2,2 cSt e 775 kg/m³, respectivamente, enquanto que, a n-dodecano tem uma fórmula igual a C₁₂H₂₆, possui valores de 2,1 cSt e 758 kg/m³ na mesma temperatura. Além disso, elevadas frações de evaporação são obtidas com essas

substâncias, graças ao seu comportamento de SCME. Isso facilita a observação e registro da região evaporativa junto ao jato.

4.1.3. Resultados com jato de ar

Foram realizados três ensaios com jato de ar atmosférico utilizando um bocal de 0,70 mm. Conforme os resultados obtidos por Crist e outros (1966), a distância do disco de Mach (X_M) corresponderia a uma correlação empírica dada por

$$\frac{P_0}{P_\infty} \cong 2,4 \left(\frac{X_M}{D_b} \right)^2 \quad (4.1)$$

onde, D_b é o diâmetro da saída do bocal. Sendo assim, a Tabela 4.1 indica as pressões inicial (P_0) e da câmara de vácuo (P_∞), os valores estimados da distância do disco de Mach (X_M) através da equação e os obtidos experimentalmente, além do erro percentual relativo que ocorreu entre estes dois últimos dados. Todos esses ensaios tiveram uma temperatura inicial de $T_0 = 23,7^\circ\text{C}$.

Tabela 4.1 - Ensaio com jatos de ar

Ensaio	P_0 (kPa)	P_∞ (Pa)	X_M estimado (mm)	X_M obtido (mm)	% Erro
Jato de ar (n.º 62)	643	530	15,7	15,2	3,3
Jato de ar (n.º 63)	628	1070	10,7	10,9	3,8
Jato de ar (n.º 64)	622	1200	10,3	10,7	3,7

O ensaio (1) com ar pode ser visto nas Figuras 4.4 e 4.5. Neste experimento foi utilizado um filtro espacial de 0,40 mm antes da câmara CCD. O restante dos ensaios se encontram na Seção 4.3 sobre a documentação fotográfica.

Fig. 4.4 - Jato de ar com formação do disco de Mach. As condições são:

$$P_0 = 643 \text{ kPa}, T_0 = 23,7 \text{ }^{\circ}\text{C}, P_{\infty} = 530 \text{ Pa e } D_b = 0,70 \text{ mm}.$$

Fig. 4.5 - Imagem filtrada da Figura 4.4.

4.2. *Análise qualitativa dos resultados*

4.2.1. Tipos de jatos observados

Basicamente foram classificados quatro tipos de jatos:

4.2.1.1. *Jato contínuo*

Este jato não possui fragmentação da coluna de líquido e pode ser observado na fotografia da Figura 4.1 e, mais adiante, na seção 4.3 de documentação fotográfica.

4.2.1.2. *Jato pulverizante*

Nesta categoria, ocorre evaporação de líquido dando origem a uma componente de velocidade radial no escoamento. A seguir, é exemplificado este tipo de jato na Figura 4.6.

Fig. 4.6 - Jato de perfil pulverizante - imagem tratada do ensaio n.º 31
(Querosene à $P_0 = 615$ kPa, $T_0 = 95$ °C , $P_\infty = 1200$ Pa).

4.2.1.3. Jato com ondas de choque de formato elipsóide

O jato possui um pequeno núcleo líquido que evapora e expande com velocidade supersônica, finalizando em uma onda de choque. A Figura 4.7 mostra uma fotografia com a formação de uma onda de choque. Como é possível observar, a estrutura deste tipo de jato é muito semelhante ao que ocorre com os jatos de gases sub-expandidos.

4.2.1.3. Jato com ondas de choque de formato esferóide

É observada a formação de uma onda de choque de perfil esferóide quando o líquido possui altíssima temperatura, próxima do ponto crítico, como constatou Chaves e outros (1992) e pode ser vista na fotografia da Figura 4.8.

Fig. 4.7 - Jato de perfil elipsóide - imagem tratada do ensaio n.º 32
(Querosene à $P_0 = 650$ kPa, $T_0 = 220$ °C , $P_\infty = 10$ Pa).

Fig. 4.8 - Jato de perfil esferóide - imagem tratada do ensaio n.º 8
(Querosene à $P_0 = 500$ kPa, $T_0 = 265$ °C , $P_\infty = 400$ Pa).

4.2.2. Análise do comprimento da coluna de líquido em jatos pulverizantes

Na medida que a temperatura é aumentada, menor se torna o comprimento da coluna de líquido, como pode ser observado nos dados de comprimento da coluna de líquido (x) que figuram na Tabela 4.2. Esses mesmos dados são apresentados em forma de gráfico na Figura 4.10. A representação da dimensão x está esquematizada na Figura 4.10 e foi apenas medido nos jatos do tipo pulverizante, onde é mais significativo a observação deste parâmetro.

Fig. 4.9 - Gráfico do comprimento (x) do jato líquido em função da temperatura, dados referentes à Tabela 4.2 (Obs.: Na legenda consta a pressão de injeção do ensaio).

Tabela 4.2 - Dados dos jatos pulverizantes.

Ensaio	Data	Substância	T_0 (°C)	P_0 (kPa)	P_∞ (Pa)	x (mm)
42	17/06/99	querosene	85	500	1200	36,5
14	15/04/99	querosene	90	350	2100	34,9
56	22/07/99	querosene	91	501	600	56,8
50	29/06/99	querosene	94	700	2000	27,7
31	25/05/99	querosene	95	615	1200	33,3
16	15/04/99	querosene	96	350	2100	33,5
51	29/06/99	querosene	96	502	2000	27,2
52	29/09/99	querosene	96	301	2000	19,7
17	15/04/99	querosene	97	200	2100	21,9
15	15/04/99	querosene	100	350	2100	31,2
57	22/07/99	querosene	100	501	600	49,9
12	15/04/99	querosene	110	350	1500	30,9
13	15/04/99	querosene	110	350	2100	28,7
39	17/06/99	querosene	110	500	1200	19,0
35	16/06/99	querosene	120	500	1,500	20,7
36	16/06/99	querosene	120	500	1,500	20,7
37	16/06/99	querosene	120	500	1,500	20,3
38	16/06/99	querosene	168	443	1,500	12,6

Fig. 4.10 - Ilustração do comprimento da coluna de líquido.

4.2.3. Análise das ondas de choque formadas

Basicamente, não foi possível caracterizar o comportamento das dimensões da onda devido a pressão e temperatura de injeção, e pressão da câmara de vácuo, que também não mostrou uma correlação lógica, como pode ser visto nos gráficos das Figuras 4.11 e 4.12. Algo que parece ser substancial é o fato de que, quando aumenta-se a temperatura de injeção até 260 °C, tem-se um aumento do diâmetro da onda de choque (D_M) e também a sua distância (X_M), conforme é deduzido com a observação da concentração dos pontos nestes gráficos. Após 260 °C ocorrem ondas de choque com formato esferóide, tais como Chaves e outros (1992) encontraram com temperaturas de injeção próximos do ponto crítico. O esquema de tais dimensões pode ser vista na Figura 4.13. Tal dispersão pode ocorrer devido a variedade de substâncias do querosene e como o injetor fica na posição vertical fazendo com o líquido com menos massa específica e mais volátil tende a estar no

topo do injetor. Uma prova disto é que foi constatado apenas no ensaio n° 8, exposto na Seção 4.3. Inicialmente o jato tem uma onda de choque com perfil esferóide (ver Figura 4.8) com diâmetro (D_M) de 12,7 mm e distância (X_M) de 9,3 mm. Após a quarta fotografia, ou seja, aproximadamente, no instante 0,7 s após o início do jato, houve a deformação da onda de choque esferóide para uma de formato elipsóide, comprovando essa possibilidade.

Fig. 4.11 - Gráfico da distância da onda de choque em função da temperatura de injeção. Dados referentes à Tabela 4.3 (Obs.: Na legenda consta a pressão de injeção do ensaio. No caso do diesel, a pressão de injeção é de 500 kPa).

Tabela 4.3 - Informações dimensionais das ondas de formato elipsóide.

Ensaio	Data	Substância	T_0	P_0	P_∞	X_M	D_M
46	25/06/99	diesel	204	500	300	14,9	28,7
45	25/06/99	diesel	250	500	300	15,9	54,2
28	29/04/99	querosene	160	200	500	10,0	28,8
6	15/04/99	querosene	180	300	400	7,4	21,2
49	28/06/99	querosene	178	306	1200	5,1	13,2
61	22/07/99	querosene	202	310	600	11,5	41,2
29	29/04/99	querosene	150	400	500	11,3	27,4
9	15/04/99	querosene	190	400	300	7,0	25,7
22	19/04/99	querosene	250	460	500	18,4	41,0
23	19/04/99	querosene	260	460	500	16,4	30,1
40	17/06/99	querosene	155	500	1200	10,2	20,0
41	17/06/99	querosene	170	500	1200	8,7	22,3
34	16/06/99	querosene	200	500	1500	7,3	22,6
33	16/06/99	querosene	220	500	1500	8,3	22,8
48	28/06/99	querosene	229	500	1200	4,9	18,8
10	15/04/99	querosene	250	500	400	8,4	31,2
8	15/04/99	querosene	265	500	400	9,3	12,7
58	22/07/99	querosene	152	501	600	12,0	30,8
59	22/07/99	querosene	200	502	600	16,5	62,5
21	15/04/99	querosene	245	550	100	16,1	53,0
27	22/04/99	querosene	230	640	500	10,1	43,4
25	22/04/99	querosene	260	640	1000	18,4	49,6
32	27/05/99	querosene	220	650	10	19,2	65,0
26	22/04/99	querosene	245	650	1000	15,8	47,0
60	22/07/99	querosene	200	690	600	16,1	57,8
47	28/06/99	querosene	221	700	1200	5,8	22,6
43	17/06/99	querosene	260	700	1200	8,2	25,4
44	17/06/99	querosene	270	700	1200	9,2	11,7

Fig. 4.12 - Gráfico da diâmetro do disco de Mach em função da temperatura de injeção. Dados referentes à Tabela 4.3. (Obs.:Na legenda consta a pressão de injeção do ensaio. No caso do diesel, a pressão de injeção é de 500 kPa).

Fig. 4.13 - Dimensões medidas nas onda de choque.

4.2.4. Estágio de formação da onda de choque nos jatos pulverizantes

Os ensaios revelaram que a onda de choque tem o seu estágio de formação em jatos do tipo pulverizante. Como estudo de caso, destacou-se os ensaios de n.ºs 39 a 42, cujas

pressões de injeção e da câmara de vácuo eram constante com os valores de 500 kPa e 1200 Pa. Apenas é incrementada a temperatura de injeção e estão representados nas Figuras 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17 cujas as imagens são dos ensaios n.º 42, n.º 39, n.º 40 e n.º 43, respectivamente.

Fig. 4.14 - Jato com princípio de formação da onda de choque.
Condições: querosene à $P_0=500\text{kPa}$, $P_\infty=1200\text{ Pa}$ e $T_0=85^\circ\text{C}$.

Fig. 4.15 - Jato com princípio mais avançado de formação.
Condições: querosene à $P_0=500\text{kPa}$, $P_\infty=1200\text{ Pa}$ e $T_0=110^\circ\text{C}$.

Fig. 4.16 - Jato com onda de choque elipsóide, com a possibilidade de ainda muitas gotículas traspassarem a onda de choque.
Condições: querosene à $P_0=500\text{kPa}$, $P_\infty=1200\text{ Pa}$ e $T_0=155^\circ\text{C}$.

Fig. 4.17 - Jato com onda de choque elipsóide e evaporação total.
Condições: querosene à $P_0=500\text{kPa}$, $P_\infty=1200\text{ Pa}$ e $T_0=260^\circ\text{C}$.

4.2.5. Análise do ângulo de expansão dos jatos pulverizantes

Uma observação foi a análise do ângulo de expansão destes jatos, semelhante ao que ocorre com os jatos de gases sub-expandidos. Esta medição é feita conforme é mostrado na Figura 4.18 e possui uma precisão de 10° na medição do ângulo. Como estudo de caso, se analisará os ensaios n.º 12 ao 17. Estes ensaios foram realizados após uma outra sequência de 6 ensaios, todos no mesmo dia, e com o mesmo lote de querosene, dando um pouco de segurança da composição do querosene no caso em estudo. Também foi destacado esta série de ensaios porque nem todas as imagens de jatos pulverizantes constam com tal nitidez de informação, com a utilização da paleta de cores "prism". Na Tabela 4.4, é mostrado o ensaio com as respectivas condições de temperatura e pressões, e os ângulos máximo do escoamento do líquido evaporado.

Tabela 4.4 - Ângulos de expansão dos ensaios com querosene de n.º 12 a 17.

Ensaio 15/04/99	T_0 (°C)	P_0 (kPa)	P_∞ (Pa)	Ângulo
12	110	350	1500	120°
13	110	350	2100	60°
14	90	350	2100	40°
15	100	350	2100	60°
16	96	350	2100	80°
17	97	200	2100	70°

Fig. 4.18 - Esquema da medição do ângulo do jato evaporativo.

Observando a Tabela 4.4, pode-se concluir que o jato tem um ângulo maior de expansão quando existe um incremento da temperatura de injeção ou quando se diminui a pressão da câmara de vácuo.

4.2.6. Análise da Vazão

De um total de 64 ensaios, apenas 15 ensaios possuem valores experimentais da vazão com querosene. Foram realizados ensaios com pressões de injeção nos valores de 0,3 MPa, 0,5 MPa e 0,7 MPa, cujos respectivos gráficos estão nas Figuras 4.19, 4.20 e 4.21. O cálculo da vazão teórica foi feita através da equação de Bernoulli, Equação 4.2, onde era contabilizada o volume específico do líquido em função da temperatura, as pressões de injeção e da câmara de vácuo e, a área de saída do bocal. A Tabela 4.5 apresenta os valores obtidos nestes ensaios onde consta as colunas do ensaio, tipo de jato, data, temperatura de

injeção (T_0), pressão de injeção (P_0), pressão da câmara de vácuo (P_∞), volume específico do querosene (v_l), vazão experimental (Q_E), Vazão teórica (Q_T), erro percentual da vazão experimental em relação a vazão teórica ($\% Erro$). O coeficiente de descarga (C_D) é igual à 0,922 e o diâmetro do bocal (D_b) é de 0,3025 mm.

$$Q_T = C_D * \left(\frac{\pi \cdot D_b^2}{4} \right) * \sqrt{2 * v_l * (P_0 - P_\infty)} \quad (4.2)$$

Tabela 4.5 - Análise da vazão.

