

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO EXPERIMENTAL DAS CARACTERÍSTICAS MACROESTRUTURAIS DE
JATOS DE ÓLEO VEGETAL DE SOJA *IN NATURA* AQUECIDO OBTIDOS POR MEIO DE
UM BICO INJETOR DE DIESEL

por

MATEUS RENATO PANIZZI

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2015



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO EXPERIMENTAL DAS CARACTERÍSTICAS MACROESTRUTURAIS DE
JATOS DE ÓLEO VEGETAL DE SOJA *IN NATURA* AQUECIDO OBTIDOS POR MEIO DE
UM BICO INJETOR DE DIESEL

por

MATEUS RENATO PANIZZI

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Prof. Thamy Cristina Hayashi

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha

Prof. Dr. Alexandre Vagtinski de Paula

Prof. Dr. Pedro Barbosa Mello

Porto Alegre, 03 de dezembro de 2015

PANIZZI, M. R.; **ESTUDO EXPERIMENTAL DAS CARACTERÍSTICAS MACROESTRUTURAIS DE JATOS DE ÓLEO VEGETAL DE SOJA *IN NATURA* AQUECIDO OBTIDOS POR MEIO DE UM BICO INJETOR DE DIESEL.** 2015. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RESUMO

Um dos principais problemas que se tem encontrado ao tentar substituir óleo diesel por óleo vegetal *in natura* (OV) em motores de combustão interna não adaptados é a dificuldade de se conseguir uma boa atomização do jato de combustível injetado na câmara de combustão do motor, o que é essencial para uma boa qualidade de combustão. Com o objetivo de investigar se o preaquecimento de óleo vegetal de soja (OVS) o torna adequado para injeção em motores diesel estacionários não adaptados, este trabalho experimental, através da captação de imagens por uma câmera de alta velocidade do jato de injeção de combustível, analisa como os parâmetros macroestruturais do jato de OVS se comportam em três diferentes temperaturas do óleo: 25, 80 e 120°C. Dos três parâmetros do jato analisados, dois deles, o ângulo de abertura do jato e a distância de quebra do jato, tiveram significativa melhoria em altas temperaturas em comparação à temperatura ambiente. Os jatos chegaram a apresentar regime de atomização a 120°C, no sistema de injeção utilizado. Concluiu-se que o preaquecimento do OVS a essa temperatura é capaz de viabilizar o seu uso em motores diesel estacionários comuns, no que diz respeito à injeção do combustível.

PALAVRAS-CHAVE: Óleo vegetal de soja, Injeção de combustível, parâmetros de atomização

PANIZZI, M. R. **Experimental study of the macrostructural characteristics of heated soybean straight vegetable oil jets produced by a diesel fuel injector.** 2015. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ABSTRACT

One of the main problems that have been found in attempting to substitute diesel oil for straight vegetable oil (SVO) in non-adapted internal combustion engines is the difficulty of achieving a good fuel jet atomization inside the combustion chamber, which is vital for good-quality combustion. Aiming to investigate whether preheating of soybean SVO can make this fuel adequate for injection into non-adapted diesel stationary engines, this experimental work analyses, by image recording of fuel injection jet using a high-speed camera, how the macrostructural parameters of soybean SVO jets are affected by temperature variation, with tests run at 25, 80 and 120°C. Two of the three analyzed jet parameters – jet spread angle and breakdown length – showed significant improvements at higher temperatures compared to room temperature. Fuel jets have even reached the atomization regime at 120°C in the injection system used. It was concluded that preheating soybean SVO to this temperature could enable its use in common diesel stationary engines, at least in terms of injection performance.

KEYWORDS: Soybean vegetable oil, Fuel injection, atomization parameters.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
3.1 Injeção em motores diesel.....	2
3.2 Regimes de quebra de jato de líquidos.....	2
3.3 Influência das propriedades do líquido na atomização.....	3
3.4 Características macroestruturais de <i>sprays</i>.....	4
3.5 Propriedades do óleo vegetal de soja (OVS).....	4
4. METODOLOGIA.....	5
4.1 Bancada experimental.....	5
4.1.1 Sistema de injeção de óleo.....	5
4.1.2 Sistema de aquecimento de óleo.....	6
4.1.3 Sistema de pressurização.....	7
4.1.4 Sistema de aquisição de imagens.....	7
4.2 Condições de ensaio.....	8
4.2.1 Temperaturas de ensaio do OVS.....	8
4.3 Procedimentos experimentais.....	9
4.3.1 Procedimento de injeção.....	9
4.3.2 Procedimento de aquecimento do OVS.....	10
4.3.3 Procedimento de pressurização da CP.....	10
4.3.4 Procedimento de coleta de imagens.....	10
4.4 Análise de dados.....	11
4.4.1 Análise da distância de quebra do jato.....	11
4.4.2 Análise da posição e velocidade de avanço da extremidade do jato.....	12
4.4.3 Análise do ângulo de abertura do jato.....	12
4.5 Análise de incertezas.....	11
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	13
5.1 Distância de quebra.....	13
5.2 Posição e velocidade de avanço da extremidade do jato.....	13
5.3 Ângulo de abertura do jato.....	14
6. CONCLUSÕES.....	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
APÊNDICES I e II	

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BH – BOMBA HIDRÁULICA

CA – CÂMARA DE AQUECIMENTO

CAV – CÂMERA DE ALTA VELOCIDADE

CP – CÂMARA DE PRESSURIZAÇÃO

CPI – CONJUNTO PORTA-INJETOR

MCI – MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

MDE – MOTORES DIESEL ESTACIONÁRIOS

OD – ÓLEOS DIESEL

OV - ÓLEOS VEGETAIS *IN NATURA*

OVS – ÓLEO VEGETAL DE SOJA *IN NATURA*

PCC – PHANTOM CAMERA CONTROL

PMMA – POLIMETIL METACRILATO

1. INTRODUÇÃO

À vista das necessidades modernas de substituir fontes de energia não renováveis por outras mais sustentáveis, e da constante busca por novas formas de reduzir emissões de poluentes no mundo todo sem abrir mão do consumo de energia, vem se propagando o interesse em empregar matéria orgânica, como óleos vegetais (OV) *in natura*, como fonte de energia em diversas aplicações, já que os OVs são menos poluentes devido ao ciclo de renovação do carbono nas plantas e ao baixo teor de enxofre nos combustíveis vegetais, comparado aos combustíveis fósseis [Gonzalez et al., 2008].

Motores diesel estacionários (MDE) em geral são empregados em geração de energia elétrica, navios e aplicações agrícolas para mover diversas máquinas como bombas, compressores, moinhos, etc. Tais aplicações requerem, quase sempre, motores com alto torque, baixa velocidade, altas taxas de compressão e pequenas variações de carga. Isso habilita esses motores a terem boas condições de combustão e altas temperaturas internas, sendo ideais para emprego de combustíveis com baixo índice de cetano, como é o caso dos óleos vegetais [Blin et al., 2013].

Em termos de eficiência energética de combustão, diversos estudos têm mostrado que os OV puros têm propriedades de combustão, como poder calorífico, próximas às do óleo diesel [Ramadhas et al., 2004].

Contudo, algumas dificuldades se apresentam ao empregar óleos vegetais puros como combustível em motores de combustão interna, entre elas algumas das principais são a diminuição da durabilidade do motor, a menor lubrificação da câmara de combustão, e a menor qualidade de atomização do jato de injeção. A atomização do combustível é de suma importância para a sua mistura com ar e para a qualidade da combustão em motores de combustão interna (MCI) e, por consequência, também para o desempenho do motor e nível de geração de resíduos de queima.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho é avaliar o efeito da temperatura sobre as características macroestruturais (distância de quebra, ângulo de abertura, avanço e velocidade de avanço da extremidade) do jato de injeção de óleo vegetal de soja *in natura* (OVS) obtido a partir de um bico injetor próprio para óleo diesel.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Lefebvre, 1989 compara vários tipos e misturas de óleo diesel com viscosidades diferentes em processo de injeção, verificando que um aumento na viscosidade do combustível leva a uma maior distância de penetração do jato e menor ângulo de abertura dele, como é de se esperar, visto que um aumento de temperatura do combustível reduz sua viscosidade e tensão superficial, o que resulta em maior facilidade em quebrar a matéria líquida em partes menores.

Outros estudos foram feitos empregando óleos vegetais puros como o de karanja e de dendê preaquecidos como combustível em motores diesel, com sucesso [Agarwal, 2008 e Pereira, 2011, por exemplo].

