

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS MACROESTRUTURAIS DE *SPRAYS* DE ÓLEO  
VEGETAL DE SOJA OBTIDOS DE UM ATOMIZADOR DE DIESEL

por

Solimar Carra Perera

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Julho de 2015

ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS MACROESTRUTURAIS DE *SPRAYS* DE ÓLEO  
VEGETAL DE SOJA OBTIDOS DE UM ATOMIZADOR DE DIESEL

por

Solimar Carra Perera  
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da  
Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos  
requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Profa. Dra. Thamy Cristina Hayashi – PROMEC / UFRGS.

Aprovada por:

Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos, ..... FURG

Prof. Dr. Alexandre Vagtinski de Paula, ..... UFRGS

Prof. Dr. Luiz Alberto de Oliveira Rocha, ..... PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Luiz Alberto de Oliveira Rocha  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 31 de Julho de 2015

*Ao término de mais essa etapa acadêmica, só tenho a agradecer a aqueles que me incentivaram para que eu pudesse chegar até aqui. Muito obrigado pai, mãe e irmã.  
Esse trabalho é para vocês.*

## **AGRADECIMENTOS**

Para a realização desse trabalho o envolvimento e auxílio de muitos funcionários da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e da empresa Agrale S.A. foram necessários durante todo o período do estudo.

Primeiramente quero agradecer a minha orientadora profa. Dra. Thamy Cristina Hayashi pelo apoio, incentivo durante toda essa etapa e por aceitar a linha de pesquisa proposta e também ao professor Nattan Caetano pelo auxílio na definição dos equipamentos necessários para a montagem da bancada e por todo suporte dado durante a parte de testes preliminares. Aos professores, Pedro Barbosa Mello e Rodrigo Rossi pelas conversas, dicas e empréstimo de equipamentos indispensáveis para a realização do estudo. Também ao senhor Rafael Quines da Silva técnico do laboratório de combustão (LC) e o senhor João Batista da Rosa técnico do laboratório de ensaios térmicos e aerodinâmicos (LETA) pelo auxílio nos ajustes e montagem da bancada.

A empresa Agrale S.A. pelo apoio e disponibilidade na montagem da câmara pressurizada, agradeço aqui, em nome do engenheiro Vinícius Wrubel, coordenador de projetos de tratores e motores, pela total atenção e por intermediar esse processo, também ao senhor Luiz Antônio Foresti, funcionário do laboratório de motores, pela ajuda na montagem e pelas preciosas informações sobre o funcionamento do sistema de injeção de combustível nos motores ciclo diesel fabricados pela Agrale.

Agradecimento muito especial também ao amigo e colega engenheiro mecânico Luiz Alberto De Antoni pela ajuda no projeto da câmara pressurizada e pelas inúmeras conversas e dicas durante todo esse trabalho.

## RESUMO

O emprego de óleos vegetais como combustível em motores ciclo diesel tem se demonstrado viável após diversos estudos de desempenho já desenvolvidos em diversos motores e configurações, porém apresentando algumas restrições quanto ao seu uso contínuo, dentre as quais se destacam a ocorrência de quebras do motor devido ao excesso de carbonização no cabeçote. No Brasil, a abundância de óleos de origem vegetal constitui um incentivo para a realização de estudos visando ao aproveitamento desses combustíveis alternativos, neste contexto, este trabalho apresenta um estudo das características macroestruturais da formação de *sprays* de óleo vegetal de soja *in natura* em um atomizador utilizado em motores diesel em condições de pressão semelhantes às de um motor. Para isso foi montada uma bancada que é constituída de uma câmara pressurizada projetada e fabricada para simular as mesmas condições de massa específica do ar obtidas dentro da câmara de combustão do motor ciclo diesel no instante do início da injeção do combustível. Também é dotada de um sistema de injeção de combustível projetado para que as pressões de funcionamento do conjunto porta injetor mecânico utilizado fosse atingido. O registro da formação do *spray* é realizado por meio de uma câmara de alta velocidade e alta taxa de aquisição de imagens, como o qual é possível avaliar o comportamento dos jatos de óleo de soja e óleo diesel quanto a distância de quebra, penetração da ponta, velocidade e ângulo de abertura de *spray*. Das propriedades físico-químicas do óleo vegetal de soja, a que mais se destaca com relação às propriedades do óleo diesel é a viscosidade, que para os líquidos utilizados nesse trabalho foi verificado que é aproximadamente 15 vezes maior que a viscosidade do óleo diesel. Essa grande diferença nas mesmas condições de temperatura produziram resultados de atomização bem distinta entre os líquidos e verifica-se a necessidade de modificação de mais parâmetros do que somente a densidade do gás para que a atomização seja mais próxima do óleo diesel e o óleo vegetal *in natura* possa ser utilizado nos motores, pois os regimes de atomização observados condizem com o previsto considerando as propriedades dos dois óleos nas condições testadas.