<i>Ensaio</i>	<i>Tipo de jato</i>	T_0	P_0	P_∞	v_l	Q_T	Q_E	$\% Erro$
53	contínuo	38	301	2000	0,00135	1,8635	1,9666	5,53
52	pulverizante	96	301	2000	0,00142	1,9066	2,014	5,64
49	com onda elipsóide	178	306	1200	0,00156	2,0194	1,7361	-14,03
61	com onda elipsóide	202	310	600	0,00162	2,0756	1,3685	-34,07
54	contínuo	38	498	2000	0,00135	2,4001	2,5000	4,16
56	pulverizante	91	501	600	0,00140	2,4548	2,4732	0,75
51	pulverizante	96	502	2000	0,00142	2,4651	2,5634	3,99
57	pulverizante	100	501	600	0,00143	2,4746	2,3161	-6,40
58	com onda elipsóide	152	501	600	0,00152	2,5538	2,3035	-9,80
59	com onda elipsóide	200	502	600	0,00162	2,638	2,216	-16,00
48	com onda elipsóide	229	500	1200	0,00171	2,7017	1,9161	-29,08
55	contínuo	36	700	1600	0,00135	2,8452	2,5143	-11,63
50	pulverizante	94	700	2000	0,00141	2,9088	3,0072	3,38
60	com onda elipsóide	200	690	600	0,00162	3,0908	2,5068	-18,90
47	com onda elipsóide	221	700	1200	0,00168	3,1763	2,4675	-22,31

Fig. 4.19 - Gráfico da vazão a uma pressão de injeção de 0,3 MPa.

Fig. 4.20 - Gráfico da vazão a uma pressão de injeção de 0,5 MPa.

Fig. 4.21 - Gráfico da vazão a uma pressão de injeção de 0,7 MPa.

De todos os ensaios, apenas o ensaio cuja a pressão de injeção de 0,7 MPa e 36°C não condisse com a vazão esperada, devido a um emperramento do acionamento da haste do injetor detectado no momento, pois foi nítida a observação da abertura da haste em dois estágios, contrário ao que ocorre de costume que é uma abertura rápida.

É possível verificar que acima da faixa de 150°C, aproximadamente, existe uma queda dos valores da vazão da injeção do querosene, justamente na faixa onde os jatos tem um perfil pulverizante. Duas hipótese podem ocorrer: (1) existe uma nucleação de vapor internamente ao bocal ou, (2) a onda de evaporação que ocorre no núcleo líquido do jato, externamente ao bocal, restringe a vazão. Em ambos os casos ocorre uma restrição da vazão se a condição de escoamento crítico for alcançada.

4.2.7. Tabela dos ensaios realizados

A seguir, são apresentadas todos os ensaios realizados nas Tabelas 4.6 e 4.7.

Na primeira, estão todos os ensaios envolvendo querosene, onde constam os dados relativos ao número do ensaio, tipo de jato, data realizada, condições iniciais de temperatura (T_0) e pressão (P_0), pressão da câmara de vácuo (P_∞), comprimento da coluna de líquido (x) em jatos pulverizantes ou distância da onda de choque (X_M) quando a evaporação for completa, diâmetro da onda de choque (D_M), volume específico do líquido (v_l), vazão teórica (Q_T), vazão experimental (Q_E) e o erro percentual relativo entre as vazões ($\%Erro$). Apenas alguns ensaios possuem dados de comparação da vazão porque não foi obtida a vazão experimental durante o ensaio do mesmo.

A outra tabela possui os dados dos ensaios onde se utilizou óleo diesel, n-dodecano, e jato de ar. Suas colunas constam os mesmos dados que a tabela anterior, apenas não são apresentados os dados referentes à medição de vazão como: volume específico do líquido (v_l), vazão teórica (Q_T), vazão experimental (Q_E) e o erro percentual relativo entre as vazões ($\%Erro$). Isto porque em nenhum destes ensaios foram coletados os valores da vazão experimental.

Todos os ensaios que possuírem os gráficos dos sinais coletados, constam com uma marca "x" nas tabelas.

Tabela 4.6 - Relação de ensaios com querosene.

<i>Ensaio</i>	<i>Tipo</i>	<i>Data</i>	<i>Substância</i>	T_0	P_0	P_∞	X	D_M	v_l	Q_T	Q_E	% Erro	<i>Gráfico</i>
55	Contínuo	29/06/99	querosene	36	700	1600			0,001351	2,9023	2,5143	13,369	
53	Contínuo	29/06/99	querosene	38	301	2000			0,001352	1,859	1,9666	-5,786	
54	Contínuo	29/06/99	querosene	38	498	2000			0,001352	2,4206	2,5000	-3,281	
11	Contínuo	15/04/99	querosene	60	300	2100			0,001360				
19	Contínuo	15/04/99	querosene	89	200	2100			0,001400				
18	Contínuo	15/04/99	querosene	93	200	2100			0,001409				
42	Pulverizante	17/06/99	querosene	85	500	1200	36,5		0,001391				
14	Pulverizante	15/04/99	querosene	90	350	2100	34,9		0,001402				
56	Pulverizante	22/07/99	querosene	91	501	600	56,8		0,001404	2,4767	2,4732	0,1422	X
50	Pulverizante	29/06/99	querosene	94	700	2000	27,7		0,001412	2,9662	3,0072	-1,382	
31	Pulverizante	25/05/99	querosene	95	615	1200	33,3		0,001414				
16	Pulverizante	15/04/99	querosene	96	350	2100	33,5		0,001416				
51	Pulverizante	29/06/99	querosene	96	502	2000	27,2		0,001417	2,4868	2,5634	-3,082	
52	Pulverizante	29/09/99	querosene	96	301	2000	19,7		0,001414	1,8995	2,014	-6,025	
17	Pulverizante	15/04/99	querosene	97	200	2100	21,9		0,001419				
15	Pulverizante	15/04/99	querosene	100	350	2100	31,2		0,001426				
57	Pulverizante	22/07/99	querosene	100	501	600	49,9		0,001427	2,4968	2,3161	7,2385	X
12	Pulverizante	15/04/99	querosene	110	350	1500	30,9		0,001451				
13	Pulverizante	15/04/99	querosene	110	350	2100	28,7		0,001451				
39	Pulverizante	17/06/99	querosene	110	500	1200	19,0		0,001451				
35	Pulverizante	16/06/99	querosene	120	500	1500	20,7		0,001473				
36	Pulverizante	16/06/99	querosene	120	500	1500	20,7		0,001473				
37	Pulverizante	16/06/99	querosene	120	500	1500	20,3		0,001473				
38	Pulverizante	16/06/99	querosene	168	443	1500	12,6		0,001539				
30	Pulverizante	05/05/99	querosene	207	700	103000	-		0,001638				

Continua ...

Tabela 4.6 (continuação).

<i>Ensaio</i>	<i>Tipo</i>	<i>Data</i>	<i>Substância</i>	T_0	P_0	P_∞	X_M	D_M	v_l	Q_T	Q_E	% Erro	<i>Gráfico</i>
29	Formação de onda elipsóide	29/04/99	querosene	150	400	500	11,3	27,4	0,001516				
58	Formação de onda elipsóide	22/07/99	querosene	152	501	600	12,0	30,8	0,001518	2,5763	2,3035	10,589	X
40	Formação de onda elipsóide	17/06/99	querosene	155	500	1200	10,2	20,0	0,001521				
28	Formação de onda elipsóide	29/04/99	querosene	160	200	500	10,0	28,8	0,001527				
41	Formação de onda elipsóide	17/06/99	querosene	170	500	1200	8,7	22,3	0,001542				
49	Formação de onda elipsóide	28/06/99	querosene	178	306	1200	5,1	13,2	0,001557	2,0152	1,7361	13,852	
6	Formação de onda elipsóide	15/04/99	querosene	180	300	400	7,4	21,2	0,001561				
9	Formação de onda elipsóide	15/04/99	querosene	190	400	300	7,0	25,7	0,001586				
34	Formação de onda elipsóide	16/06/99	querosene	200	500	1500	7,3	22,6	0,001615				
60	Formação de onda elipsóide	22/07/99	querosene	200	690	600	16,1	57,8	0,001616	3,1512	2,5068	20,449	X
59	Formação de onda elipsóide	22/07/99	querosene	200	502	600	16,5	62,5	0,001617	2,6618	2,216	16,748	X
61	Formação de onda elipsóide	22/07/99	querosene	202	310	600	11,5	41,2	0,001620	2,0719	1,3685	33,95	X
33	Formação de onda elipsóide	16/06/99	querosene	220	500	1500	8,3	22,8	0,001679				
32	Formação de onda elipsóide	27/05/99	querosene	220	650	10	19,2	65,0	0,001679				
47	Formação de onda elipsóide	28/06/99	querosene	221	700	1200	5,8	22,6	0,001682	3,2394	2,4675	23,828	
48	Formação de onda elipsóide	28/06/99	querosene	229	500	1200	4,9	18,8	0,001705	2,7255	1,9161	29,697	
27	Formação de onda elipsóide	22/04/99	querosene	230	640	500	10,1	43,4	0,001708				
21	Formação de onda elipsóide	15/04/99	querosene	245	550	100	16,1	53,0	0,001741				
26	Formação de onda elipsóide	22/04/99	querosene	245	650	1000	15,8	47,0	0,001741				
22	Formação de onda elipsóide	19/04/99	querosene	250	460	500	18,4	41,0	0,001750				
10	Formação de onda elipsóide	15/04/99	querosene	250	500	400	8,4	31,2	0,001750				
23	Formação de onda elipsóide	19/04/99	querosene	260	460	500	16,4	30,1	0,001765				
25	Formação de onda elipsóide	22/04/99	querosene	260	640	1000	18,4	49,6	0,001765				
43	Formação de onda elipsóide	17/06/99	querosene	260	700	1200	8,2	25,4	0,001765				
24	Formação de onda elipsóide	22/04/99	querosene	280	650	1000			0,001795				
8	Formação de onda esférica	15/04/99	querosene	265	500	400	9,3	12,7	0,001771				
44	Formação de onda esférica	17/06/99	querosene	270	700	1200	9,2	11,7	0,001778				

Tabela 4.7 - Relação de ensaios com n-dodecano, óleo diesel e jato de ar.

<i>Ensaio</i>	<i>Tipo</i>	<i>Data</i>	<i>Substância</i>	T_0	P_0	P_∞	X_M	D_M	<i>Gráfico</i>
1	Pulverizante	22/02/99	n-dodecano	150	700	1800			
2	Pulverizante	22/02/99	n-dodecano	150	700	1800			
3	Formação de onda elipsóide	22/02/99	n-dodecano	200	700	1800			
46	Formação de onda elipsóide	25/06/99	diesel	203,9	500	300	14,9	28,7	
45	Formação de onda elipsóide	25/06/99	diesel	250	500	300	15,9	54,2	
62	Jato de ar	11/08/99	ar	23,6	643	530	15,2	13,2	X
64	Jato de ar	11/08/99	ar	23,6	628	1070	10,5	7,7	X
63	Jato de ar	11/08/99	ar	23,7	622	1200	10,7	9,3	X

4.3. Documentação fotográfica

Nesta seção serão apresentadas todas as imagens dos ensaios realizados. Foram escolhidas, de cada ensaio, a(s) fotografia(s) cujo o mapa de cores mais destacou o comportamento do escoamento. Dependendo da faixa de tons de cinza em que se encontra o jato na imagem, alguns mapas de cores não oferecem clareza no escoamento.

Na página seguinte, é mostrado o índice da relação das imagens obtidas por ensaio em suas respectivas páginas. Primeiro serão apresentados os ensaios de n-dodecano. Estes foram os primeiros resultados deste trabalho, por isso, não são imagens muito nítidas. A seguir, são mostradas as fotografias de ensaio com querosene subdividida nos quatro tipos de jato: contínuo, pulverizante, com formação de onda de choque elipsóide e, finalmente, com formação de onda de choque esferóide. Depois, são apresentadas as fotografias obtidas com óleo diesel, finalizando com os ensaios de jato de ar.

4.3.1. Ensaio com n-dodecano

Ensaio	Página
01	78
02	79
03	80
04	81
05	81

4.3.2. Ensaio com querosene

4.3.2.1. Jatos contínuos

11	82
18	82
19	82
53	82
54	83
55	83

4.3.2.2. Jatos pulverizantes

12	84
13	86
14	88
15	90
16	92
17	94
31	96
35	97
36	98
37	99
38	100
39	101
42	102
50	103
51	104
52	105
56	106
57	108
30	110

4.3.2.3. Jatos com ondas de choque elípticas

07	111
09	112
10	113

Ensaio	Página
21	114
22	115
23	116
24	117
25	118
26	119
27	120
28	121
29	122
32	123
33	124
34	125
40	126
41	127
43	128
47	129
48	130
49	131
58	132
59	134
60	136
61	138

4.3.2.4. Jatos com ondas de choque esféricas

08	140
44	141

4.3.3. Ensaio com óleo diesel

45	142
46	143

4.3.4. Ensaio com ar

62	145
63	147
64	149

Ensaio n.º 1

- n-dodecano

Data 22/02/99

$T_0 = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 700\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 100\text{ Pa}$

Característica:

- jato pulverizante

Mapa de cores: jet

Ensaio n.º 2
- dodecano

Data 22/02/99

$T_0 = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 700\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 1800\text{ Pa}$

Característica:

- jato pulverizante

Mapa de cores: jet

Obs.: a janela antes do
ensaio já estava um
pouco embaçada.

Ensaio n.º 3
- dodecano

Data 22/02/99

$T_0 = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 700\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 1800\text{ Pa}$

Característica:

- jato com possível formação de onda de choque

Mapa de cores: gray

Ensaio n.º 4
- dodecano

Data 01/03/99

$T_0 = 190\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 300\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 10\text{ Pa}$

Obs.: houve embaçamento dos visores e não foi possível observar o jato.

Ensaio n.º 5
- dodecano

Data 08/03/99

$T_0 = 202\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 150\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 150\text{ Pa}$

Obs.: houve embaçamento dos visores e não foi possível observar o jato.

Ensaio n.º 11

- querosene

Data 15/04/99

Imagem tratada

mapa de cores: gray

 $T_0 = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ $P_0 = 300\text{ kPa}$ $P_{\infty} = 2100\text{ Pa}$

Nota: Apenas o ensaio n.º11 consta com a fotografia original do jato. Isso porque não há distinção das fotografias originais dos ensaios seguintes em relação a este. Sendo assim, apenas foi colocada a imagem tratada matematicamente dos ensaios seguintes, mesmo assim, a pesquisa com todos os mapas de cores não revelou qualquer fenômeno de evaporação, como pode ser observado nos jatos pulverizantes. As imagens expostas são aquelas que melhor destacaram o escoamento.