Ryan e Bagby, 1993 (*apud* No, 2011), aqueceram diversos óleos vegetais puros, entre eles o de soja, de forma a reduzir sua viscosidade em dez vezes (de 0,04 Pa.s para 0,004 Pa.s). Os resultados do experimento, porém, foram de redução da abertura do jato e aumento da velocidade de avanço da sua extremidade, para a maior temperatura em relação à menor, ao contrário do esperado. Eles sugeriram que mudanças químicas no óleo durante a injeção possam ter sido responsáveis pelos resultados inusitados.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Injeção em motores diesel

A injeção em motores diesel é dada por um sistema injetor que projeta o combustível líquido para dentro da câmara de combustão, em alta pressão. A injeção de combustível, junto com as propriedades do meio gasoso na câmara de combustão, e com as características do escoamento desse meio, ditam a formação de mistura ar-combustível no interior da câmara, que é o principal fator de importância na combustão [Hiroyasu, 1985].

Um sistema de injeção de combustível conta com, ao menos, um reservatório de combustível, uma bomba, e um porta-injetor, que é o dispositivo responsável por fazer com que o combustível líquido passe para dentro do motor na forma de um fio de líquido muito fino, para que este possa se desintegrar, atomizar e vaporizar, através da interação com o meio, assim misturando-se com o ar.

3.2 Regimes de quebra de jato de líquido

Para entender melhor como funcionam os mecanismos de desintegração do jato, precisa-se conhecer os tipos de regime de quebra de jato existentes.

São caracterizados quatro regimes de quebra de jatos de líquido, descritos de acordo com a influência da interação entre as variadas forças que agem sobre a quebra do jato. Ohnesorge, 1931 (*apud* Baumgarten, 2006), propôs uma correlação para determinar o regime de quebra de um determinado jato em função do número de Weber do líquido, e do número de Reynolds do escoamento (Figura 3.1). O número adimensional de Ohnesorge é definido como:

$$Z = \sqrt{\frac{We_l}{Re}} \quad (3.1)$$

em que We_l é o número de Weber do líquido, e Re o número de Reynolds do escoamento. Uma representação ilustrativa dos quatro regimes de quebra é apresentada na Figura 3.2.

Mais tarde, Reitz, 1978, incorporou uma terceira variável na caracterização do regime de quebra, o fator de densidade do meio gasoso, tornando o diagrama de Ohnesorge tridimensional (mostrado na Figura 3.2) [Baumgarten, 2006]. Como já havia sido demonstrado por Torda, 1973, um aumento na densidade do meio gasoso favorece a atomização do jato de líquido.

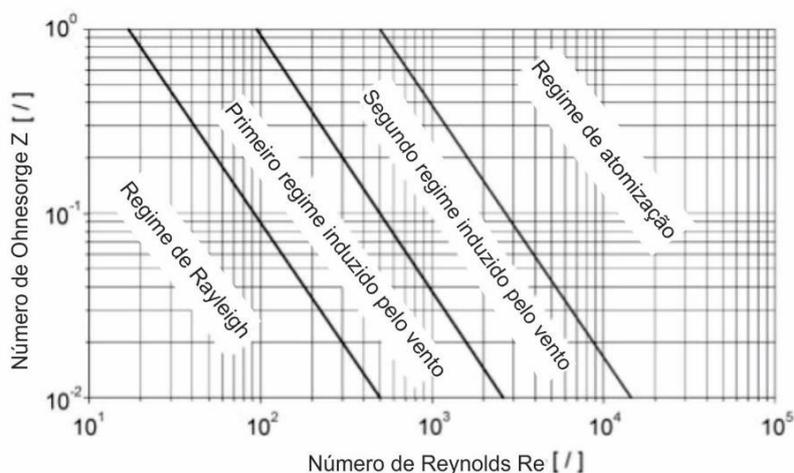


Figura 3.1 - Diagrama de Ohnesorge (adaptado de Baumgarten, 2006).

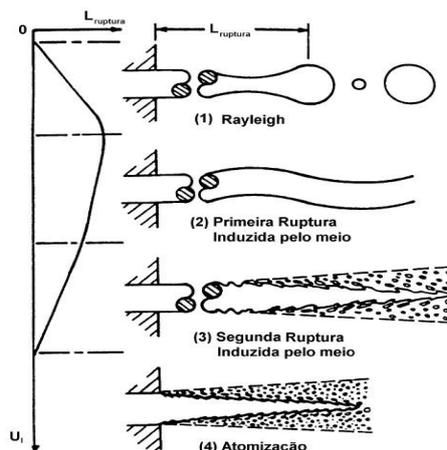


Figura 3.2 - Representação dos regimes de quebra de jato (Argachoy, 2001).

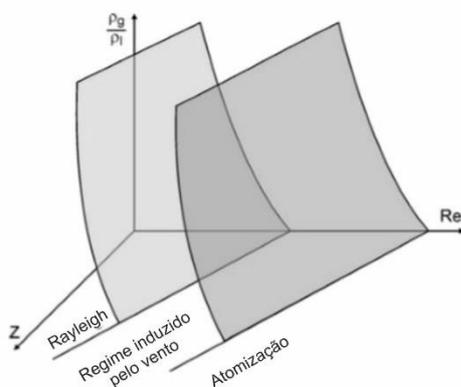


Figura 3.3 – Diagrama de regimes de quebra de jato, incluindo efeito da densidade do meio gasoso (adaptado de Baumgarten, 2006).

O regime de interesse para motores de combustão interna é o regime de atomização, pois é fundamental que o combustível possa se atomizar e evaporar rapidamente no motor para aumentar a área de contato com o ar e gerar uma combustão mais completa.

O regime de atomização é atingido quando o comprimento da superfície intacta se aproxima de zero. Um esguicho cônico se desenvolve e a divergência de pulverização começa imediatamente após a saída do bocal, isto é, o vértice do cone de pulverização está localizado no interior do injetor [Baumgarten, 2006].

3.3 Influência das propriedades do líquido na atomização

A partir da correlação de Ohnesorge apresentada no diagrama da Figura 3.2, fazendo-se uso da equação 4.1, o número de Weber do pode ser escrito como

$$We = \frac{u^2 d_0 \rho_l}{\sigma} \quad (3.2)$$

Na Eq. (3.2), u é a velocidade linear média do escoamento no sentido axial, d_0 é o diâmetro do orifício de saída do líquido, σ é a tensão superficial do líquido e ρ_l é a massa específica do líquido. O número de Reynolds do escoamento é definido como

$$Re_l = \frac{u d_0}{\nu} \quad (3.3)$$

em que ν é a viscosidade cinemática do líquido. Por último, tem-se que o número de Ohnesorge depende apenas das propriedades do líquido e da geometria do orifício do jato, sendo dado pela relação

$$Z = \frac{\nu \rho_l}{\sqrt{\rho_l \sigma d_0}} \quad (3.4)$$

Na eq. (3.4), σ é a tensão superficial do líquido.

3.4 Características macroestruturais de *sprays*

As características de *sprays* podem ser divididas em macroestruturais, relacionadas à forma do jato como um todo, e microestruturais, isto é, relacionadas às propriedades de gotas ou pequenas regiões de gotas que compõem o jato. Entre as macroestruturais, foram estudadas as de interesse considerando a substituição de combustíveis, sejam elas o avanço da extremidade do jato, a velocidade de avanço da extremidade do jato, o ângulo de abertura do cone formado pelo jato e a distância de quebra do jato [Fajgenbaum, 2013].

Esses parâmetros são importantes nos combustíveis pois caracterizam a forma com que o jato se desintegra e se “espalha” ao ser injetado em uma atmosfera gasosa, o que influencia muito no potencial desse líquido em se misturar com ar, por exemplo, em uma câmara de combustão interna. Para fins de avaliação da qualidade do jato de combustíveis, são melhores os jatos com maior ângulo de abertura e menor penetração. Quanto à distância de quebra, o ideal é que seja zero, assim o jato de líquido estaria no regime de quebra de atomização [Baumgarten, 2006].

3.5 Propriedades do óleo vegetal de soja (OVS)

A viscosidade cinemática do OVS em temperatura ambiente, assim como a de outros óleos vegetais, é da ordem de 10 a 15 vezes maior que a viscosidade do óleo diesel. Além disso, a viscosidade varia amplamente com a temperatura em condições ambientes [Blin *et al.*, 2013]. Mas outras propriedades que também afetam as características do escoamento de OVS, como massa específica e tensão superficial, também precisam ser levadas em conta. Na Tabela 3.1 são apresentados valores de massa específica, viscosidade cinemática e tensão superficial obtidos experimentalmente para o OVS *in natura* [Esteban *et al.*, 2012-a e 2012-b].