Ensaio n.º 18

- querosene

Data 15/04/99

mapa de cores: gray

 $T_0 = 93\text{ }^{\circ}\text{C}$ $P_0 = 200\text{ kPa}$ $P_{\infty} = 2100\text{ Pa}$

Ensaio n.º 19

- querosene

Data 15/04/99

mapa de cores: gray

 $T_0 = 89\text{ }^{\circ}\text{C}$ $P_0 = 200\text{ kPa}$ $P_{\infty} = 2100\text{ Pa}$

Ensaio n.º 53

- querosene

Data 29/06/99

mapa de cores: pink

 $T_0 = 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ $P_0 = 300\text{ kPa}$ $P_{\infty} = 2000\text{ Pa}$

Ensaio n.º 20: Não disparou.

Ensaio n.º 54

- querosene

Data 29/06/99

mapa de cores: jet

$$T_0 = 38\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_0 = 498\text{ kPa}$$

$$P_{\infty} = 2000\text{ Pa}$$

Ensaio n.º 55

- querosene

Data 29/06/99

mapa de cores: pink

$$T_0 = 36\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_0 = 700\text{ kPa}$$

$$P_{\infty} = 1600\text{ Pa}$$

Ensaio n.º 12

- querosene

Data 15/04/99

$T_0 = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 350\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 1500\text{ Pa}$

$X = 30,9\text{ mm}$

Característica:

- jato
pulverizante

Mapa de cores: hsv

Continua...

Ensaio n.º 12 (continuação).

Mapa de cores:
- prism

Obs.: com este mapa
de cores foi
possível visualizar
o gradiente de
densidade.

Ensaio n.º 13

- querosene

Data 15/04/99

$T_0 = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 350\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 2100\text{ Pa}$

$X = 28,7\text{ mm}$

Característica:

- jato
pulverizante

Mapa de cores: hsv

Continua...

Ensaio n.º 13 (continuação).

Mapa de cores:
- prism

Obs.: com este mapa
de cores foi
possível visualizar
o gradiente de
densidade.

Ensaio n.º 14

- querosene

Data 15/04/99

$T_0 = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 350\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 2100\text{ Pa}$

$X = 34,9\text{ mm}$

Característica:

- jato
pulverizante

Mapa de cores: hsv

Continua...

Ensaio n.º 14 (continuação).

Mapa de cores:
- prism

Obs.: com este mapa
de cores foi
possível visualizar
o gradiente de
densidade.

Ensaio n.º 15

- querosene

Data 15/04/99

$T_0 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 350\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 2100\text{ Pa}$

$X = 31,2\text{ mm}$

Característica:

- jato
pulverizante

Mapa de cores: hsv

Continua...

Ensaio n.º 15 (continuação).

Mapa de cores:
- prism

Obs.: com este mapa
de cores foi
possível visualizar
o gradiente de
densidade.

Ensaio n.º 16

- querosene

Data 15/04/99

$T_0 = 96\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 350\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 2100\text{ Pa}$

$X = 33,5\text{ mm}$

Característica:

- jato
pulverizante

Mapa de cores: hsv

Continua...

Ensaio n.º 16 (continuação).

Mapa de cores:
- prism

Obs.: com este mapa
de cores foi
possível visualizar
o gradiente de
densidade.

Ensaio n.º 17

- querosene

Data 15/04/99

$T_0 = 97\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 200\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 2100\text{ Pa}$

$X = 21,9\text{ mm}$

Característica:

- jato
pulverizante

Mapa de cores: hsv

Continua...

Ensaio n.º 17 (continuação).

Mapa de cores:
- prism

Obs.: com este mapa
de cores foi
possível visualizar
o gradiente de
densidade.

Ensaio n.º 31

- querosene

Data 25/05/99

$T_0 = 95\text{ °C}$

$P_0 = 615\text{ kPa}$

$P_\infty = 1200\text{ Pa}$

$X = 33,3\text{ mm}$

Característica:

- jato
pulverizante

Mapa de cores: bone

Ensaio n.º 35

- querosene

Data 16/06/99

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

$P_0 = 500\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 1500\text{ Pa}$

$X = 20,7\text{ mm}$

Característica:

- jato
pulverizante

Mapa de cores: hsv

Ensaio n.º 36

- querosene

Data 16/06/99

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

$P_0 = 500\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 1500\text{ Pa}$

$X = 20,7\text{ mm}$

Característica:

- jato
pulverizante

Mapa de cores: hsv

Ensaio n.º 37

- querosene

Data 16/06/99

$T_0 = 120\text{ °C}$

$P_0 = 500\text{ kPa}$

$P_\infty = 1500\text{ Pa}$

$X = 20,3\text{ mm}$

Característica:

- jato
pulverizante

Mapa de cores: gray

Ensaio n.º 38

- querosene

Data 16/06/99

$T_0 = 168\text{ °C}$

$P_0 = 443\text{ kPa}$

$P_\infty = 1500\text{ Pa}$

$X = 12,6\text{ mm}$

Característica:

- jato
pulverizante

Mapa de cores: cool

Ensaio n.º 39

- querosene

Data 17/06/99

$T_0 = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 500\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 1200\text{ Pa}$

$X = 19,0\text{ mm}$

Característica:

- jato
pulverizante

Mapa de cores: jet

Ensaio n.º 42

- querosene

Data 17/06/99

$T_0 = 85\text{ °C}$

$P_0 = 500\text{ kPa}$

$P_\infty = 1200\text{ Pa}$

$X = 36,5\text{ mm}$

Característica:

- jato
pulverizante

Mapa de cores: gray

Ensaio n.º 50

- querosene

Data 29/06/99

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

$P_0 = 700\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 2000\text{ Pa}$

$X = 27,7\text{ mm}$

Característica:

- jato
pulverizante

Mapa de cores: hsv

Ensaio n.º 51
- querosene

Data 29/06/99

$T_0 = 96\text{ °C}$

$P_0 = 502\text{ kPa}$

$P_\infty = 2000\text{ Pa}$

$X = 27,2\text{ mm}$

Característica:

- jato pulverizante

Mapa de cores: hsv

Ensaio n.º 52

- querosene

Data 29/06/99

$T_0 = 96\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 300\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 2000\text{ Pa}$

$X = 19,7\text{ mm}$

Característica:

- jato
pulverizante

Mapa de cores: hsv

Ensaio n.º 56

- querosene

Data 22/07/99

$T_0 = 91\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 501\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 600\text{ Pa}$

$X = 56,8\text{ mm}$

Característica:

- jato
pulverizante

Mapa de cores: jet

Continua...

Ensaio n.º 56 (continuação).

Frequência: 500 Hz

Desvios padrões:

- $dT = 0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$

- $dP = 2,6 \text{ kPa}$

Instantes

- inicial: $t_i = 0,264 \text{ s}$

- final: $t_f = 1,012 \text{ s}$

Ensaio n.º 57

- querosene

Data 22/07/99

$T_0 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 501\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 600\text{ Pa}$

$X = 49,9\text{ mm}$

Característica:

- jato
pulverizante

Mapa de cores: jet

Continua...

Ensaio n.º 57 (continuação).

Frequência: 500 Hz

Desvios padrões:

- $dT = 0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$

- $dP = 3,5\text{ kPa}$

Instantes

- inicial: $t_i = 0,260\text{ s}$

- final: $t_f = 0,994\text{ s}$

Ensaio n.º 30

- querosene

Data 05/05/99

$T_0 = 207\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 700\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 99000\text{ Pa}$

Característica:

- jato
pulverizante

Mapa de cores: prism

Obs.: Neste ensaio,
existe a interferência
da convecção do ar
do reservatório.

Ensaio n.º 7

- querosene

Data 15/04/99

$T_0 = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 300\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 400\text{ Pa}$

$X_M = 7,4\text{ mm}$

$D_M = 21,2\text{ mm}$

Característica:

- jato com onda de
choque elipsóide

Mapa de cores: hsv

Ensaio n.º 9

- querosene

Data 15/04/99

$T_0 = 190\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 400\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 300\text{ Pa}$

$X_M = 7,0\text{ mm}$

$D_M = 25,7\text{ mm}$

Característica:

- jato com onda de
choque elipsóide

Mapa de cores: hsv

Ensaio n.º 10

- querosene

Data 15/04/99

$T_0 = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 500\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 400\text{ Pa}$

$X_M = 8,4\text{ mm}$

$D_M = 31,2\text{ mm}$

Característica:

- jato com onda de
choque elipsóide

Mapa de cores: hsv

Ensaio n.º 21
- querosene

Data 15/04/99

$T_0 = 245\text{ °C}$

$P_0 = 550\text{ kPa}$

$P_\infty = 100\text{ Pa}$

$X_M = 16,1\text{ mm}$

$D_M = 53,0\text{ mm}$

Característica:

- jato com onda de
choque elipsóide

Mapa de cores: hsv

Ensaio n.º 22

- querosene

Data 19/04/99

$T_0 = 250\text{ °C}$

$P_0 = 460\text{ kPa}$

$P_\infty = 500\text{ Pa}$

$X_M = 18,4\text{ mm}$

$D_M = 41,0\text{ mm}$

Característica:

- jato com onda de choque elipsóide

Mapa de cores: hsv

Obs.: esta imagem oferece a impressão que algumas gotículas não evaporam totalmente antes de cruzar a onda de choque.

Mapa de cores:

- prism

Obs.: com este mapa de cores foi possível visualizar o gradiente de densidade.

Ensaio n.º 23

- querosene

Data 19/04/99

$T_0 = 260\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 460\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 500\text{ Pa}$

$X_M = 16,4\text{ mm}$

$D_M = 30,1\text{ mm}$

Característica:

- jato com onda de choque elipsóide

Mapa de cores: hsv

Mapa de cores:

- prism

Obs.: com este mapa de cores foi possível visualizar o gradiente de densidade.

Ensaio n.º 24
- querosene

Data 22/04/99

$T_0 = 280\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 650\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 1000\text{ Pa}$

Mapa de cores: arcir

Obs.: não é possível
verificar alguma
formação de ondas
de choque embora as
condições
favoreçam.

Ensaio n.º 25

- querosene

Data 22/04/99

$T_0 = 260\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 640\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 1000\text{ Pa}$

$X_M = 18,4\text{ mm}$

$D_M = 49,6\text{ mm}$

Característica:

- jato com onda de
choque elipsóide

Mapa de cores: hsv

Ensaio n.º 26

- querosene

Data 22/04/99

$T_0 = 245\text{ °C}$

$P_0 = 650\text{ kPa}$

$P_\infty = 1000\text{ Pa}$

$X_M = 15,8\text{ mm}$

$D_M = 47,0\text{ mm}$

Característica:

- jato com onda de
choque elipsóide

Mapa de cores: prism

Ensaio n.º 27

- querosene

Data 22/04/99

$T_0 = 230\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 640\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 500\text{ Pa}$

$X_M = 10,1\text{ mm}$

$D_M = 43,4\text{ mm}$

Característica:

- jato com onda de
choque elipsóide

Mapa de cores: prism

Ensaio n.º 28

- querosene

Data 29/04/99

$T_0 = 160\text{ °C}$

$P_0 = 200\text{ kPa}$

$P_\infty = 500\text{ Pa}$

$X_M = 10,0\text{ mm}$

$D_M = 28,8\text{ mm}$

Característica:

- jato com onda de choque elipsóide

Mapa de cores: hsv

Obs.: nestas fotografia a fonte de luz era o Laser.

Ensaio n.º 29

- querosene

Data 29/04/99

$T_0 = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 400\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 500\text{ Pa}$

$X_M = 11,3\text{ mm}$

$D_M = 27,4\text{ mm}$

Característica:

- jato com onda de choque elipsóide

Mapa de cores: jet

Obs.: nestas fotografia a fonte de luz era o Laser.

Ensaio n.º 32

- querosene

Data 27/05/99

$T_0 = 220\text{ °C}$

$P_0 = 650\text{ kPa}$

$P_\infty = 10\text{ Pa}$

$X_M = 19,2\text{ mm}$

$D_M = 65,0\text{ mm}$

Característica:

- jato com onda de
choque elipsóide

Mapa de cores: copper

Ensaio n.º 33

- querosene

Data 16/06/99

$T_0 = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 500\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 1500\text{ Pa}$

$X_M = 8,3\text{ mm}$

$D_M = 22,8\text{ mm}$

Característica:

- jato com onda de
choque elipsóide

Mapa de cores: gray

Ensaio n.º 34
Data 16/06/99

$T_0 = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 500\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 1500\text{ Pa}$

$X_M = 7,3\text{ mm}$

$D_M = 22,6\text{ mm}$

Característica:

- jato com onda de choque elipsóide

Mapa de cores: gray

Ensaio n.º 40

- querosene

Data 17/06/99

$T_0 = 155\text{ °C}$

$P_0 = 500\text{ kPa}$

$P_\infty = 1200\text{ Pa}$

$X_M = 10,2\text{ mm}$

$D_M = 20,0\text{ mm}$

Característica:

- jato com onda de choque elipsóide

Mapa de cores: gray

Ensaio n.º 41
- querosene

Data 17/06/99

$T_0 = 170\text{ °C}$

$P_0 = 500\text{ kPa}$

$P_\infty = 1200\text{ Pa}$

$X_M = 8,7\text{ mm}$

$D_M = 22,3\text{ mm}$

Característica:

- jato com onda de
choque elipsóide

Mapa de cores: bone

Ensaio n.º 43

- querosene

Data 17/06/99

$T_0 = 260\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 700\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 1200\text{ Pa}$

$X_M = 8,2\text{ mm}$

$D_M = 25,4\text{ mm}$

Característica:

- jato com onda de
choque elipsóide

Mapa de cores: gray

Ensaio n.º 47

- querosene

Data 28/06/99

$T_0 = 221\text{ °C}$

$P_0 = 700\text{ kPa}$

$P_\infty = 1200\text{ Pa}$

$X_M = 5,8\text{ mm}$

$D_M = 22,6\text{ mm}$

Característica:

- jato com onda de
choque elipsóide

Mapa de cores: jet

Ensaio n.º 48

- querosene

Data 28/06/99

$T_0 = 229\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 500\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 1200\text{ Pa}$

$X_M = 4,9\text{ mm}$

$D_M = 18,8\text{ mm}$

Característica:

- jato com onda de
choque elipsóide

Mapa de cores: cool

Ensaio n.º 49

- querosene

Data 28/06/99

$T_0 = 178\text{ °C}$

$P_0 = 306\text{ kPa}$

$P_\infty = 1200\text{ Pa}$

$X_M = 5,1\text{ mm}$

$D_M = 13,2\text{ mm}$

Característica:

- jato com onda de
choque elipsóide

Mapa de cores: cool

Ensaio n.º 58

- querosene

Data 22/07/99

$T_0 = 152\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 501\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 600\text{ Pa}$

$X_M = 12,0\text{ mm}$

$D_M = 30,8\text{ mm}$

Característica:

- jato com onda de choque elipsóide

Mapa de cores: jet

Continua...