Tabela 3.1 – Propriedades do OVS *in natura* (adaptado de Esteban *et al.*, 2012a e 2012b)

	Massa específica (g/m ³)	Viscosidade Cinemática (mm ² /s)	Tensão superficial (mN/m)
TEMP (°C)			
10	0,9254	107,62	34,6
20	0,9185	67,12	33,9
30	0,9127	44,69	33,2
40	0,9061	31,42	32,4
50	0,8998	23,00	31,6
60	0,8941	17,47	30,7
70	0,8879	13,67	30,0
80	0,8817	11,17	29,2
90	0,8750	9,13	28,4
100	0,8689	7,71	27,7
110	0,8626	6,58	27,2
120	0,8566	5,68	26,5
130	0,8498	4,99	25,8
140	0,8430	4,45	25,1

4. METODOLOGIA

4.1 Bancada experimental

Os experimentos foram realizados utilizando a bancada desenvolvida por Perera, 2015, que consiste de um sistema de injeção de combustível com bomba hidráulica de êmbolo (BH) e conjunto porta injetor (CPI), este último instalado em uma câmara de pressão (CP), construída em aço, a qual é conectada a um tanque de nitrogênio para pressurização. Na linha de injeção de óleo se tem ainda um sistema de aquecimento e controle de temperatura para aquecer o óleo a ser injetado, esse sistema é formado por um termopar tipo 'J', resistor microtubular de 300 W para aquecimento do óleo e controlador PID de temperatura.

A coleta de imagens é feita através de uma câmera de alta velocidade (CAV) conectada via cabo Ethernet a um computador que serve como central de controle da câmera. Uma luminária LED com potência de 100 W é utilizada para iluminar o interior da CP. Tanto a CP quanto a luminária são montadas sobre uma base nivelada de alumínio para sustentação e alinhamento de ambas. Um desenho esquemático da bancada está mostrado na Figura 4.1.

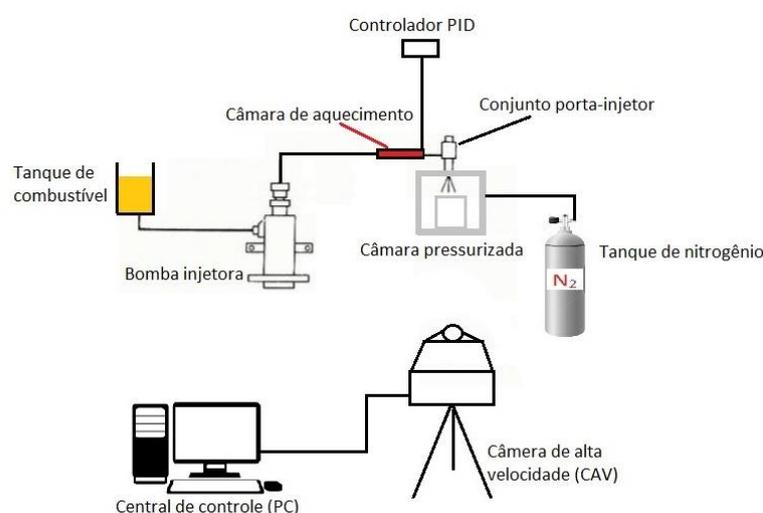


Figura 4.1 – Desenho esquemático da bancada experimental.

4.1.1 Sistema de injeção de óleo

A BH tem acionamento manual por alavanca, à qual é fixada uma massa de 10 kg, centralizada, de forma que a massa possa ser solta de mesma altura em vários ensaios sequentes, acionando por efeito da gravidade e conferindo ao acionamento repetibilidade. O combustível é recalcado a partir de um reservatório, passa por um filtro e é então conduzido por uma linha de alta pressão até o CPI, passando pela câmara de aquecimento. O sistema conta com um manômetro com faixa de medição de 0 a 400 bar. O CPI é formado pelo corpo injetor modelo KBAL 77 S 9/13 e bico injetor modelo DLLA 140 S 567, ambos da marca Bosch. O bico injetor possui quatro orifícios de passagem com 0,8 mm de comprimento e 0,28 mm de diâmetro cada e pressão máxima de abertura de 190 bar. O sistema de injeção é mostrado na Figura A1.2, no Apêndice I.

4.1.2 Sistema de aquecimento de óleo

Para a realização deste trabalho foi acoplado à bancada de testes um dispositivo de aquecimento do óleo combustível. O sistema de aquecimento é montado na própria linha de alta pressão de combustível, interceptando-a no último trecho, antes do CPI, por meio de uma câmara de aquecimento (CA) em formato cilíndrico com furo passante. Um resistor tipo microtubular de

300 W de potência, instalado em torno da CA fornece calor através das paredes da CA chegando até o óleo no orifício interno. O termopar tipo 'J' é acoplado à CA através de um furo lateral com rosca e tem sua extremidade posicionada no centro do furo onde passa o combustível. Um controlador de temperatura PID modelo N480 da marca Novus é utilizado no controle da temperatura da CA. O conjunto de aquecimento pode ser visto acoplado ao CPI na Figura 4.2.



Figura 4.2 – CA com termopar, resistor e CPI acoplados.

4.1.3 Sistema de pressurização

A CP é um prisma fechado com paredes feitas a partir de chapas de aço com 18 mm de espessura cada, soldadas, e com três janelas de visualização confeccionadas em PMMA. Na parte superior ela possui o encaixe para o CPI. Outras conexões da CP são: um manômetro com escala de 0 a 30 bar, uma conexão para mangueira de gás tipo NPTF e uma válvula de alívio.

A CP é alimentada através de uma mangueira de alta pressão marca TransPower com capacidade para operar até 400 bar. O carregamento é feito com nitrogênio de grau 4,6 a partir de um tanque tipo 'T' e o processo é regulado por uma válvula reguladora de pressão na saída do tanque. As Figuras A1.2 e A1.3 no Apêndice I mostram a CP em detalhe.

4.1.4 Sistema de aquisição de imagens

A captura de imagens é feita através de uma câmera Phantom Vision V411 com resolução máxima de 1280x800 pixels e lente AF-S VR Micro-Nikkor 105mm f/2.8G. Nos ensaios realizados foram utilizadas resoluções de 400x800 pixels e 128x400 pixels, nas quais a CAV é capaz de adquirir 8.000 e 40.000 imagens por segundo, respectivamente. O *software* da Phantom, PCC 2.3, foi utilizado para análise e processamento das imagens. A Figura 4.3 mostra a CAV alinhada à janela transparente da CP durante o ensaio.

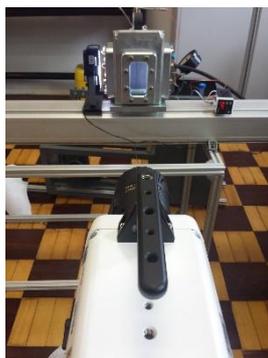


Figura 4.3 – CAV alinhada com a janela central da CP para aquisição de imagens do ensaio.

4.2 Condições de ensaio

4.2.1 Temperaturas de ensaio do OVS

A fim de se definir as temperaturas de ensaio, é necessário determinar que combinação de propriedades do OVS são necessárias para alcançar o regime de atomização. Para isso precisa-se determinar a equação de cálculo do número de Reynolds do jato de injeção.

O diâmetro do orifício d_0 do bico injetor é conhecido e igual 0,28 mm e as propriedades do OVS foram apresentadas na Tabela 3.1. A única variável desconhecida é a velocidade do escoamento na injeção, u . Foram feitos três ensaios preliminares para medir a velocidade de saída do jato de OVS líquido do orifício, à temperatura ambiente. A medição da velocidade instantânea na saída do orifício é feita do mesmo modo que as medições de velocidade do jato nos ensaios finais, cujo procedimento será detalhado na seção 4.4.2. A média das medições resultou em uma velocidade de saída aproximada $u = 22$ m/s. Com esse valor pode-se calcular a taxa de vazão mássica média do escoamento através do orifício, pela equação

$$\dot{m}_{amb} = \frac{u d_0^2 \rho_{amb} \pi}{4} = 0,001244 \text{ kg/s} \quad (4.1)$$

onde \dot{m}_{amb} é a taxa de vazão mássica do OVS à temperatura ambiente, e ρ_{amb} é a massa específica do OVS também à temperatura ambiente, 20 °C. Admitindo verdadeira a hipótese de que essa taxa de vazão mássica se mantenha constante nas diversas condições de temperatura do OVS a serem ensaiadas, pode-se calcular o número de Reynolds do jato de óleo para toda a faixa de 10 a 140 °C em função de \dot{m}_{amb} , como segue:

$$Re_l = \frac{4 \dot{m}_{amb}}{\rho_l \pi d_0 v} \quad (4.2)$$

Utilizando as Equações 3.4 e 4.2, são calculados os números de Ohnesorge e Reynolds para toda a faixa de temperaturas disponível na Tabela 3.1 de propriedades do OVS (10 a 140°C). No gráfico da Figura 4.4 são mostradas as 14 combinações de números de Ohnesorge e Reynolds calculados, sobrepostos ao diagrama de Ohnesorge. As retas paralelas reproduzem os limites entre os regimes de quebra, conforme o diagrama da figura 3.1.

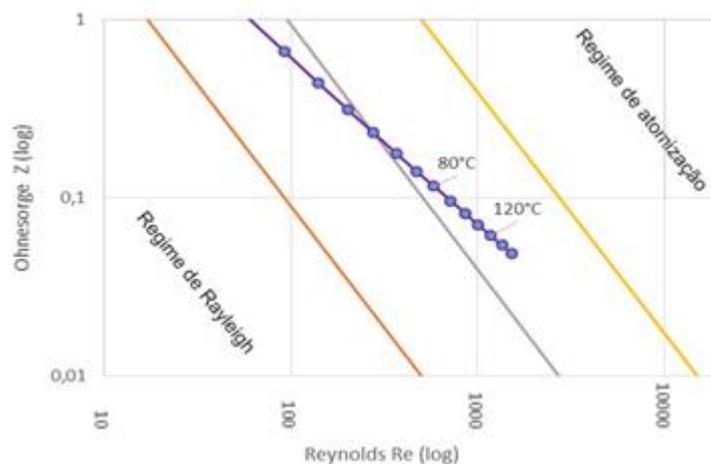


Figura 4.4 – Diagrama de Ohnesorge. Os pontos azuis mostram as possíveis posições no diagrama para o OVS entre 10 e 140°C.

Embora nenhum dos pontos tenha se aproximado do regime de atomização (reta amarela na Figura 4.4), esse diagrama não leva em conta a influência da pressurização da CP onde o OVS será injetado. O aumento da pressão na CP, e conseqüente aumento da densidade da sua atmosfera interior, tem o efeito de melhorar a atomização, conforme foi mostrado no diagrama da Figura 3.3. A temperatura de estudo mais alta escolhida foi 120 °C, por ser a temperatura na qual a viscosidade do OVS mais se aproxima daquela do OD a temperaturas ambientes de 10 e 20 °C segundo a Tabela 3.1. Foi escolhida também uma temperatura intermediária (80 °C), além da temperatura ambiente.

4.3 Procedimentos experimentais

O procedimento de ensaio deste trabalho consistiu em realizar a injeção de OVS líquido através do sistema de injeção da bancada para dentro da CP pressurizada e coletar dados de imagens do jato resultante da injeção através da CAV posicionada em alinhamento com a janela da CP, gravando os dados de imagem na central de controle (computador) para posterior análise dos parâmetros do jato.

Foram realizados dezoito ensaios, sendo três condições diferentes de temperatura do OVS, duas taxas de aquisição de imagem e três ensaios para cada combinação de temperatura do óleo e taxa de imagens, para calcular a média dos ensaios. As condições dos ensaios então mostradas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Condições experimentais de ensaio.

		3 ensaios					
Parâmetros fixos	Combustível	OVS	OVS	OVS	OVS	OVS	OVS
	Pressão da CP	25 kPa					
Parâmetros variáveis	Temperatura do combustível	298 K	298K	353 K	353 K	393 K	393 K
	Resolução	400x800 pixels	128x400 pixels	400x800 pixels	128x400 pixels	400x800 pixels	128x400 pixels
	Taxa Imagens	8000/s	40000/s	8000/s	40000/s	8000/s	40000/s

4.3.1 Procedimento de injeção

O procedimento de injeção foi padronizado de forma a assegurar a repetibilidade dos testes. Em todos os ensaios a BH foi acionada através da liberação de uma massa de 10 kg presa à extremidade da alavanca de acionamento, de uma altura de 160mm a partir de seu fim de curso.

Para garantir que o combustível injetado esteja na temperatura medida pelo termopar na CA, é necessário saber o volume residual de líquido a jusante do CA, que deve ser removido da linha para que no momento do ensaio o líquido em injeção seja aquele cuja temperatura é conhecida, isto é, aquele volume que ocupava a CA no momento da leitura.

Através da execução de dez injeções consecutivas de líquido para dentro de um tubo de vidro graduado, verificou-se o volume final de líquido no tubo e se pôde inferir o volume injetado em cada curso completo da BH. Esse valor medido foi de 0,61 cm³.

Já o volume residual no CPI foi medido três vezes e a média calculada foi de 0,53 cm³. Essa medição foi realizada através do enchimento da linha e do CPI com líquidos de massa específica diferentes, e então procedendo da mesma forma que na medição do volume de uma injeção, mediu-se agora a diferença entre o volume total e o volume do líquido da linha.

Com isso, considerando simplificada que a injeção expulse sempre o líquido mais próximo à saída antes, pode-se inferir que a primeira injeção completa extrai todo o líquido do CPI e mais uma parcela de líquido da CA, e a segunda injeção extrai somente líquido que, antes da injeção anterior, estava dentro da CA, dado que esta tenha volume suficiente.

Segue que se $V_i = 0,61 \text{ cm}^3$ e $V_{CPI} = 0,53 \text{ cm}^3$ são o volume de uma injeção e o volume residual no CPI, respectivamente, e visto que $V_i > V_{CPI}$, a CA deve ter volume mínimo de:

$$V_{CA \text{ min}} = 2 V_i - V_{CPI} = 0,69 \text{ cm}^3 \quad (4.3)$$

É necessário apontar que as medições de volume estão sujeitas a incertezas de medição. Tendo em vista isso e no intuito de causar a mínima interferência possível no escoamento do

combustível na linha de alta pressão, cujo diâmetro interno é de 0,8 mm, a CA foi projetada com furo passante interno de diâmetro constante $D = 0,03$ cm e comprimento total do furo $L_{CA} = 10,7$ cm, com seu volume calculado como segue:

$$V_{CA} = \frac{\pi D^2 L_{CA}}{4} = 0,742 \text{ cm}^3 \quad (4.4)$$

Com isso, o procedimento padronizado de injeção nos ensaios foi o de, após se atingir a temperatura desejada na CA, esvaziar o residual da linha com um curso de injeção completo, e logo após realizar o segundo curso de injeção completo, este último sendo válido para o ensaio e no qual é realizada a coleta de imagens.

4.3.2 Procedimento de aquecimento do OVS

Visto que o sensor termopar tipo 'J' posicionado com sua extremidade no interior do furo passante da CA deve medir a temperatura correta do fluido antes da injeção, a fim de mitigar possíveis erros de medição causados pela influência do contato do corpo da CA com a cápsula do termopar, foi determinado como procedimento de ensaio manter a leitura do sensor termopar na temperatura desejada através do controlador de temperatura por dez minutos antes de cada procedimento de injeção ser realizado.

4.3.3 Procedimento de pressurização da CP

A CP foi submetida previamente aos ensaios e por medida de segurança a um teste de pressurização com nitrogênio até uma pressão interna de 30 bar (5 bar acima da pressão a ser utilizada em ensaio), em condições controladas, durante 5 minutos, não tendo sido observado qualquer anomalia ou vazamento. Ao início dos ensaios a CP é pressurizada com gás nitrogênio até 25 bar, condição em que permanece até serem realizados todos os ensaios, quando então ela é despressurizada através da válvula de alívio.

4.3.4 Procedimento de coleta de imagens

Ao início dos ensaios a CAV é posicionada sobre um tripé de fixação, de modo a ficar com sua lente à altura do centro da janela de visualização da CP, a 80 cm de distância do centro da CP. Ela é então alinhada e centralizada com auxílio de medidores de inclinação. A lente AF-S VR Micro-Nikkor 105 mm f/2.8G é instalada na CAV, e regulada para foco em 80 cm de distância. Com o auxílio do *software* PCC 2.3 da própria fabricante da CAV, é possível ver no monitor do computador a imagem "ao vivo", para realizar qualquer ajuste fino necessário ao alinhamento.

Para os ensaios com taxa de aquisição de 8.000 imagens por segundo, a resolução da câmera é configurada, através do *software*, para 400x800 pixels, configuração que nessa distância e foco dão a imagem exata de toda a janela retangular da CP, a qual mede 50 mm de largura por 100 mm de altura. Já para os ensaios com taxa de 40.000 imagens por segundo, a resolução é configurada para 128x400 pixels, de modo a captar uma faixa de quase um terço da largura da janela de visualização, e metade da sua altura. Nesta última condição, a altura da câmera precisa ser ajustada, de forma que a imagem capturada esteja centrada na região de interesse, com o orifício de saída do jato no topo central da imagem. O intuito dessa última configuração é estudar o início da formação do jato de OVS em mais detalhes.

Como a CAV só consegue gravar nessas configurações cerca de 2s de imagens em sua memória interna de 16 GB, é necessário configurar o *software* para a condição "*image based auto-trigger*", com "*delay*" de alguns milissegundos. Assim o sistema começa a gravar as imagens na memória logo antes do momento em que o jato de injeção começa, e todo o tempo de injeção é gravado.

4.4 Análise de dados

A análise das imagens coletadas foi realizada no *software* da CAV, o PCC 2.3. Esse *software* permite reproduzir as imagens uma a uma, sendo possível estudar o avanço do jato a cada 0,125 ms (para taxa de 8.000 imagens por segundo) e 0,025 ms (a 40.000 imagens por segundo). Foram analisados sobre as imagens gravadas os parâmetros distância de quebra do jato, ângulo de abertura do jato, avanço da extremidade do jato e velocidade de avanço da extremidade do jato.