Ensaio n.º 58 (continuação).

Mapa de cores: prism

Frequência: 500 Hz

Desvios padrões:

- $dT = 0,20\text{ }^{\circ}\text{C}$

- $dP = 3,8\text{ kPa}$

Instantes

- inicial: $t_i = 0,256\text{ s}$

- final: $t_f = 0,994\text{ s}$

Ensaio n.º 59

- querosene

Data 22/07/99

$T_0 = 204\text{ °C}$

$P_0 = 502\text{ kPa}$

$P_\infty = 600\text{ Pa}$

$X_M = 16,5\text{ mm}$

$D_M = 62,5\text{ mm}$

Característica:

- jato com onda de
choque elipsóide

Mapa de cores: jet

Continua...

Ensaio n.º 59 (continuação).

Frequência: 500 Hz

Desvios padrões:

- $dT = 0,20\text{ }^{\circ}\text{C}$

- $dP = 3,5\text{ kPa}$

Instantes

- inicial: $t_i = 0,278\text{ s}$

- final: $t_f = 1,000\text{ s}$

Ensaio n.º 60

- querosene

Data 22/07/99

$T_0 = 200\text{ °C}$

$P_0 = 690\text{ kPa}$

$P_\infty = 600\text{ Pa}$

$X_M = 16,1\text{ mm}$

$D_M = 57,8\text{ mm}$

Característica:

- jato com onda de
choque elipsóide

Mapa de cores: jet

Continua...

Ensaio n.º 60 (continuação).

Mapa de cores: prism

Frequência: 500 Hz

Desvios padrões:

- $dT = 0,20\text{ }^{\circ}\text{C}$

- $dP = 4,3\text{ kPa}$

Instantes

- inicial: $t_i = 0,270\text{ s}$

- final: $t_f = 1,008\text{ s}$

Ensaio n.º 61

- querosene

Data 22/07/99

$T_0 = 201\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 310\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 600\text{ Pa}$

$X_M = 11,5\text{ mm}$

$D_M = 41,2\text{ mm}$

Característica:

- jato com onda de
choque elipsóide

Mapa de cores: hsv

Continua...

Ensaio n.º 61 (continuação).

Frequência: 500 Hz

Desvios padrões:

- $dT = 0,20\text{ }^{\circ}\text{C}$

- $dP = 4,5\text{ kPa}$

Instantes

- inicial: $t_i = 0,258\text{ s}$

- final: $t_f = 0,996\text{ s}$

Ensaio n.º 8

- querosene

Data 15/04/99

$T_0 = 265\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 500\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 400\text{ Pa}$

$X_M = 9,3\text{ mm}$

$D_M = 12,7\text{ mm}$

Característica:

- jato com onda de choque esférica

Mapa de cores: jet

Obs.: a partir da quarta fotografia a onda de choque se deforma.

Ensaio n.º 44

- querosene

Data 17/06/99

$T_0 = 270\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 700\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 1200\text{ Pa}$

$X_M = 9,2\text{ mm}$

$D_M = 11,7\text{ mm}$

Característica:

- jato com onda de choque esférica.

Mapa de cores: hsv

Ensaio n.º 45

- óleo diesel

Data 25/06/99

$T_0 = 250\text{ °C}$

$P_0 = 500\text{ kPa}$

$P_\infty = 300\text{ Pa}$

$X_M = 15,9\text{ mm}$

$D_M = 54,2\text{ mm}$

Característica:

- jato com onda de choque elipsóide.

Mapa de cores: jet

Mapa de cores: jet

Obs.: na primeira fotografia do jato, existia a formação de uma onda esferóide.

Ensaio n.º 46

- óleo diesel

Data 25/06/99

$T_0 = 204\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 500\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 300\text{ Pa}$

$X_M = 14,9\text{ mm}$

$D_M = 28,7\text{ mm}$

Característica:

- jato com onda de choque elipsóide.

Mapa de cores: hsv

Obs.: esta imagem oferece a impressão que algumas gotículas não evaporam totalmente antes de cruzar a onda de choque.

Continua ...

Ensaio n.º 46 (continuação)

Mapa de cores:

- prism

Obs.: com este mapa de cores foi possível visualizar o gradiente de densidade no escoamento.

Ensaio n.º 62

- ar

Data 11/08/99

$T_0 = 24\text{ °C}$

$P_0 = 643\text{ kPa}$

$P_\infty = 530\text{ Pa}$

$X_M = 15,2\text{ mm}$

$D_M = 13,2\text{ mm}$

Mapa de cores: gray

Continua...

Ensaio n.º 62 (continuação).

Frequência: 500 Hz

Desvios padrões:

- $dT = 0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$

- $dP = 3,5 \text{ kPa}$

Ensaio n.º 63

- ar

Data 11/08/99

$T_0 = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_0 = 628\text{ kPa}$

$P_{\infty} = 1070\text{ Pa}$

$X_M = 10,7\text{ mm}$

$D_M = 9,3\text{ mm}$

Mapa de cores: gray

Mapa de cores: jet

Continua ...

Ensaio n.º 63 (continuação).

Frequência: 500 Hz

Desvios padrões:

- $dT = 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$

- $dP = 3,5\text{ kPa}$

Ensaio n.º 64

- ar

Data 11/08/99

$T_0 = 24\text{ °C}$

$P_0 = 622\text{ kPa}$

$P_\infty = 1200\text{ Pa}$

$X_M = 10,3\text{ mm}$

$D_M = 10,7\text{ mm}$

Mapa de cores: gray

Mapa de cores: jet

Continua ...

Ensaio n.º 64 (continuação).

Frequência: 500 Hz

Desvios padrões:

- $dT = 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$
- $dP = 3,5\text{ kPa}$

5. CONCLUSÃO E CONTINUIDADE DO TRABALHO

5.1. Conclusão

Com os resultados obtidos neste trabalho pode-se concluir que:

- a) o aparato experimental, conforme foi projetado, funcionou muito bem quanto a estabilidade das condições de ensaio que eram a pressão de injeção, temperatura de injeção e a pressão da câmara;
- b) o método "schlieren" com o auxílio do processamento matemático das imagens, mostrou-se eficiente para a visualização do escoamento. Dentro disso, foi possível observar a formação de ondas de choque nos diversos tipos de jatos que se caracterizam pelo grau de superaquecimento;
- c) também foi possível observar interfaces que delimitam a região de líquido do jato e a região de vapor úmido na expansão, dando a entender que são interfaces características das ondas de evaporação;
- d) os tipos de jatos, conforme o grau de superaquecimento, foram classificados neste trabalho como: jatos contínuos, jatos pulverizantes, jatos com formação de ondas de choque elipsóides e com formação de ondas de choque esferóides;
- e) os líquidos aqui testados, conforme esperado, deram boas condições para visualizar a estrutura destes jatos, pois devido aos seus grandes potenciais de armazenar energia interna em um processo de metaestabilidade, ofereceram a oportunidade de uma maior taxa de evaporação do jato, tornando mais nítida a

imagem. Se houvesse uma densa dispersão de gotículas na expansão, as imagens tornariam-se opacas.

5.2. Continuidade do trabalho

A seguir está destacado algumas sugestões para a continuidade deste trabalho:

- a) realização destes experimentos utilizando substâncias puras, para melhor estudar o comportamento destes jatos, fazer correlações empíricas, e comparar os resultados com modelos matemáticos que simulem este fenômeno;
- b) aprimoramento da técnica atual com o "schlieren" colorido (também encontrado na literatura inglesa de "rainbow schlieren") ;
- c) utilização de outros métodos de visualização como a iluminação lateral, seja o feixe na forma expandida ou, de lâmina que ilumina a seção do jato na região central e paralela ao eixo;
- d) utilização e comparação de bocais com geometrias diferentes;
- e) utilização e comparação de bocais cuja a superfície seja polida. Pois, sabe-se que esta apresenta menor rugosidade e portanto inibe melhor a nucleação heterogênea do fluido durante o seu escoamento no bocal e, neste caso, acredita-se que isto permitirá que se obtenha um maior superaquecimento do líquido em relação ao bocal que apenas levou o tratamento de usinagem de eletroerosão;
- f) visualização e simulação experimental do funcionamento de dispositivos que possuem este tipo de fenômeno como: tubos de orifício e válvulas de expansão utilizados em ciclos de refrigeração, injetores de combustíveis, entre outros.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anderson, J. D., 1990, *Modern Compressible Flow: with historical perspective*, 2º ed., McGraw-Hill.

Athans, R. E., 1994, *The Rapid Expansion of Near-Critical Retrograde Fluid*, tese de doutorado apresentada ao Rensselaer Polytechnic Institute, Nova Iorque, EUA.

Athans, R. E. e Hirska, A., 1995, *A Photographic Study of a Small Flashing Jets*, Flow Visualization and Image Processing of Multiphase System, ASME, V. 209, pp. 201-206.

ANSI/ASME, PTC 19.1-1985, *Measurement Uncertainty*.

Chaves, H., Kurschat, Th. e Meier, G. E. A., 1992, *Complete Adiabatic Evaporation of Highly Superheated Liquid Jets*, Journal of Fluid Mechanics., V. 236, pp. 43-59.

Crist, S., Sherman, P. M., and Glass, D. R., 1966, *Study of the Highly Underexpanded Sonic Jet*, AIAA Journal, V. 3, nº1, pp. 68-71.

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, V. 95, pp. 279-304.

Edwards High Vacuum International, 1996, *Instruction Manual - CG 16K Capsule Dial Gauge*.

Fuchs, H. e Legge, H., 1979, *Flow of a water jet into vacuum*, Acta Astronautica, Pergamon Press Ltd., V. 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 n.º 97/01188-9.
- Hill, L. G. e Sturtevant, B., 1990, *An Experimental Study of Evaporation Waves in a Superheated Liquid*, *Adiabatic Waves in Liquid-Vapor Systems*, eds. Meier, G. E. A. e Thompson, P. A., Springer-Verlag, pp. 25-37.
- Lambrakis, K. C., 1972, *Negative Γ Fluids*, Dissertation, Rensselaer Polytechnic Institute, NY, EUA.
- Lienhart, J. H. e Day, J. B., 1970, *The Breakup of Superheated Liquid Jets*, *Transaction of the ASME - Journal of Basic Engineering*, V. 92, pp. 515-521.
- 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*, V. 106, pp. 105-109.
- Oza, R. D. e Sinnamon, J. F., 1983, *An Experimental and Analytical 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*, V. 37, nº 2, pp. 313-321.
- Reid, R. C., 1976, *Superheated Liquids*, *American Scientist*, V. 64, pp. 146-56.

- Rietz, R. D., 1990, *A Study Photographic of Flash-Boiling Atomization*, Aerosol Science and Technology, V. 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. 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, V. 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.
- Skrupov, 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., V. 95, pp. 279-304.
- 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 n.º 96/02070-9.

Apêndice I

Desenvolvimento do projeto óptico

APÊNDICE I - DESENVOLVIMENTO DO PROJETO ÓPTICO

Dentro dos objetivos de se obterem registros fotográficos do jato evaporativo, decidiu-se utilizar, desde o início deste projeto, o método "schlieren", que pareceu ser um dos mais indicados dadas as restrições orçamentárias do projeto, para conhecer o perfil do escoamento e observar a possível formação da onda de choque.

Cálculos preliminares indicaram que o fenômeno de interesse ficaria confinado dentro de uma zona de observação circular de diâmetro de cerca de 130 mm. Também, conclui-se que a disposição do arranjo óptico seria do tipo "Z", com o menor ângulo possível entre o feixe refletido e o feixe incidente nos espelhos parabólicos, para minimizar aberrações ópticas do tipo comma e astigmatismo. Esse arranjo está ilustrado na configuração da Figura 3.12. Adicionalmente, utilizaram-se trilhos e carros-suporte para as lentes e espelhos, sendo todos os espelhos planos e parabólicos do tipo aluminizados na primeira superfície.

Inicialmente, usava-se uma ponteira "laser", daquelas comuns para apresentações de conferências, e um "pin-hole" com tamanho do furo ajustável, de formato quadrado, feito com lâminas de barbear, e a imagem era projetada em um anteparo. Isso foi fundamental para um primeiro contato com o método. A seguir, tem uma fotografia da disposição óptica nas mesas, Figura I.1 e Figura I.2, e uma fotografia de uma chama de isqueiro, Figura I.3.

Fig. I.1 - Ponteira "laser" e lente nos suportes e trilho.

Fig. I.2 - Espelhos, "pin-hole" nos suportes e trilho.

Fig. I.3 - Chama de isqueiro.

A seguir, utilizou-se uma lâmpada de "flash" como fonte de luz , modelo LS-1130 da marca EG&G, Figura I.4. Os outros equipamentos continuavam os mesmos, com exceção do "pin-hole" com diâmetros fixos de 0,7 mm feitos de lâminas de aço, que foi pré-determinado com a calibração. O procedimento deste ensaio consistia no monitoramento do computador que possui a placa de aquisição de dados, o qual monitorava o acionamento da injeção, o disparo da luz e as aquisições dos dados de pressão e temperatura à montante do jato. O ensaio era realizado em ambiente totalmente escuro, dando a oportunidade de abrir o obturador da máquina fotográfica para que, no momento da injeção, fosse registrada a imagem no filme com o disparo do "flash", o qual tem um tempo de duração da ordem de 2 microsegundos. Após a injeção, o obturador da câmara era fechado manualmente. A revelação do filme era realizada na sala escura do laboratório. Antes do ensaio, a necessária regulação da disposição dos componentes ópticos fotográficos, para o perfeito trajeto dos feixes de luz era feito com a lâmpada de "flash" acionada continuamente na frequência de 40 Hz, dando uma impressão de iluminação constante ao olho humano. O monitoramento do "flash" era feito por um controlador eletrônico projetado no próprio laboratório (Guimarães, 1999).

Fig. I.4 - Lâmpada de "flash".

Alguns ensaios preliminares foram realizados neste procedimento. No começo, foram registradas fotografias da convecção de calor em ferro de solda de eletrônica, como ilustrado através de uma das fotografias obtidas, que se encontra na Figura I.5. As janelas ou visores onde traspassavam o feixe de luz eram de vidro comum com 25 mm de espessura e 150 mm de diâmetro. Notou-se que devido à baixa qualidade do vidro, formavam-se auréolas concêntricas, como aquelas indicadas na fotografia da Figura I.6. Para solucionar o problema, foram reposicionadas outras janelas de mesmo diâmetro e com espessura de 10 mm cuja fabricação é feita pelo processo "float".

Nos ensaios com jato, utilizamos o n-dodecano como fluido-teste. Entretanto, rapidamente observou-se que os vapores causavam o problema de embaçamento dos visores devido a proximidade do bocal de injeção com as janelas de visualização. O vapor do jato colidia nos visores e resfriava-se, formando pequenas gotículas que originam pontos escuros na imagem do método "schlieren". A fotografia mais nítida que conseguiu-se registrar do jato de n-dodecano está na Figura I.7 e as condições de ensaio eram $P_0 = 570$ kPa, $T_0 = 80$ °C e $P_\infty = 14$ Pa, respectivamente correspondentes a pressão de injeção,

temperatura de injeção e pressão na câmara. Para solucionar este problema novas janelas foram construídas, muito mais afastadas do injetor que as duas janelas originais (450 mm).

Fig. I.5 - Convecção de calor em um ferro de soldar.

Fig. I.6 - Imagem com auréolas concêntricas nos visores por deficiência do sistema óptico.

Fig. I.7 - Jato de n-dodecano. As manchas ocorriam devido à condensação do vapor nas janelas dos visores.

No decorrer do projeto, adquiriu-se uma câmara digital de filmar CCD. Esse novo equipamento permitia registrar as imagens com um tempo mínimo de exposição de 100 microsegundos, e dispensava o uso da lâmpada de "flash" devido a incompatibilidade de sincronismo da mesma com a câmara. Foi substituída a lâmpada por uma fonte de "laser" de HeNe, de 5 mW, diâmetro de feixe de 0,80 mm, da marca Melles Griot. Nesta configuração, durante o ensaio, o "laser" ficava ligado permanentemente e a imagem era registrada quando um sinal elétrico externo de disparo acionava a câmara. Como a imagem era obtida no mesmo momento do ensaio, oferecia-se a oportunidade de se fazerem regulagens instantâneas para melhor sensibilizar o sistema. Isso proporcionou chegar a um tal nível de sensibilidade que foi possível observar a convecção do calor dos dedos de uma mão. Basicamente, dois fatores influenciaram para tal conquista: (1) a utilização de um filtro espacial menor, com 0,28 mm de diâmetro, posicionado após a primeira lente focalizadora que ficava após o "laser" e, (2) a adaptação de uma lente de objetiva de foco regulável na câmara CCD. Na Figura I.8, está ilustrada a fonte de "laser", com a lente

expansora do feixe de perfil convergente e os filtros polarizadores que exerciam a função de regular a intensidade luminosa.

No entanto, as imagens continham auréolas concêntricas que influenciavam a qualidade da fotografia. Isso ocorria devido à interferência do feixe na lente expansora, sendo que tal fenômeno é chamado "anéis de Newton" e ilustrado na Figura I.9. Para a correção deste problema seria necessária a colocação de um "pin-hole" da ordem de $20\text{ }\mu\text{m}$ e de um suporte para o mesmo, equipamento que não se dispunha no laboratório. Na seqüência observa-se a Figura I.10, na qual é mostrada uma fotografia de um jato de querosene cuja as condições de ensaio eram $T_0 = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_0 = 200\text{ kPa}$ e $P_{\infty} = 500\text{ Pa}$. A imagem filtrada do jato está na Figura I.11.

Fig. I.8 - "Laser" com filtros polarizadores para regular a intensidade da luz.

Fig. I.9 - Fotografia com anéis de Newton.

Fig. I.10 - Fotografia com o jato de querosene. As condições de ensaio eram $T_0 = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_0 = 200\text{ kPa}$ e $P_{\infty} = 500\text{ Pa}$

Fig. I.11 - Fotografia do jato de querosene com o filtro subtrativo.

Devido aos anéis de Newton, o "laser" foi substituído por uma lâmpada halógena de 40 W como foi descrito no Capítulo 3, e que atualmente é utilizado, mas ainda pretende-se reutilizar os recursos da lâmpada de "flash" e da fonte de "laser" em trabalhos futuros.

Apêndice II

Listagem do Programa "imgfmc"
de Filtragem e Processamento Matemático de Imagens
(em linguagem Matlab)

```

function imgfmc();

% imgfmc() Programa para processamento de imagens com recursos
% de filtragem matemática (divisão de uma imagem pela outra)
% e mudança de mapas de cores.
%
% funções utilizadas por este programa:
%     confini() - configurações iniciais
%     confarq() - configurações dos recursos de manipulação de
arquivo
%     confbot() - configurações dos recursos de visualização de
imagem e filtragem
%     confselr() - configurações dos recursos de edição de
imagem
%     menucor - configurações dos recursos de mapa de cores
%     Feito em 1999 por
%
%     Marcelo Silva Guimarães
%     Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos
%     Dept. de Engenharia Mecânica
%     Escola Politécnica de da Universidade de São Paulo
%     Av. Prof. Mello Moraes, 2231
%     CEP 05508-900
%     São Paulo, SP
%     BRASIL
%
%     E-mail: marcsg@usp.br

```

```

a=confini;

confarq(a);

confbot(a);

confselr(a);

menucor;

zoom;

```

```

function CalcFlt(nomeMat,nomeFilt);
% CalcFlt(nomeMat,nomeFilt) filtra a imagem com um filtro matemático
de divisão
%
% Parâmetros de entrada:
%     nomeMat - nome da imagem a ser filtrada
%     nomeFilt - nome da imagem filtro
%
%
%     Feito em 1999 por
%
%     Marcelo Silva Guimarães
%     Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos
%     Dept. de Engenharia Mecânica
%     Escola Politécnica de da Universidade de São Paulo
%     Av. Prof. Mello Moraes, 2231
%     CEP 05508-900
%     São Paulo, SP
%     BRASIL
%
%     E-mail: marcsg@usp.br

% Abre a imagem
MatH=findobj(gcf,'Tag',nomeMat);
tabMat=get(MatH,'UserData');

%Abre o filtro
FiltH=findobj(gcf,'Tag',nomeFilt);
tabFilt=get(FiltH,'UserData');

%elimina zeros do filtro
[m,n]=size(tabFilt);
umtab=ones(m,n);
umtab=0.00000001*umtab;
tabF=tabFilt+umtab;

%filtra
tabMat=tabMat./tabF;

%normaliza o mapa de cores
min1=min(tabMat);
min2=min(min1)+0,00000000000001;
tabMat=((1/min2)*tabMat);
max1=max(tabMat);
max2=max(max1);

set(gcf,'UserData',tabMat);
image(tabMat);
axis xy;

```

```

function ajustimg()
% ajustimg() ajusta o tamanho da imagem a ser processada
%
%
%
%         Feito em 1999 por
%
%         Marcelo Silva Guimarães
%         Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos
%         Dept. de Engenharia Mecânica
%         Escola Politécnica de da Universidade de São Paulo
%         Av. Prof. Mello Moraes, 2231
%         CEP 05508-900
%         São Paulo, SP
%         BRASIL
%
%         E-mail: marcsg@usp.br

%Abre o filtro
H1=findobj(gcf,'Tag','AbriFilt');
fimg=get(H1,'UserData');

% Abre a imagem
H2=findobj(gcf,'Tag','abriMat');
img=get(H2,'UserData');

%Corta a imagem
H3=findobj(gcf,'Tag','Selredit');
X1=get(H3,'String');
X1=str2num(X1);

H4=findobj(gcf,'Tag','Selredity');
Y1=get(H4,'String');
Y1=str2num(Y1);

H5=findobj(gcf,'Tag','Selredit2');
X2=get(H5,'String');
X2=str2num(X2);

H6=findobj(gcf,'Tag','Selredity2');
Y2=get(H6,'String');
Y2=str2num(Y2);

img=img(Y2:Y1,X2:X1);
fimg=fimg(Y2:Y1,X2:X1);

set(H2,'UserData',img);
set(H1,'UserData',fimg);

image(img);

axis xy;

```

```

% atuamap; atualiza o mapa de cor utilizado nas imagens
%
%
%
%      Marcelo Silva Guimarães
%      Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos
%      Dept. de Engenharia Mecânica
%      Escola Politécnica de da Universidade de São Paulo
%      Av. Prof. Mello Moraes, 2231
%      CEP 05508-900
%      São Paulo, SP
%      BRASIL
%
%      E-mail: marcsg@usp.br

colormap(mapcor);
H=findobj(gcf,'Tag','mcor');
set(H,'UserData',mapcor);

%destaca o mapa de cor escolhido no menu

Dt=findobj(gcf,'Tag','atual');
tex=get(gcbo,'label');
set(Dt,'label',tex);

function carrega();
% carrega() função para definir a imagem e map de cores a serem
% carregados e carrega-los
%
% Funções utilizadas:
%      loadbmp;
%
%      Feito em 1998 por
%      Marcelo Silva Guimarães
%      Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos
%      Dept. de Engenharia Mecânica
%      Escola Politécnica de da Universidade de São Paulo
%      Av. Prof. Mello Moraes, 2231
%      CEP 05508-900
%      São Paulo, SP
%      BRASIL
%
%      E-mail: marcsg@usp.br

%Lê o nome do arquivo a ser carregado
arq=get(gcbo, 'String');
%Carrega-o
[Im, mapcor]=loadbmp(arq);
%Ajusta mapa de cores
colormap(mapcor);
H=findobj(gcf,'Tag','mcor');
set(H,'UserData',mapcor);
%Visualiza-o na figura
image(Im);
%Guarda a imagem
set(gcbo,'UserData',Im);

```

```

function confarq(a);
% confarq(a) função para a configuração dos recursos de manipulação de
arquivo
% do programa imgfmc
%
% Parâmetros de entrada:
%     a - figura onde será construída a janela
%
% Funções utilizadas:
%     carrega;
%     salva2;
%     salva3;
%
%     Feito em 1999 por
%
%     Marcelo Silva Guimarães
%     Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos
%     Dept. de Engenharia Mecânica
%     Escola Politécnica de da Universidade de São Paulo
%     Av. Prof. Mello Moraes, 2231
%     CEP 05508-900
%     São Paulo, SP
%     BRASIL
%
%     E-mail: marcsg@usp.br

```

```

%Abrir imagem
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.752941 0.752941 0.752941], ...
    'Position',[357 292.5 63 13.5], ...
    'String','Abrir Imagem:', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText1');

```

```

% função chamada: carrega;
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'Callback','carrega;', ...
    'Position',[356.25 277.5 63 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','abriMat');

```

```

%Salvar imagem filtrada
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'Position',[360 256.5 54 20], ...
    'String','Salvar Imagem Filtrada:', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText2');

```

```

% função chamada: salva2;
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'Callback','salva2;', ...
    'Position',[358.5 230 58.5 17.25], ...
    'Style','edit', ...

```

```

    'Tag','salvMat');

%Abrir Filtro
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'Position',[25.5 6.75 48 16.5], ...
    'String','Abrir Filtro:', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText3');

% função chamada: carrega;
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'Callback','carrega;', ...
    'Position',[66 9 51.75 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','AbriFilt');

%Salvar imagem sem filtrar
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'Position',[275 6.75 54 20], ...
    'String','Salvar Imagem Sem Filtrar:', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText2');

% função chamada: salva3;
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'Callback','salva3;', ...
    'Position',[330 6.75 58.5 17.25], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','salvMat');

```



```

function confbot(a);
% confarq(a) config. dos recursos de visualiza de imagem e filtragem
%
% Parâmetros de entrada:
%     a - figura onde será construída a janela
%
% Funções utilizadas:
%     implot;
%     CalcFlt;
%
%     Feito em 1999 por
%
%     Marcelo Silva Guimarães
%     Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos
%     Dept. de Engenharia Mecânica
%     Escola Politécnica de da Universidade de São Paulo
%     Av. Prof. Mello Moraes, 2231
%     CEP 05508-900
%     São Paulo, SP
%     BRASIL
%
%     E-mail: marcsg@usp.br

%Faz a filtragem
% função chamada: CalcFlt;
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'Position',[360.75 206.25 55.5 18], ...
    'Callback','CalcFlt(''abriMat'',''AbriFilt'');', ...
    'String','Calcular', ...
    'Tag','calcfilt');

%Plota a imagem da imagem filtrada
% função chamada: implot;
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'Position',[355 180 65 17], ...
    'Callback','implot(''calcfilt'');', ...
    'String','Imagem Limpa', ...
    'Tag','filtMat');

%Plota a imagem sem filtrar
% função chamada: implot;
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'Position',[364.5 156.75 50.25 15], ...
    'Callback','implot(''abriMat'');', ...
    'String','Imagem', ...
    'Tag','imaMat');

%Plota a imagem do filtro
% função chamada: implot;
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'Position',[216.75 5 40 20], ...
    'Callback','implot(''AbriFilt'');', ...
    'String','Filtro', ...
    'Tag','filting');

```

```

function a=confini();
% a=confini() função para a configuração de parâmetros iniciais do
% programa imgfmc
%
%     Parâmetro de saída:
%     a - figura onde se construirá a janela
%
%         Feito em 1999 por
%
%         Marcelo Silva Guimarães
%         Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos
%         Dept. de Engenharia Mecânica
%         Escola Politécnica de da Universidade de São Paulo
%         Av. Prof. Mello Moraes, 2231
%         CEP 05508-900
%         São Paulo, SP
%         BRASIL
%
%         E-mail: marcsg@usp.br

a=figure;
mat2=[ 0 0 0;0 0 1;0 .5 0;0 1 .5; .5 0 0;.5 0 .2; .3 .2 0; .1 .5 .3];
%Região onde será plotada as imagens
b = axes('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'CameraUpVector',[0 1 0], ...
    'Color',[1 1 1], ...
    'ColorOrder',mat2, ...
    'Position',[42 56.25 294 249.75], ...
    'Tag','Axes1', ...
    'XColor',[0 0 0], ...
    'YColor',[0 0 0], ...
    'ZColor',[0 0 0]);
%textos da janela
c = text('Parent',b, ...
    'Color',[0 0 0], ...
    'HandleVisibility','callback', ...
    'HorizontalAlignment','center', ...
    'Position',[0.498721 -0.0722892 0], ...
    'Tag','Axes1Text4', ...
    'VerticalAlignment','cap');
set(get(c,'Parent'),'XLabel',c);
c = text('Parent',b, ...
    'Color',[0 0 0], ...
    'HandleVisibility','callback', ...
    'HorizontalAlignment','center', ...
    'Position',[-0.0741688 0.496988 0], ...
    'Rotation',90, ...
    'Tag','Axes1Text3', ...
    'VerticalAlignment','baseline');
set(get(c,'Parent'),'YLabel',c);
c = text('Parent',b, ...
    'Color',[0 0 0], ...
    'HandleVisibility','callback', ...
    'HorizontalAlignment','right', ...
    'Position',[-0.14578 1.03313 0], ...
    'Tag','Axes1Text2', ...
    'Visible','off');