A distância de quebra do jato foi medida sobre as imagens adquiridas em resolução 128x400 pixels e taxa de 40.000 imagens/segundo, enquanto que os demais parâmetros foram medidos nas imagens coletadas em 400x800 pixels a 8.000 imagens/segundo, esta última mostrando toda a janela de visualização da CP.

4.4.1 Análise da distância de quebra do jato

A distância de quebra do jato foi medida manualmente através da reprodução das imagens coletadas, com o auxílio da ferramenta de medição do *software*. Primeiramente, foi configurada a escala de 0,125 mm/pixel e definida a origem do jato clicando sobre o ponto onde fica o orifício do bico injetor na imagem. Utilizando a opção de medição “*distance and angle, origin + 1 point*”, pôde-se medir a distância entre qualquer ponto na imagem e o orifício do bico injetor. A imagem é então avançada, e são realizadas as medidas em diversos tempos de interesse a partir do início da formação do jato. As medidas realizadas são então exportadas em arquivo de texto, em mm, para serem posteriormente tratadas e compiladas. A Figura 4.5 mostra o procedimento de medição da distância de quebra de jato sendo realizado.



Figura 4.5 – Exemplo de medição da distância de quebra de jato no *software* PCC 2.3.

4.4.2 Análise da posição e velocidade de avanço da extremidade do jato

A posição de avanço do jato foi medida manualmente sobre as imagens reproduzidas no *software*, clicando-se, a cada imagem, sobre a extremidade visível do jato. A velocidade instantânea de avanço foi obtida dividindo-se a distância entre duas posições consecutivas da ponta do jato pelo intervalo de aquisição de imagens que é conhecido e ditado pela câmera (0,125 ms). Para tanto, configurou-se no *software* a escala 0,125 mm/pixel e selecionou-se o modo de medição “*distance and angle, origin + 1 point*”. As distâncias medidas a partir do ponto de origem (orifício) foram exportadas em formato de texto para análise e compilação de resultados. A Figura 4.6 mostra um exemplo de coleta de pontos de avanço da extremidade do jato.

4.4.3 Análise do ângulo de abertura do jato

De modo similar, os ângulos de jato foram obtidos manualmente, utilizando a ferramenta que mostra o ângulo absoluto a partir da origem, neste caso o eixo horizontal. Para medir o ângulo total do “cone” do jato foram realizadas duas medições, uma para cada lado do jato a partir da origem (orifício) e a diferença entre os dois ângulos medidos dá o ângulo total do jato,

o que evita o erro relacionado a um possível desalinhamento rotacional entre o orifício do bico injetor e a CAV.

O método de medição do ângulo utilizado foi o de distância fixa a jusante do orifício, o qual implica em que todas as medições de ângulo devem ser feitas à mesma distância – neste caso vertical – do orifício de abertura, para anular a incoerência de medição causada pelo fato de que o jato não é de fato cônico, mas sim divergente de maneira não linear. Isso é controlado na medição pelo rastreamento da distância do *mouse* à origem nas coordenadas 'X' e 'Y' do *software*. Todas as medições foram realizadas a 50 mm a jusante do orifício (aproximadamente 180 vezes o diâmetro do orifício). A Figura 4.7 mostra um exemplo de medição do ângulo do jato.

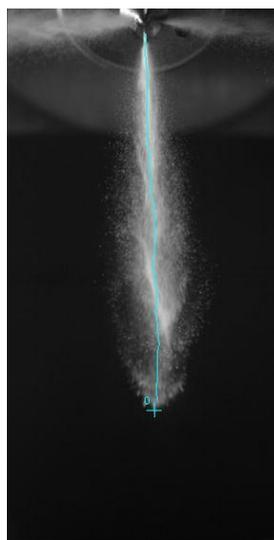


Figura 4.6 – Medição de avanço da ponta do jato. Figura 4.7 – Medição do ângulo do jato.

4.5 Análise de incertezas

Em todas as medições realizadas há a o erro de resolução máxima da medição que corresponde à resolução de imagem da CAV. Esse erro para as medições de distância linear (avanço da extremidade do jato e distância de quebra do jato) é de no máximo 0,125 mm, tamanho de um pixel na imagem. Pode-se assumir devido à facilidade de medição precisa no *software* que possíveis erros de operação na medição sobre as imagens estejam dentro desse erro de resolução. Logo:

$$\varepsilon_{AV} = \varepsilon_{DQ} = 0,125 \text{ mm} \quad (4.5)$$

Em que ε_{AV} e ε_{DQ} são os erros máximos de medição do avanço do jato e da distância de quebra do jato, respectivamente. Já para a velocidade de avanço, que é calculada como a distância entre o ponto extremo do jato em duas imagens consecutivas separadas no tempo por 0,125 ms, existe o erro de resolução na medição dos dois pontos, portanto:

$$\varepsilon_V = \frac{2 (0,125 \text{ mm})}{0,125 \text{ ms}} = 2 \text{ m/s} \quad (4.6)$$

Sendo ε_V o erro máximo associado à velocidade de avanço.

Para o ângulo de abertura do jato, tem-se um erro para cada lado do “cone”, já que a medição é realizada em ambos os lados e é realizada a soma para obter o ângulo total. Visto que o menor ângulo medido em todos os ensaios, para um dos lados do jato, foi de 7,4°, e todas as medições realizadas a 50 mm a jusante do orifício, o erro máximo de ângulo é dado por:

$$\varepsilon_{ANG} = 2 \left\{ 7,4^\circ - \arctg \left[\frac{50 \text{ mm } \operatorname{tg}(7,4^\circ) - 0,125 \text{ mm}}{50 \text{ mm}} \right] \right\} = 0,28^\circ \quad (4.7)$$

Em que ε_{ANG} é o erro máximo de medição do ângulo total de abertura do jato.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao se entrar na discussão dos resultados obtidos das medições, é relevante apresentar as imagens dos jatos de OVS obtidas para cada condição de ensaio realizada, a fim de se identificar as diferenças visuais nos padrões de jato obtidos. Para cada condição de temperatura ensaiada é apresentada uma sequência de imagens mostrando o início do desenvolvimento do jato, para fins de comparação visual. O tempo decorrido desde o momento de início da injeção é mostrado abaixo de cada imagem. As sequências de imagem para injeção de OVS a 25, 80 e 120°C são apresentadas nas Figuras All.1, All.2 e All.3, respectivamente, no Apêndice II.

5.1 Distância de quebra

A Figura 5.1 mostra os resultados obtidos para distância de quebra em função do tempo para os três níveis de temperatura considerados. A incerteza é conforme Eq. 4.5.

Pode-se verificar que com o aumento da temperatura do OVS, o início da fragmentação do jato de líquido se dá mais perto do orifício de saída do bico injetor. Este comportamento está de acordo com os resultados reportados por Lefebvre, 1989, e indica que a diminuição da viscosidade e da tensão superficial favorece a quebra do jato. Verifica-se que quanto maior a temperatura, menor a distância de quebra, portanto mais próximo ao regime de atomização o jato se encontra.

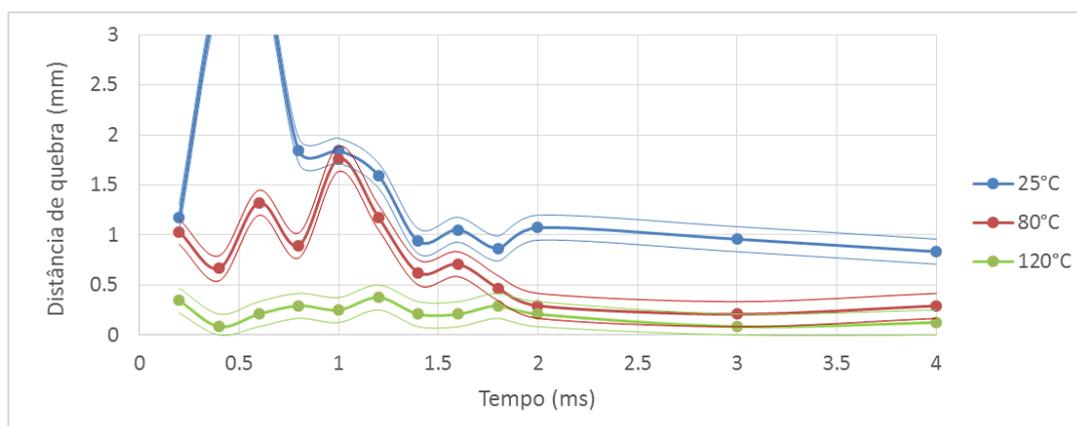


Figura 5.1 – Comportamento da distância de quebra em função do tempo de injeção, para OVS a 25, 80 e 120°C. As linhas mais finas mostram os limites de incerteza das curvas.