```

```

set(get(c,'Parent'),'ZLabel',c);
c = text('Parent',b, ...
    'Color',[0 0 0], ...
    'HandleVisibility','callback', ...
    'HorizontalAlignment','center', ...
    'Position',[0.498721 1.02108 0], ...
    'Tag','Axes1Text1', ...
    'VerticalAlignment','bottom');
set(get(c,'Parent'),'Title',c);
%quadros na janela
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.752941 0.752941 0.752941], ...
    'Position',[353.25 -1.5 86.25 316.5], ...
    'Style','frame', ...
    'Tag','Frame1');
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.752941 0.752941 0.752941], ...
    'Position',[0 -3 373.5 34.5], ...
    'Style','frame', ...
    'Tag','Frame2');

```

```

function confselr(a);
% confselr(a) dos recursos de edição de imagem
%
% Parâmetros de entrada:
%     a - figura onde será construída a janela
%
% Funções utilizadas:
%     ajustimg;
%
%     Feito em 1999 por
%
%     Marcelo Silva Guimarães
%     Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos
%     Dept. de Engenharia Mecânica
%     Escola Politécnica de da Universidade de São Paulo
%     Av. Prof. Mello Moraes, 2231
%     CEP 05508-900
%     São Paulo, SP
%     BRASIL
%
%     E-mail: marcsg@usp.br

% Recortar a imagem e o seu filtro em uma determinada região
% função chamada: ajustimg;
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'Position',[350 125 70 20], ...
    'Callback','ajustimg;',...
    'String','Selecionar Região', ...
    'Tag','Selreg');

% Xmax e Xmin
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'Position',[360 100 54 20], ...
    'String','Xmin:   Xmax:', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','Selreg2');

%Xmin
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'Position',[360 90 25 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','Selredit2');

%Xmax
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'Position',[385 90 25 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','Selredit');

```

```

%Ymin e Ymax
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'Position',[360 60 54 20], ...
    'String','Ymin:  Ymax:', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','Selreg3');
%Ymin
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'Position',[360 50 25 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','Selredity2');
%Ymax
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'Position',[385 50 25 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','Selredity');

```

```

function implot(nome);
% implot(nome) desenha a imagem na região do gráfico
%
% Parâmetros de entrada:
%     nome - da imagem a ser desenhada
%
%
%     Feito em 1999 por
%
%     Marcelo Silva Guimarães
%     Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos
%     Dept. de Engenharia Mecânica
%     Escola Politécnica de da Universidade de São Paulo
%     Av. Prof. Mello Moraes, 2231
%     CEP 05508-900
%     São Paulo, SP
%     BRASIL
%
%     E-mail: marcsg@usp.br

```

```

H=findobj(gcf,'Tag',nome);
tab=get(H,'UserData');
grid off;
image(tab);
axis xy;
function [X,map]=loadbmp(bmpfile)
% LOADBMP Load Microsoft Windows 3.x .BMP format image files.
%
%     [X,map]=LOADBMP(bmpfile) loads a .BMP format file specified
by
%     "bmpfile", returning the image data in variable "X" and the

```

```

% colormap in variable "map". The .BMP extension in the
filename
% is optional.
%
% Note: LOADBMP currently supports only uncompressed .BMP
files
% with at most 256 colors.
%
% See also SAVEBMP.
%
% Copyright (c) 1993 by
%
% Ralph Sucher
% Dept. of Communications Engineering
% Technical University of Vienna
% Gusshausstrasse 25/389
% A-1040 Vienna
% AUSTRIA
%
% Phone: +431-58801/3518
% Fax: +431-5870583
% Email: rsucher@email.tuwien.ac.at

if nargin~=1
    error('LOADBMP takes one argument, which is the name of the .BMP
file.');
```

end

```

if isempty(findstr(bmpfile, '.'))==1
    bmpfile=[bmpfile, '.bmp'];
end

fid=fopen(bmpfile, 'rb', 'ieee-le');
```

if fid== -1

```

    error('Can''t open .BMP file for input!');
end

% ----- BMP HEADER -----

% read file identifier

% bfType=fread(fid,1,'ushort');
% if bfType~=19778
%     fclose(fid);
%     error('Not a valid .BMP file!');
% end
bfType=fread(fid,2,'char');
if ~all(bfType == 'BM')
    fclose(fid);
error('Not a valid .BMP file!');
end

% read file length (bytes)
status=fseek(fid,0,'eof');
bfSize=ftell(fid);
status=fseek(fid,6,'bof');
```

% read bytes reserved for later extensions

```

dummy=fread(fid,1,'long');

% read offset from beginning of file to first data byte
bfOffs=fread(fid,1,'long');

% ----- BMP INFO-BLOCK -----

% *** bitmap information header ***

% read length of bitmap information header
biSize=fread(fid,1,'long');

% read width of bitmap
biWidth=fread(fid,1,'long');

% read height of bitmap
biHeight=fread(fid,1,'long');

% read number of color planes
biPlanes=fread(fid,1,'ushort');

% read number of bits per pixel
biBitCnt=fread(fid,1,'ushort');
nCol=2^biBitCnt;

% read type of data compression
biCompr=fread(fid,1,'long');
if biCompr~=0
    fclose(fid);
    error('LOADBMP currently supports only uncompressed .BMP files!');
end

% read size of compressed image
biSizeIm=fread(fid,1,'long');

% read horizontal resolution (pixels/meter)
biXPelsPerMeter=fread(fid,1,'long');

% read vertical resolution (pixels/meter)
biYPelsPerMeter=fread(fid,1,'long');

% read number of used colors
biClrUsed=fread(fid,1,'long');

% read number of important colors
biClrImportant=fread(fid,1,'long');

% *** colormap ***

MapLength=(bfOffs-54)/4;

% read colormap
map=zeros(4,MapLength);
map(:)=fread(fid,MapLength*4,'uchar');
map=map(3:-1:1,:)/255;

```

```

% ----- BITMAP DATA -----

ndata=bfSize-bfOffs;
Width=(ndata*8/biBitCnt)/biHeight;
X=zeros(Width,biHeight);
Xsize=Width*biHeight;

data=fread(fid,ndata,'uchar');
fclose(fid);

if biBitCnt==1
    x=zeros(1,ndata);
    for i=1:8
        X(i:8:Xsize)=fix((data'-x)/2^(8-i));
        x=x+X(i:8:Xsize)*2^(8-i);
    end
elseif biBitCnt==4
    X(1:2:Xsize)=fix(data/16);
    X(2:2:Xsize)=round(data'-X(1:2:Xsize)*16);
elseif biBitCnt==8
    X(:)=data;
elseif biBitCnt==24
    error('LOADBMP supports only images with at most 256 colors.');
```

else

```

    error('This is not a valid .BMP file!');
end

X=X(1:biWidth,biHeight:-1:1)'+1;
```



```

%menucor
%
% adaptação da subrotina colormenu do Matlab para realizar a mudança
% nos mapas de cores
% também está incluso o mapa de cores arcir
%
% funções utilizadas por este programa:
%     atuamap; - atualiza mapa de cores
%
%COLORMENU Add a color map menu to the current figure.
% Each of the menu choices operates on the colormap:
% HOT, PINK, COOL, BONE, JET, COPPER, FLAG and PRISM are names of
% functions which generate color maps.
% RAND is a random color map.
% BRIGHTEN increases the brightness.
% DARKEN decreases the brightness.
% FLIPUD inverts the order of the colormap entries.
% FLIPLR interchanges the red and blue components.
% PERMUTE cyclic permutations: red -> blue, blue -> green, green ->
red.
% SPIN spins the colormap, which is a rapid sequence of FLIPUD's.
% REMEMBER pushes a copy of the current color map onto a stack.
% RESTORE pops a map from the stack (initially, the stack contains
the
%     map in use when COLORMENU was invoked.)
% DONE deletes the colormenu.

% Copyright (c) 1984-97 by The MathWorks, Inc.
% $Revision: 5.2 $ $Date: 1997/04/08 05:31:15 $
%
%     Marcelo Silva Guimarães
%     Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos
%     Dept. de Engenharia Mecânica
%     Escola Politécnica de da Universidade de São Paulo
%     Av. Prof. Mello Moraes, 2231
%     CEP 05508-900
%     São Paulo, SP
%     BRASIL
%
%     E-mail: marcsg@usp.br

stackofmaps = colormap;
lengthofmap = size(stackofmaps,1);

colormenuh = uimenu(gcf,'label','colormaps','Tag','mcor');

uimenu(colormenuh,'label','*****','Tag','atual');
uimenu(colormenuh,'label','*****');
%gray
uimenu(colormenuh,'label','gray','callback','mapcor=gray(256);
atuamap; ');
%hsv
uimenu(colormenuh,'label','hsv','callback','mapcor=hsv(256); atuamap;
');
%hot
uimenu(colormenuh,'label','hot','callback','mapcor=hot(256); atuamap;
');

```

```

%pink
uimenu(colormenuh,'label','pink','callback','mapcor=pink(256);
atuamap; ');
%cool
uimenu(colormenuh,'label','cool','callback','mapcor=cool(256);
atuamap; ');
%bone
uimenu(colormenuh,'label','bone','callback','mapcor=bone(256);
atuamap; ');
%jet
uimenu(colormenuh,'label','jet','callback','mapcor=jet(256); atuamap;
');
%copper
uimenu(colormenuh,'label','copper','callback','mapcor=copper(256);
atuamap; ');
%flag
uimenu(colormenuh,'label','flag','callback','mapcor=flag(256);
atuamap; ');
%prism
uimenu(colormenuh,'label','prism','callback','mapcor=prism(256);
atuamap; ');
%arcir
uimenu(colormenuh,'label','arcir','callback','mapcor=wk1read(''arcir''
); atuamap;');
%rand
uimenu(colormenuh,'label','rand', 'callback','mapcor=rand(256,3);
atuamap;');
%brighten
uimenu(colormenuh,'label','brighten','callback','mapcor=brighten(.25);
atuamap;');
%dark
uimenu(colormenuh,'label','darken','callback','mapcor=brighten(-.25);
atuamap;');
%flipud
uimenu(colormenuh,'label','flipud','callback','mapcor=flipud(colormap)
; atuamap;');
%fliplr
uimenu(colormenuh,'label','fliplr','callback','mapcor=fliplr(colormap)
; atuamap;');
%permute
uimenu(colormenuh,'label','permute','callback','c = colormap;
mapcor=c(:,[2 3 1]); atuamap;');

%help
uimenu(colormenuh,'label','help','callback','help colormenu');

EditText3= 'maps';

```

```

function salva2();
% salva2() função para definir a imagem e mapa de cores a serem salvos
e salva-los
%
%
%
% Funções utilizadas:
%     savebmp;
%
%
%
%     Feito em 1998 por
%
%     Marcelo Silva Guimarães
%     Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos
%     Dept. de Engenharia Mecânica
%     Escola Politécnica de da Universidade de São Paulo
%     Av. Prof. Mello Moraes, 2231
%     CEP 05508-900
%     São Paulo, SP
%     BRASIL
%
%     E-mail: marcsg@usp.br

%seleciona a imagem que está sendo visualizada no gráfico
H=findobj(gcf,'Tag','calcfilt');

%Lê o nome do arquivo em que se deve salvar a imagem
arq=get(gcbo,'String');
%carrega a imagem a ser salva
Im=get(H,'UserData');
%carrega mapa de cores que se deve salvar a imagem
HC=findobj(gcf,'Tag','mcor');
colorm=get(HC,'UserData');
%salva a imagem
savebmp(arq,Im,colorm);

```

```

function salva3();
% salva3() função para definir a imagem e mapa de cores a serem salvos
e salva-los
%
%
%
% Funções utilizadas:
%     savebmp;
%
%
%
%     Feito em 1998 por
%
%     Marcelo Silva Guimarães
%     Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos
%     Dept. de Engenharia Mecânica
%     Escola Politécnica de da Universidade de São Paulo
%     Av. Prof. Mello Moraes, 2231
%     CEP 05508-900
%     São Paulo, SP
%     BRASIL
%
%     E-mail: marcsg@usp.br

% seleciona a imagem não filtrada
H=findobj(gcf,'Tag','abriMat');

%Lê o nome do arquivo em que se deve salvar a imagem
arq=get(gcf,'String');
%carrega a imagem a ser salva
Im=get(H,'UserData');
%carrega mapa de cores que se deve salvar a imagem
HC=findobj(gcf,'Tag','mcor');
colorm=get(HC,'UserData');
%salva a imagem
savebmp(arq,Im,colorm);

```

```

function savebmp(bmpfile,X,map)
% SAVEBMP  Save Microsoft Windows 3.x .BMP format image files.
%
%          SAVEBMP(bmpfile,X,map) saves a .BMP format file specified
by
%          "bmpfile". The .BMP extension in the filename is optional.
%
%          The input arguments for SAVEBMP are as follows:
%
%          bmpfile  A string containing the name of the .BMP file to
create
%          X        The image data to save (8 bit max)
%          map      The colormap of the image
%
%          Note: SAVEBMP currently supports only uncompressed .BMP
files
%                  with at most 256 colors.
%
%          See also LOADEBMP.
%
%          Copyright (c) 1993 by
%
%          Ralph Sucher
%          Dept. of Communications Engineering
%          Technical University of Vienna
%          Gusshausstrasse 25/389
%          A-1040 Vienna
%          AUSTRIA
%
%          Phone: +431-58801/3518
%          Fax:   +431-5870583
%          Email: rsucher@email.tuwien.ac.at

if nargin~=3
    error('Wrong number of input arguments! Type HELP SAVEBMP for
info.');
```

```

end

if isempty(findstr(bmpfile, '.'))==1
    bmpfile=[bmpfile, '.bmp'];
end

fid=fopen(bmpfile, 'rb');
if fid==-1
    fclose(fid);
    error('File already exists! Please choose another filename.');
```

```

end

[nCol,rgb]=size(map);
if nCol>256
    error('SAVEBMP supports only images with at most 256 colors.');
```

```

end
if rgb~=3
    error('The colormap must have 3 columns: [R,G,B].');
```

```

end
if min(map(:))<0 | max(map(:))>1
    error('The colormap must have values in [0,1].');
```

```

end

```

```

% determine number of bits per pixel
if nCol<=2
    biBitCnt=1;
elseif nCol<=16
    biBitCnt=4;
else
    biBitCnt=8;
end

% truncate image data
X=round(X);
xmin=find(X<1);
xmax=find(X>nCol);
X(xmin)=ones(1,length(xmin));
X(xmax)=nCol*ones(1,length(xmax));

% determine image size
[biHeight,biWidth]=size(X);
Width=ceil(biWidth*biBitCnt/32)*32/biBitCnt;
ndata=Width*biHeight*biBitCnt/8;
X=[X(biHeight:-1:1,:)-1 zeros(biHeight,Width-biWidth)]';
Xsize=Width*biHeight;

fid=fopen(bmpfile,'wb');

% ----- BMP HEADER -----

% write file identifier
fwrite(fid,'BM','uchar');

% write file length (bytes)
bfSize=54+4*nCol+ndata;
fwrite(fid,bfSize,'long');

% set bytes reserved for later extensions to zero
fwrite(fid,0,'long');

% write offset from beginning of file to first data byte
bfOffs=54+4*nCol;
fwrite(fid,bfOffs,'long');

% ----- BMP INFO-BLOCK -----

% *** bitmap information header ***

% write length of bitmap information header
fwrite(fid,40,'long');

% write width of bitmap
fwrite(fid,biWidth,'long');

% write height of bitmap
fwrite(fid,biHeight,'long');

% write number of color planes
fwrite(fid,1,'ushort');

% write number of bits per pixel
fwrite(fid,biBitCnt,'ushort');

```

```

% write type of data compression
fwrite(fid,0,'long');

% write size of compressed image
fwrite(fid,0,'long');

% write horizontal resolution
fwrite(fid,0,'long');

% write vertical resolution
fwrite(fid,0,'long');

% write number of used colors
fwrite(fid,0,'long');

% write number of important colors
fwrite(fid,0,'long');

% *** colormap ***

map=[fix(255*map(:,3:-1:1)) zeros(nCol,1)]';
fwrite(fid,map,'uchar');

% ----- BITMAP DATA -----

if biBitCnt==1
    x=zeros(1,ndata);
    for i=1:8
        x=x+2^(8-i)*X(i:8:Xsize);
    end
    fwrite(fid,x,'uchar');
elseif biBitCnt==4
    x=16*X(1:2:Xsize)+X(2:2:Xsize);
    fwrite(fid,x,'uchar');
else
    fwrite(fid,X,'uchar');
end

fclose(fid);

```

Apêndice III

Análise de Incerteza, Instrumentação e Calibração

APÊNDICE III - ANÁLISE DE INCERTEZA, INSTRUMENTAÇÃO E CALIBRAÇÃO

III.1. Análise de incerteza

Todas as análises foram feitas para uma confiabilidade de 95%, ou seja, 2σ , onde σ é o desvio padrão.

III.2. Medição da vazão de injeção

A medição da vazão experimental (Q_E) é obtido pela medição do deslocamento do nível volumétrico da pipeta (ΔV), como descrito na Seção 3.3 e o intervalo de injeção (Δt).

$$Q_E = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (\text{III.1})$$

O deslocamento volumétrico tem um limite de desvio ($B_{\Delta V}$) desprezível em relação ao limite de precisão ($P_{\Delta V}$) igual a 0,05 ml, que é a metade da menor escala do instrumento. Desta forma, a incerteza ($U_{\Delta V}$) continua sendo igual a 0,05 ml.

Quanto à medição do intervalo de tempo da injeção, a incerteza está somente associada ao limite de precisão identificado na rampa do gráfico dos dados da pressão de injeção (ver gráfico da Figura 3.17), 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. Desta forma, pode-se colocar com segurança um valor de 0,005 s de incerteza ($U_{\Delta t}$). A Equação III.2 determina a incerteza da vazão.

$$\frac{U_{Q_E}}{Q_E} = \sqrt{\left(\frac{U_{\Delta V}}{\Delta V}\right)^2 + (-1)^2 \left(\frac{U_{\Delta t}}{\Delta t}\right)^2} \quad (\text{III.2})$$

Tomando como base que os líquidos injetados tiveram um volume de injeção de no mínimo, 2,0 ml e, o tempo de injeção efetivo era de 0,65 s, tem-se uma razão da incerteza da vazão de: $U_{Q_E}/Q_E = 0,0262$ ou 2,62%.

III.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 Tabela III.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 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 0,5 mbar.

Tabela III.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 25	0,5	0,2	0,54 mbar ou 54 Pa
Mano-vacuômetro de Hg	de 25 a 2000	0,0	0,943	0,94 mbar ou 94 Pa

Para o mano-vacuômetro de mercúrio, o limite de desvio (B) está vinculado à variação da densidade do mercúrio com a temperatura, que se torna nula quando associada à medição feita no barômetro, ou seja, este desvio ocorre na mesma proporção nos dois instrumentos e como a medição final é a diferença das duas medidas, este desvio acaba sendo subtraído. 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.

III.4. Medição da pressão de injeção

A calibração do transdutor de pressão foi feita em duas etapas. A primeira etapa foi a determinação da curva de resposta do transdutor de pressão, modelo XTE 190-100A, com escala de 0 a 700 kPa. Os valores medidos e estimados pelo ajuste de curva encontrado pelo método dos mínimos quadrados estão na Tabela III.2 e estão representados no gráfico da Figura III.1.

Tabela III.2 - 1º Etapa de calibração do transdutor de pressão.

Pressão Manométrica [kgf/cm ²]	Pressão absoluta [kgf/cm ²]	Pressão absoluta [Pa]	Leitura do multímetro [mV]	Valor estimado [mV]	Erro [mV]
0,0000	0,9511	93272,5	12,04	11,91	0,13
1,1125	2,0636	202373,2	27,61	27,69	-0,08
3,1625	4,1136	403412,8	56,8	56,77	0,03
1,0625	2,0136	197469,8	26,94	26,99	-0,05
2,9375	3,8886	381347,5	53,5	53,58	-0,08
5,0000	5,9511	583612,8	82,9	82,84	0,06
$\Sigma (\text{Erro})^2$					0,0454
SEE =					9,53E-02

Fig. III.1 - Representação gráfica da curva do transdutor de pressão.

A equação de conversão linear da leitura no transdutor para o valor em Pascal é:

$$P = 6913,38 * mV + 10910,47 \quad (\text{III.3})$$

O valor *SEE* ("Standard Error of Estimate") é o desvio padrão devido a correção dos valores estimados pela curva dada pela Equação III.3, e pode ser calculado segundo a Equação III.4, conforme a norma da ANSI/ASME PTC 19.1 Parte I,

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum (Erro)^2}{N - 2}} \quad (III.4)$$

onde, $\sum (Erro)^2$ é a somatória das diferenças dos valores estimados com os valores lidos em tal procedimento e, *N* é o números de amostras.

Sendo assim, o valor de $\pm 2 \cdot SEE$ corresponde ao intervalo de confiança de 95% nos valores da curva estimada e convertido em Pascal é de 1317,9 Pa, convertido pela Equação III.3.

Os instrumentos utilizados estão na Tabela III.3, onde constam a sua marca, tipo, modelo, escala, resolução. O transdutor era excitado com uma voltagem de $10,00 \pm 0,005$ V. Os limites de desvio, ou erros sistemáticos, da leitura do multímetro é de 0,08% do maior valor utilizado (83 mV) mais 0,005 V, segundo o fabricante e, da leitura do manômetro é de 0,10% do maior valor medido neste procedimento (5 kgf/cm^2). Os limites de precisão correspondem à metade da resolução do equipamento. Os desvios de leitura do barômetro são totalmente desprezíveis em relação aos demais. Todos limites de desvio e de precisão, dados da tabela, foram convertidos em Pa conforme a linearidade encontrada na Equação III.3.

Tabela III.3 - Descrição e desvios dos equipamentos utilizados na 1º etapa.

Equipamento	Multímetro	Manômetro Padrão
Tipo	digital	analógico
Escala	0 a 400 [mV]	0 a 20 [kgf/cm ²]
Fabricante	Minipa	Mensor
Modelo	ET 2600	2793
Resolução	0,100 [mV]	0,0250 [kgf/cm ²]
Erro Sist.	0,071 [mV]	0,0050 [kgf/cm ²]
Erro Aleatório	0,050 [mV]	0,0125 [kgf/cm ²]
Lim. desvio: B	490,8 [Pa]	490,3 [Pa]
Lim. precisão: P	345,7 [Pa]	1225,8 [Pa]
Incerteza: U	600,3 [Pa]	1320,2 [Pa]

Desta forma, combinando as incertezas do manômetro (U_{mano}), do multímetro (U_{mult}) e da curva de ajuste ($2*SEE = 1317,9$ Pa) , tem-se o valor da incerteza da primeira etapa igual a 1959,5 Pa, conforme a Equação III.5:

$$U_1 = \sqrt{(U_{mano})^2 + (U_{mult})^2 + (2*SEE)^2} = 1959,5 \text{ Pa} \quad (\text{III.5})$$

A 2º etapa corresponde à calibração do condicionador de sinal e o computador que possui a placa de aquisição de dados. Era introduzida uma tensão conhecida na entrada no condicionador de sinal que era medida pelo mesmo multímetro utilizado na 1º etapa e comparado com a leitura feita pelo computador. O condicionador de sinal esta ajustado no canal "3" para um ganho nominal de 50 vezes. Desta forma, foi levantado os seguintes dados representados na Tabela III.4, onde a primeira coluna é a tensão introduzida, a seguir tem-se leitura visualizada no monitor do computador (o valor da voltagem é dividida pelo

ganho nominal, através do programa computacional de aquisição de dados), na terceira coluna está o ganho real do sistema, na quarta coluna é a tensão estimada por ajuste de curva e, por fim, o erro estimado quando se faz a correção por regressão linear.

Para compensar este erro, foi levantada a curva do condicionador de sinal com a placa de aquisição de dados, resultando na Equação III.6. No caso, V_e é a tensão de entrada e, V_s é a tensão lida.

$$V_e = 0,9913 * V_s - 0,1216 \quad (\text{III.6})$$

Tabela III.4 - Calibração do canal do transdutor de pressão (2º etapa).

Tensão na entrada	Leitura no monitor (amplificação / 50)	Ganho real	Valor estimado	Erro devido estimativa
81,3	82,08	50,480	81,243	0,057
70,7	71,48	50,552	70,735	-0,035
60,0	60,66	50,550	60,010	-0,010
50,5	51,09	50,584	50,523	-0,023
40,7	41,21	50,627	40,729	-0,029
30,58	30,96	50,621	30,568	0,012
20,28	20,56	50,690	20,259	0,021
12,16	12,38	50,905	12,150	0,010
			SEE =	0,0272

Fig. III.2 - Gráfico levantado na 2ª etapa.

Na Tabela III.5, são expostas as especificações dos equipamentos. O erro sistemático, ou limite de desvio de toda esta etapa está somente associada aos erros desta calibração que são: (1) erro da regressão linear e (2) erro do multímetro utilizado. Como já vimos na 1ª etapa, a incerteza do multímetro é de 600,3 Pa, e a incerteza devido ao ajuste é de $2 \cdot SEE$ que é de 0,0272 mV, ou 188,0 Pa. Logo a raiz quadrada da soma dos quadrados destes erros é de 629,1 Pa, representado na Tabela III.5, na linha do limite de desvio. Os erros nas unidades de milivolts, foram convertidos em Pa conforme a constante da Equação III.3. Os erros aleatórios estão associados: (1) transitório da abertura do injetor encontrado nos dados e está colocado na coluna do condicionador de sinais da Tabela III.5, que pode ser tomado como o dobro do desvio da média da amostragem (amostragem acima de 30 amostras o "t" de Student para uma confiabilidade de 95% é igual a 2, logo $P = t \cdot S$, segundo a norma ANSI/ASME PTC 19.1 Parte I) e, (2) a metade da resolução da placa de aquisição que é de 12 bits, na faixa de 0 a 5 V e dividido pelo ganho nominal de 50, correspondendo ao valor de 0,01221 mV. A associação destes erros aleatórios, que é

determinada pela raiz quadrada da soma dos quadrados destes, é de 0,06456 mV, ou 446,4 Pa, como mostrada no limite de precisão. Assim, a incerteza U_2 desta etapa é:

$$U_2 = \sqrt{(B_2)^2 + (P_2)^2} \quad (\text{III.7})$$

Portanto, a incerteza total do sistema de aquisição dos dados de pressão é a associação das incertezas encontradas nas duas etapas que está representada na seguinte Equação III.8.

$$U_p = \sqrt{(U_1)^2 + (U_2)^2} \quad (\text{III.8})$$

que resolvendo, $U_p = \sqrt{(1959,5)^2 + (771,5)^2} = 2105,9 \text{ Pa.}$

Tabela III.5 - 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	50	1 / 50 ("software")
Fabricante	Lynx	Lynx
Modelo	Msc1000	Cad 1236
Resolução	-	12 bits
Erro Sist.	-	-
Erro Aleatório	0,0634 [mV]	0,01221 [mV]
Limite desvio (B_2):	629,1 [Pa]	
Limite precisão (P_2):	446,4 [Pa]	
Incerteza (U_2):	771,4 [Pa]	

Cabe ressaltar que o transdutor de pressão está na linha de injeção a 0,5 metros do injetor e sua temperatura praticamente não se diferencia da temperatura ambiente, portanto, não sofre desvios devido a temperatura.

III.5. Medição da temperatura de injeção

A calibração da temperatura do sistema de injeção segue o mesmo raciocínio da 2ª etapa da calibração do transdutor de pressão que é a calibração do condicionador de sinal e com o computador que possui a placa de aquisição de dados. Era introduzida uma tensão conhecida na entrada do condicionador de sinal que era medida pelo mesmo multímetro utilizado na calibração do transdutor e comparado com a leitura feita pelo computador. O condicionador de sinal está ajustado no canal "2" para um ganho nominal de 300 vezes. Desta forma, foram levantados os seguintes dados representados na Tabela III.6, onde a primeira coluna é a tensão introduzida, a seguir tem-se leitura visualizada no monitor do computador (o valor da voltagem é dividida pelo ganho nominal, através do programa computacional de aquisição de dados), na terceira coluna está o ganho real do sistema, na quarta coluna é a tensão estimada por ajuste de curva e por fim, erro estimado quando se faz a correção por regressão linear.