5.2 Posição e velocidade de avanço da extremidade do jato

Os resultados obtidos para a posição da ponta do jato em função do tempo são apresentados na Figura 5.2. Pode-se verificar que o aumento de temperatura do óleo não afeta de forma significativa o avanço da extremidade do jato. Entretanto, para o OVS a 120°C tem-se o jato de menor penetração durante todo o intervalo de tempo medido (0 a 10 ms a partir do momento de início do jato). A incerteza de medição é de 0,125 mm, e a menor diferença entre as curvas de 80 e 120°C é de 0,42 mm.

Era esperado, conforme Lefebvre, 1989, que com o aumento da temperatura e a diminuição da viscosidade e da tensão superficial favorecendo a fragmentação do jato, houvesse um aumento da área de dispersão lateral das partículas, e assim uma diminuição da velocidade de avanço da ponta do jato.

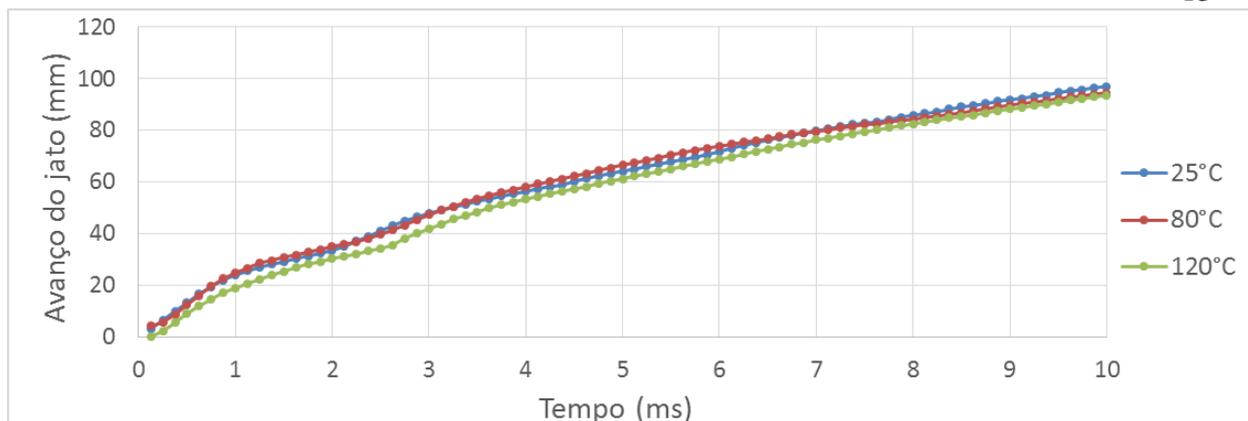


Figura 5.2 – Comportamento do avanço da extremidade do jato em função do tempo, para injeção de OVS a 25, 80 e 120°C. Não se verifica uma variação definitiva entre as condições de 25 e 80°C, mas é notável que o jato de 120°C é o de menor avanço durante todo o período.

Os resultados obtidos para a velocidade de avanço da ponta do jato em função do tempo são apresentados na Figura 5.3. A incerteza, calculada conforme Eq. 4.6, é omitida no gráfico.

Constata-se que há uma variação grande de velocidade instantânea da extremidade do jato em todos os ensaios, o que se acredita ser efeito da forma como o jato se comporta no sistema de injeção de óleo utilizado. Nas sequências de imagens gravadas é possível ver que os jatos não são formados por um escoamento uniforme na saída do orifício, e sim por uma sequência de “frentes de onda”, as quais causam picos de velocidade instantânea durante a injeção.

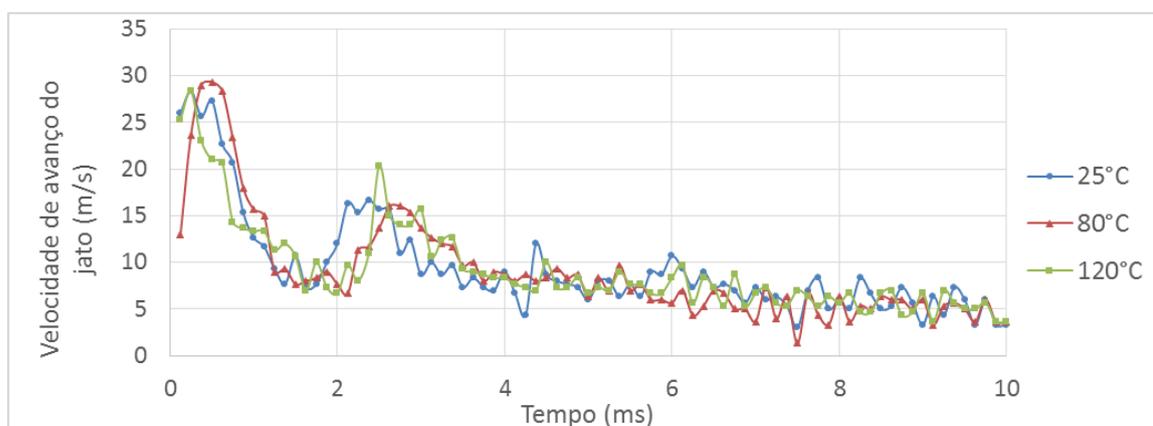


Figura 5.3 – Comportamento da velocidade instantânea de avanço da extremidade do jato de OVS, para temperaturas de 25, 80 e 120°C. Não é possível determinar um padrão de diferenciação nas velocidades instantâneas de avanço nas diferentes condições de ensaio.

5.3 Ângulo de abertura do jato

A Figura 5.4 apresenta o comportamento do ângulo do jato em função do tempo, para os três valores de temperatura considerados. As incertezas são de acordo com Eq. 4.7.

Um ângulo de abertura de jato maior favorece a mistura do combustível com o ar e a sua vaporização, pois causa o aumento da área de contato entre ar e combustível. Nesse parâmetro em específico, nota-se que tanto à temperatura de 80°C quanto à de 120°C o ângulo formado é maior que o formado pelo OVS em temperatura ambiente. O resultado está mais uma vez de acordo com Lefebvre, 1989, sendo ângulos maiores de jato para condições de ensaio com líquido menos viscoso.

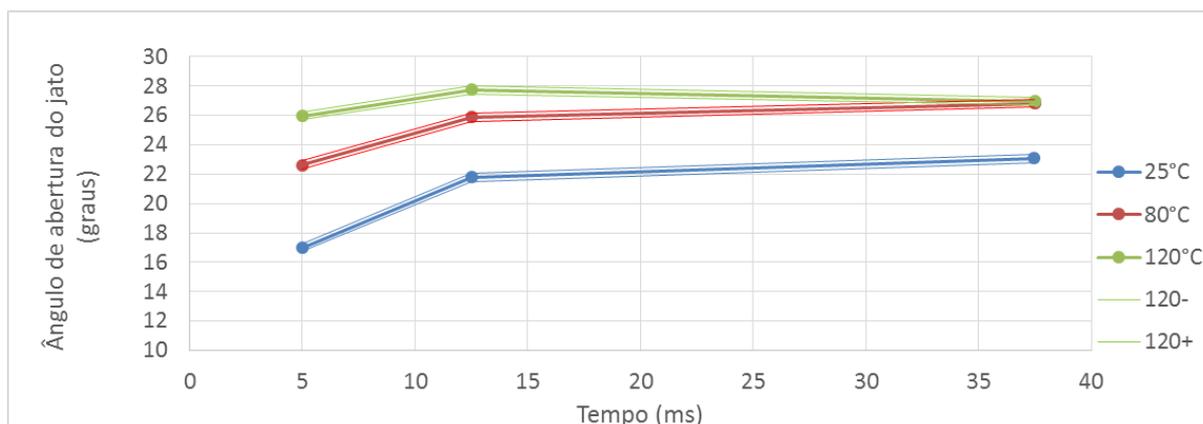


Figura 5.4 - Comportamento do ângulo de abertura do jato de OVS, para temperaturas de 25, 80 e 120°C em 5, 12,5 e 37,5ms a partir do início da injeção. Faixa de incertezas mostrada para cada condição entre as linhas finas.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizados experimentos para medição de parâmetros macroestruturais de jatos de óleo vegetal de soja (OVS) aquecidos obtidos por meio de um bico injetor de óleo diesel, a fim de se verificar a influência da temperatura do OVS sobre a quebra dos jatos. Utilizando uma bancada composta de câmara pressurizada, bico injetor dotado de sistema de aquecimento e sistema de aquisição de imagens em alta velocidade e resolução, foi avaliado o comportamento da distância de quebra do jato, da distância e velocidade de avanço da extremidade do jato e do ângulo de abertura do jato para as temperaturas de 25, 80 e 120°C.

Verificou-se que com o aumento da temperatura e conseqüente diminuição da viscosidade e tensão superficial do líquido, o que favorece a atomização, o início da fragmentação do jato ocorre a menores distâncias do orifício de saída do bico injetor.

Pôde-se verificar também que o avanço da extremidade do jato diminui e o ângulo de abertura aumenta, com o aumento de temperatura, embora essas variações não tenham sido tão pronunciadas quanto a de diminuição da distância de quebra.