A curva do condicionador de sinal com a placa de aquisição de dados foi levantada, resultando na Equação III.9, que aproxima os valores da leitura para a verdadeira medição. No caso, V_e é a tensão de entrada e, V_s é a tensão lida neste canal.

$$V_e = 0,99878 * V_s - 0,0021231 \quad (\text{III.9})$$

A seguir, tem a equação de conversão da tensão em temperatura °C do termopar do tipo "T" e, segundo o manual do fabricante "Omega", tem uma variação de 0,03 °C.

$$T = 2,5928E-2 * ddp - 7,602961E-7 * ddp^2 + 4,637791E-11 * ddp^3 - 2,165394E-15 * ddp^4 + 6,048144E-20 * ddp^5 - 7,293422E-25 * ddp^6 \quad (III.10)$$

onde, T é a temperatura na junção do termopar e ddp é a tensão devido a diferença de temperatura entre a junção e o "ponto zero", feito de gelo fundente.

Tabela III.6 - Calibração do canal "2" do termopar.

Tensão na entrada	Leitura no monitor (amplificação / 300)	Ganho real	Valor estimado	Erro devido estimativa
16,67	16,662	299,856	16,680	-0,010
8,15	8,129	299,227	8,137	0,013
7,21	7,193	299,293	7,200	0,010
5,49	5,480	299,454	5,485	0,005
3,61	3,611	300,083	3,613	-0,003
3,31	3,309	299,909	3,311	-0,001
2,67	2,672	300,225	2,673	-0,003
1,88	1,887	301,117	1,887	-0,007
1,61	1,610	300,000	1,610	0,000
0,92	0,923	301,043	0,922	-0,002
0,74	0,743	301,338	0,742	-0,002
			SEE =	0,007434

Fig. III.3 - Gráfico do canal "2".

Na Tabela III.7, são expostas as especificações dos equipamentos. O erro sistemático, ou limite de desvio de toda esta etapa está somente associada aos erros desta calibração que são: (1) erro da regressão linear e (2) erro do multímetro utilizado. Neste caso, como a leitura é feita até 16,67 mV, a incerteza do multímetro é de 0,0635 mV ou 1,64 °C (o limite de desvio, ou erro sistemático, da leitura do multímetro é de 0,08% do valor utilizado mais 0,05 mV associada com o limite de precisão que é de 0,005 mV) e a incerteza devido ao ajuste é de $2*SEE$ que é de 0,01487 mV, ou 0,39 °C. Logo a raiz quadrada da soma dos quadrados destes erros é de 1,68 °C, representado na Tabela III.7, na linha do limite de desvio. Os erros nas unidades de volts, foram convertidos em °C conforme a constante da Equação III.10. Os erros aleatórios estão associados: (1) ruído comumente encontrado nos dados e está colocado na coluna do condicionador de sinais, no caso, é o dobro do desvio padrão da amostragem, e (2) a metade da resolução da placa de

aquisição que é de 12 bits, na faixa de 0 a 5 V e dividido pelo ganho nominal de 300, correspondendo ao valor de 2,034 μV , ou 0,053 $^{\circ}\text{C}$. A associação destes erros aleatórios, que é determinada pela raiz quadrada da soma dos quadrados destes, é de 0,054 $^{\circ}\text{C}$, como mostrada no limite de precisão. Assim, a incerteza U_T desta etapa é:

$$U_T = \sqrt{(B_T)^2 + (P_T)^2} \quad (\text{III.11})$$

Desta forma, a incerteza total da temperatura de injeção é de 1,7 $^{\circ}\text{C}$.

Tabela III.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	1 / 300 ("software")
Fabricante	Lynx	Lynx
Modelo	Msc1000	Cad 1236
Resolução	-	12 bits
Erro sistemático	-	-
Erro aleatório	0,013 [$^{\circ}\text{C}$]	2,034 [μV] $\approx$ 0,053 [$^{\circ}\text{C}$]
Limite de desvio (B_T):		1,68 [$^{\circ}\text{C}$]
Limite de precisão (P_T):		0,054 [$^{\circ}\text{C}$]
Incerteza (U_T):		1,68 [$^{\circ}\text{C}$]

III.6. Determinação do coeficiente de descarga

Para determinação do coeficiente de descarga (C_D) foi utilizado como fluido de teste o querosene, que era injetado no próprio injetor da bancada, com pressões de injeção (P_0) previamente determinadas e medidas pelo transdutor, com uma incerteza de 2106 Pa. A vazão experimental (Q_E) era 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 4,5 s. A variação máxima da vazão é de 2,62 %, como foi visto. O volume específico (v_l) do querosene utilizado foi medido em nosso laboratório e era de 0,00129 m³/kg a uma temperatura ambiente de 20°C. Os limites de variação desta densidade, conforme especificações de qualidade da Petrobrás é de $\pm 0,00005$ m³/kg. O diâmetro do bocal (D_b) é de 0,3025 mm, com precisão de 0,0005 mm, assim a área (A) do bocal é de 0,0071869 mm². A pressão da câmara (P_∞) era a pressão atmosférica que era de 93,66 kPa. Assim, a equação que determina o coeficiente de descarga baseada na Equação de Bernoulli é:

$$C_D = \frac{Q_E}{A * \sqrt{2 * v_l * (P_0 - P_\infty)}} \quad (\text{III.12})$$

onde a área é

$$A = \frac{\pi * D_b^2}{4}$$

O erro da fórmula devido aos desvios carregados em cada termo da Equação III.12, pode ser considerado um erro sistemático (B_{CD}). Com isso, podemos escrever que o erro sistemático do coeficiente de descarga é obtido pela Equação III.13, onde os termos com U são as incertezas das respectivas medições obtidas nas seções anteriores, com exceção da

área que foi substituída pelo erro admitido na medição do diâmetro e, ressalvando que os coeficientes elevados ao quadrado são os expoentes dos respectivos termos na equação.

$$\left(\frac{B_{C_D}}{C_D}\right)^2 = (1)^2 \left(\frac{U_{Q_E}}{Q_E}\right)^2 + (-2)^2 \left(\frac{U_{D_b}}{D_b}\right)^2 + \left(\frac{-1}{2}\right)^2 \left(\frac{U_{v_l}}{v_l}\right)^2 + \left(\frac{-1}{2}\right)^2 \left(\frac{U_p}{(P_0 - P_\infty)}\right)^2 \quad (\text{III.13})$$

Resolvendo, encontra-se a variação (B_{C_D} / C_D) de 3,32 %.

Para determinação do erro aleatório, foram realizados 11 ensaios e estão especificados os dados na Tabela III.8.

Tabela III.8 - Ensaio para determinação do coeficiente de descarga (C_D).

Ensaio	Diferença de pressões ($P_0 - P_\infty$) [kPa]	ΔV [ml]	Δt [s]	Q_E [ml/s]	C_D
1	205,4	7,07	4,615	1,532	0,919
2	207,0	6,98	4,615	1,512	0,910
3	207,2	6,97	4,615	1,510	0,912
4	207,4	6,95	4,600	1,511	0,909
5	208,8	7,01	4,595	1,526	0,918
6	404,2	9,81	4,545	2,158	0,928
7	406,5	9,94	4,590	2,166	0,930
8	407,2	9,92	4,600	2,157	0,929
9	554,7	11,65	4,615	2,524	0,929
10	554,8	11,70	4,625	2,530	0,931
11	555,9	11,74	4,625	2,538	0,933
Média					0,922
Desvio padrão					0,0090

Desta forma, é possível determinar o erro aleatório de tal coeficiente. Para uma confiabilidade de 95% e um número de 11 amostras, o "t" de Student é de 2,228 que, multiplicado pelo desvio padrão, obtém-se o limite de precisão (P_{Cd}) de 0,0200.

Como o limite de desvio (B_{Cd}) do coeficiente de descarga é de 3,32%, determinado pela Equação III.14, oferecendo um desvio de 0,0306 em tal coeficiente com valor médio de 0,922. Associando estes limites tem-se:

$$U_{Cd} = \sqrt{(B_{Cd})^2 + (t.S_{Cd})^2} = \sqrt{(B_{Cd})^2 + (P_{Cd})^2} = 0,0366 \quad (\text{III.14})$$

III.6. Determinação da vazão teórica

A vazão teórica é resultado da seguinte equação:

$$Q_T = C_D * \left(\frac{\pi.D_b^2}{4} \right) * \sqrt{2 * v_l * (P_0 - P_\infty)} \quad (\text{III.15})$$

De todos estes termos desta equação, encontrados suas respectivas incertezas, logo a incerteza da determinação teórica é:

$$\begin{aligned} \frac{U_{Q_T}}{Q_T} &= \sqrt{(1)^2 \left(\frac{U_{C_D}}{C_D} \right)^2 + (2)^2 \left(\frac{U_{D_b}}{D_b} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \right)^2 \left(\frac{U_{v_l}}{v_l} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \right)^2 \left(\frac{U_P}{(P_0 - P_\infty)} \right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{0,0366}{0,922} \right)^2 + 4 \left(\frac{0,0005}{0,3025} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{0,00005}{0,00129} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{2106}{200000} \right)^2} = 0,0446 \text{ ou } 4,46 \% \end{aligned} \quad (\text{III.16})$$

III.7. Precisão dimensional da imagem

Para determinar as dimensões da onda de choque, ou o comprimento da parte líquida do jato, utiliza-se 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 de referência é o diâmetro do corpo do injetor, que é de 50,7 mm e está esquematizado na Figura III.4 e uma fotografia desta verificação se encontra na Figura III.5. 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 se encontra na Tabela III.9, a seguir.

Tabela III.9 - 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. III.4 - Esquema do procedimento da análise dimensional

Fig. III.5 - Imagem do tubo de ensaio.

Apêndice IV

Algumas Propriedades Termodinâmicas

Curva de saturação da n-dodecano

Fonte: 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 n.º 96/02070-9.

Gráfico de massa específica em função da temperatura do querosene

Fonte: Kern, D. Q. , 1980, Processos de Transferência de Calor, Ed. Guanabara Dois.

QUEROSENE ILUMINANTE

Outras denominações: quero
 Código do produto: 640
 Última revisão: julho/1999

Característica		Unidade	Método(s)		Limites	
			nacional	estrangeiro	mín.	máx.
Acidez		-	MB 296	D 1093	[a]	[a]
Corrosividade ao cobre -	a 50 °C, 3h	-	MB 287	D 130	-	1
	a 100 °C, 2h	-	MB 287	D 130	-	1
Densidade a 20/4 °C		-	MB 104	D 4052 D 1298	0,760	0,822
Destilação -	80% recuperados ou	°C	MB 45	D 86	-	285
	ponto final de ebulição	°C	MB 45	D 86	-	300
Enxofre total		% p	MB 327	D 1266 D 4294	-	0,30
Ponto de fulgor		°C	MB 42	D 56	40	-
Ponto de fuligem		mm	MB 295	D 1322	22	-
Viscosidade cinemática -	a 20 °C ou	cSt	MB 293	D 445	-	2,7
	a -20 °C	cSt	MB 293	D 445	-	8,0

Documentos

Regulamento técnico CNP-11/82 - resolução 04/82.
 Ofício nº 037/99/IP/ANP/RJ de 29/06/1999.

Observações

[a] será especificado como negativo o valor da acidez, pelo método MB 296, sempre que houver a possibilidade do produto ter sofrido tratamento ácido.

Fonte: http://www.petrobras.com.br/catalogo/mep_QU01.htm

(1999)

CURVA DE SATURAÇÃO DO MERCÚRIO

Fonte: Perry, R. H., e Green, 1984, D., Perry's Chemical Engineers Handbook, McGraw-Hill.

Apêndice V

Alguns Desenhos e Esquema do Projeto

Esquema parcial - montagem e algumas dimensões

Esquema do sensor de posição

Obs.: Este dispositivo fica acoplado à haste, externo do injetor e da câmara de vácuo.

1	2	3	4
A	<p>Tolerância: ± 0.1</p> <p>Material: ABNT-1010</p> <p>Quantidade: 02</p>		A
B			B
C	<p>Tolerância: ± 0.1</p> <p>Material: ABNT-1010</p> <p>Quantidade: 01</p>		C
D			D
Escala: 1:1		Nome: Marcelo Mendes Vieira	Assinatura: Responsável: José R. Simões Moreira
		Título: Alojamento-guia da haste na base e tampa dos alojamentos-guia	
		Responsável: Marcelo Mendes Vieira	
		Assinatura:	Data: 21/08/98
Desenho			
1	2	3	4

Aro Interno - Tubo do Visor

Apêndice VI

Lista de Procedimentos do Ensaio

Ensaio _____ Data: ____/____/____ Hora: ____:____

Procedimento iniciais:

Ligar: disjuntores, computadores, sensores, câmara CCD

Verificar válvulas-registro:

Sistema de vácuo

Sistema de injeção

Sistema de aquecimento

Colocar gelo no ponto zero

Ligar Compressor (à 4bar) e abrir válvula do cil. pneumático

Regular o nível do líquido injetado e pressurizá-lo

Ligar Bomba de óleo

Acionar sistema de aquecimento (Termostato, Chave liga-desl., Variac, Disjuntores)

Acionar sistema de vácuo (com N₂ líquido)

Preparar o diretório das figuras (c:\jato\t__ _ \img1. a 5.bmp)

Acionar programas: Aqdados, Dt-acquire, Acq2hst, Matlab (c/ diret. corrente, filsub e mating)

Monitorar o Schlieren pelo programa Dt-acquire

- Temperat. Ambiente (T_{amb}): _____ °C
- Pressão atmosférica (P_{atm}): _____ mmHg
- Pressão de injeção (P_o): _____ kPa
- Temper. de injeção (T_o): _____ °C
- Press. de reservat. (P_{∞}) : _____ Pa (ou x 7,501.E-3 _____ mmHg)
- Leitura do vacuômetro: (x0,01) _____ mbar
- ou leitura do mano-vacuômetro (P_m): _____ mmHg ($P_m = P_{atm} - P_{\infty}$)
- Arquivo ou diretório: __t__ _ _ ($P_o=0,1$ MPa; $T_o=10x^{\circ}C$ e; $P_{\infty}= daPa, CPa, Pa$)

Pressurizar com N₂ o reservatório

Monitorar: T_o , P_o , P_{∞} e V_i .

Alcançadas as condições de ensaio:

Acionar o programa Acq2hst

Registrar o volume inicial: $V_i=$ _____ml

Acionar o Aqdados

Ativar Acq2hst (Trigger="ativa" e acionar comando Acquire), acionar Aqdados

Registrar o volume final: $V_f=$ _____ml

Salvar figuras no diretório correspondente

Salvar dados no arquivo correspondente

Registrar $P_o=$ _____ e o desvio padrão: $Dp=$ _____

Registrar $T_o=$ _____ e o desvio padrão: $Dt=$ _____

Registrar Tempo inicial da injeção: $t_i=$ _____segundos

Registrar Tempo final da injeção: $t_f=$ _____segundos.