Apesar de não ser possível afirmar que o aquecimento do OVS tenha melhorado sistematicamente todos os parâmetros macroestruturais do jato de injeção, a redução da distância de quebra apresentada no jato de OVS a 80°C em relação ao jato a 25°C e, principalmente, a redução para próximo de zero nos jatos de OVS a 120°C confirmam que a atomização é facilitada com o preaquecimento do OVS, o que é visualmente confirmado pelo perfil apresentado nas imagens no Apêndice I, que mostram o jato a 120°C formando um cone de *spray* com vértice na saída do orifício de injeção, caracterizando regime de atomização, e portanto determinando sua viabilidade na utilização em motores diesel estacionários, no que diz respeito à injeção de combustível, na condição de injeção a 120°C.

O aumento no ângulo de abertura do jato nas temperaturas de injeção do OVS de 80°C e 120°C é bastante representativo de melhoria do potencial de mistura do combustível com o meio gasoso em uma câmara de combustão.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se que estudos similares sejam feitos com outras variedades de óleo vegetal *in natura* a fim de verificar se as melhorias constatadas na desintegração do jato de óleo de soja *in natura* também de aplicam a outros tipos de óleo.

Como forma de diminuir a incerteza de medição sobre as imagens em estudos semelhantes, sugere-se a utilização de maior potência de iluminação do jato, e que a iluminação seja feita de forma simétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agarwal, A.K., 2008. “**Scope and Limitations of Utilisation of Non-edible Vegetable Oils as a Substitute Fuel for Diesel Engines – An Experimental Study**”, Engine Research Laboratory, Indian Institute of Technology Kanpur.

Baumgarten, C, 2006. “**Mixture formation in internal combustion engines**”, Springer.

Blin, J., Brunschwig, C., Chapuis, A., Changotade, O., Sidibe, S.S., Noumi, E.S., Girard, P., 2013. “**Characteristics of vegetable oils for use as fuel in stationary diesel engines - Towards specifications for standard in West Africa**”, Institute International d’Ingénierie de l’Eau et de l’Environnement (2iE); Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD).

Esteban, B., Riba, J.R., Baquero, G., Puig, R. Rius, A., 2012a. “**Characterization of the surface tension of vegetable oils to be used as fuel in diesel engines**”, Escola d’Enginyeria d’Igualada, Universitat Politècnica de Catalunya.

Esteban, B., Riba, J.R., Baquero, G., Rius, A., Puig, R., 2012b. “**Temperature dependence of density and viscosity of vegetable oils**”, Escola d’Enginyeria d’Igualada, Universitat Politècnica de Catalunya.

Fajgenbaum, R., 2013. “**Influência da temperatura do combustível nos parâmetros de atomização de um atomizador utilizado em bicos injetores automotivos**”, UNICAMP.

Gonzalez, W.A., Machado, C.R., Barreto, E.J.F.....[et al.], 2008. “**Biodiesel e óleo vegetal in natura**”. Brasília : Ministério de Minas e Energia. (Soluções energéticas para a Amazônia).

Hiroyasu, H., 1985. “**Diesel Engine Combustion and its Modeling**”, Department of Mechanical Engineering, University of Hiroshima.

Lefebvre, A.H., 1989. “**Atomization and sprays**”.

No, S.Y., 2011. “**HOW VEGETABLE OILS AND THEIR DERIVATIVES AFFECT SPRAY CHARACTERISTICS IN CI ENGINES—A REVIEW**”, Department of Biosystems Engineering, Chungbuk National University, Cheongju.

Pereira, R. S., 2011. “**AVALIAÇÃO E DESEMPENHO DE MOTOR DE INJEÇÃO INDIRETA CONSUMINDO ÓLEO DE PALMA IN NATURA**”, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará.

Perera, S. C., 2015. “**Estudo das características macroestruturais de sprays de óleo vegetal de soja obtidos de um atomizador de diesel**”. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Ramadhans, 2004. A.S., Jayaraj, S., Muraleedharan, C.; “**Use of vegetable oils as i.c. engine fuels - a review**”. Renewable Energy, 29:727–742.

Reitz, R. D., 1978. “**Atomization and other breakup regimes of a liquid jet**”, Princeton University, PH.D.

Torda, T.P., 1973. “**Evaporation of drops and breakup of sprays**”, Astronautica Acta, volume 18.

Apêndice I – Imagens da bancada



Figura Al.1 – Bomba hidráulica com alavanca de acionamento, manômetro e reservatório de combustível



Figura Al.2 – Vista interior da CP.

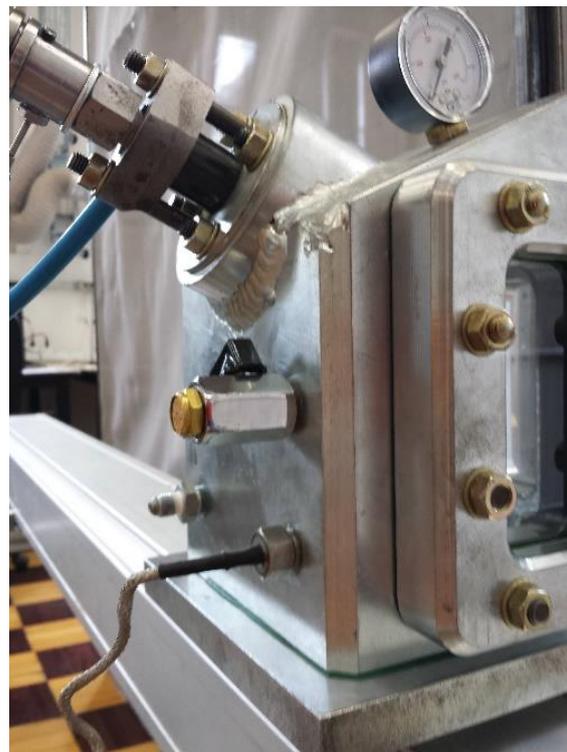


Figura Al.3 – CP com periféricos e CPI acoplados.

APÊNDICE II - Sequências de imagens.

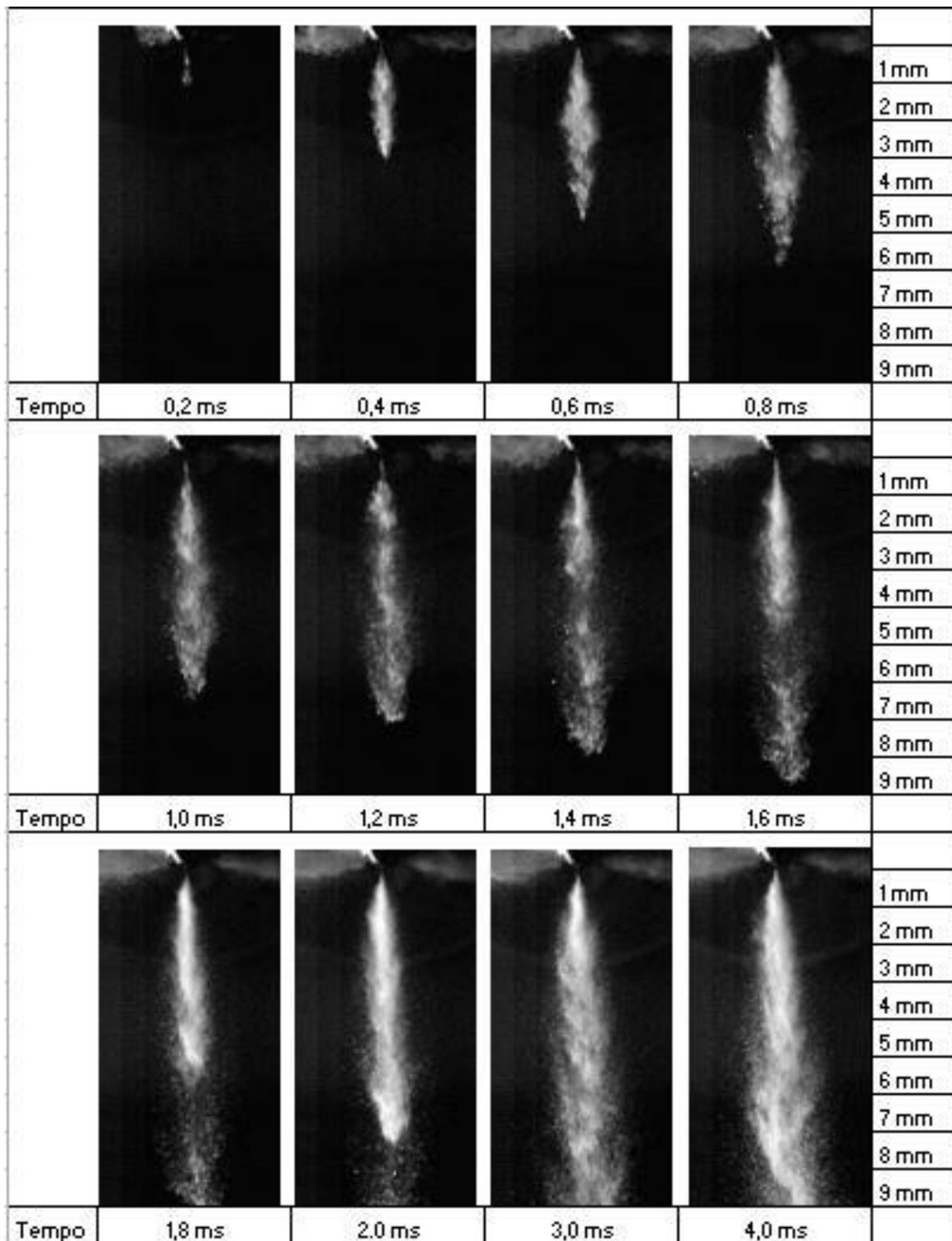


Figura AII.1 – Sequência de imagens entre 0 e 4 ms para jato de OVS preaquecido a 25°C.

APÊNDICE II - Sequências de imagens.

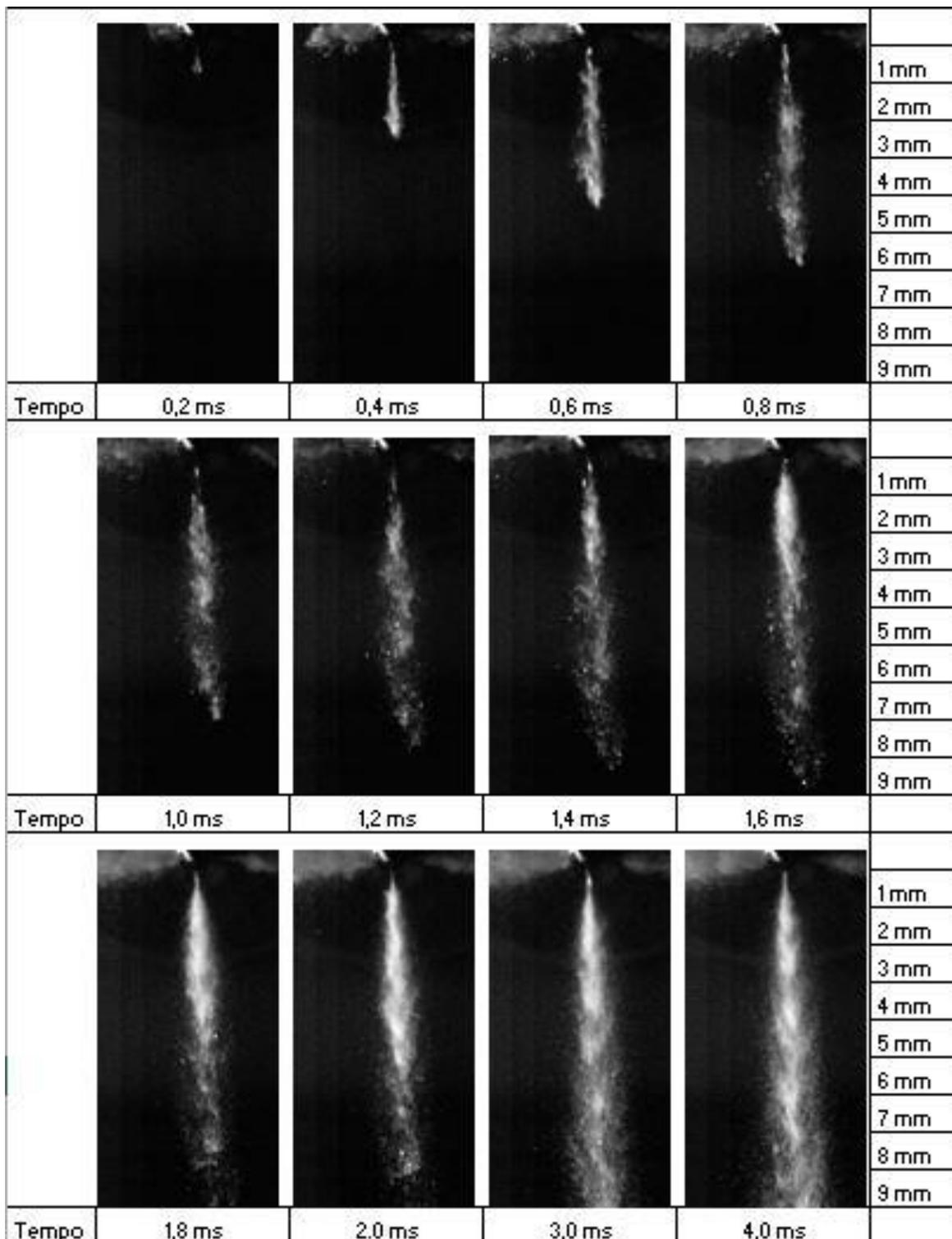


Figura AII.2 – Sequência de imagens entre 0 e 4 ms para jato de OVS preaquecido a 80°C.

APÊNDICE II - Sequências de imagens.

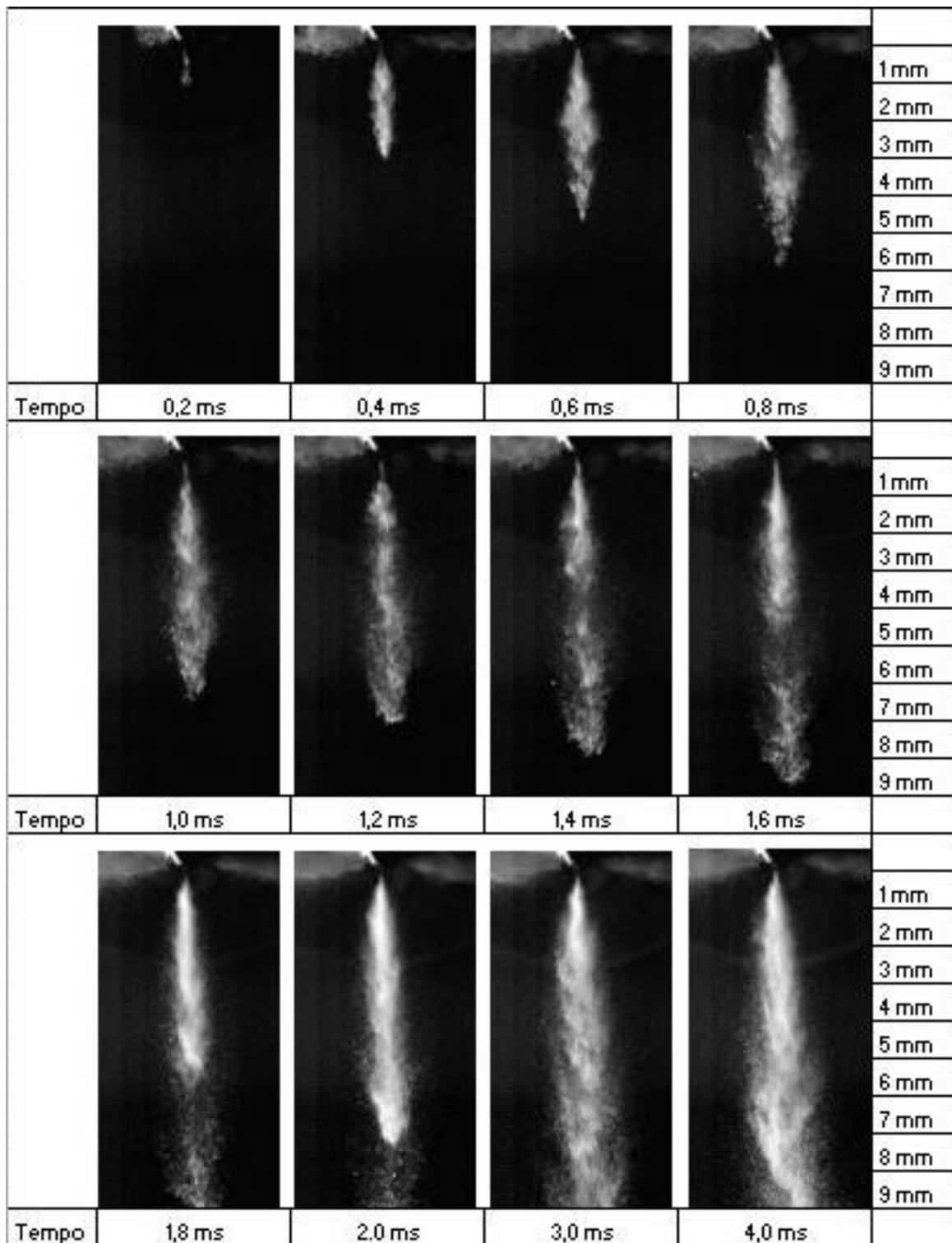


Figura All.3 – Sequência de imagens entre 0 e 4 ms para jato de OVS preaquecido a 120°C.