Palavras-chave: Combustão, motores diesel, parâmetros de atomização, óleo vegetal de soja.

## ABSTRACT

The use of vegetable oils as fuel in diesel engines has proven to be viable after several performance studies already developed in several engines and settings, but presenting some restrictions on its continued use, among which stand out the occurrence of engine failures due to over-charred on the head. In Brazil, plenty of vegetable oils is an incentive to carry out studies for the use of these alternative fuels, in this context, this work presents a study of macro-structural characteristics of the formation of vegetable oil sprays soy in kind in an atomizer used in diesel engines into pressure conditions similar to those of an engine. To this it was mounted on a stand which consists of a pressure chamber designed and manufactured to simulate the same conditions of air density obtained within the combustion chamber of the diesel engine cycle at the time of start of fuel injection. It is also equipped with a fuel injection system designed for operating pressures of the whole mechanical door gun used was reached. The record of the formation of the spray is carried out by means of a camera high speed and high rate of image acquisition, as which it is possible to evaluate the behavior of soybean oil jets and diesel oil as the distance break, tip penetration , speed and spray opening angle. From the physico-chemical properties of vegetable soybean oil, which excels in respect of diesel fuel properties is viscosity, as for liquids used in this work was found that it is approximately 15 times greater than the viscosity of diesel oil. This great difference in the same conditions of temperature produced very different atomization results between the liquid and there is a need for more parameters change than just the density of the gas for atomization is closer to diesel oil and vegetable oil in nature can be used in engines, because atomization schemes observed consistent with the expected considering the properties of both oils under the conditions tested.

Keywords: Combustion, diesel engine, *spray* characteristic, soy bean vegetable oil.

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
1.1	Contextualização do problema estudado .....	16
1.2	Revisão bibliográfica .....	17
1.3	Objetivos.....	18
1.4	Estrutura do trabalho.....	19
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	20
2.1	Motor de ICO.....	20
2.2	Câmara de combustão de injeção direta.....	22
2.3	Sistema de injeção de combustível em motores diesel.....	24
2.3.1	Conjunto porta injetor .....	24
2.3.2	Bico injetor .....	26
2.4	Atomizadores de líquido .....	27
2.5	Processo de atomização .....	27
2.6	Parâmetros macroestruturais da atomização .....	33
2.6.1	Penetração da ponta do <i>spray</i> .....	36
2.6.2	Ângulo do <i>spray</i> .....	36
2.6.3	Distância de quebra.....	35
2.7	Condições que afetam a atomização .....	36
2.7.1	Influência das propriedades do líquido na atomização .....	36
2.7.2	Influência das propriedades do meio na atomização .....	37
<b>2.8</b>	<b>COMBUSTÍVEIS</b> .....	38
2.8.1	Óleo Diesel .....	39
2.8.2	Óleo vegetal de soja.....	39
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	41

3.1	Bancada de ensaios .....	41
3.1.1	Câmara pressurizada .....	42
3.1.2	Bico injetor .....	45
3.1.3	Sistema de injeção de combustível .....	47
3.2	Condições de ensaio.....	49
3.3	Instrumentação .....	53
3.3.1	Sistema de pressurização .....	53
3.3.2	Sistema de coleta de imagens .....	54
3.3.3	Sistema de coleta de temperaturas .....	55
3.3.4	Sistema de coleta de volume de líquido.....	57
3.4	Procedimento experimental .....	58
3.5	Ajustes iniciais .....	63
3.5.1	Calibração das termoresistências .....	63
3.5.2	Ajuste da captura de imagem .....	64
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>65</b>
4.1	Distância de quebra.....	65
4.2	Penetração da ponta do <i>spray</i> .....	68
4.3	Velocidade da ponta do <i>spray</i> .....	70
4.4	Ângulo do <i>spray</i> .....	73
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>74</b>
5.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	75
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>76</b>
	<b>APÊNDICE A</b> – Gráfico de temperatura de calibração das termoresistências .....	<b>79</b>
	<b>APÊNDICE B</b> – Acompanhamento da temperatura da câmara pressurizada durante o ensaio ..	
	.....	80
	<b>APÊNDICE C</b> – Valores médios calculados para óleo diesel .....	<b>81</b>
	<b>APÊNDICE D</b> – Valores médios calculados para óleo vegetal de soja .....	<b>87</b>
	<b>ANEXO I</b> – Diferença do óleo diesel comercializado no Brasil .....	<b>92</b>

<b>ANEXO II</b> – Câmara pressurizada .....	94
<b>ANEXO III</b> – Janela de visualização.....	95
<b>ANEXO IV</b> – Desenho do conjunto porta injetor (Bosch) .....	97
<b>ANEXO V</b> – Regulador de pressão .....	97
<b>ANEXO VI</b> – Mangueira termoplástica .....	99
<b>ANEXO VII</b> – Certificado de calibração manômetro de pressão da câmara pressurizada ...	100

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação esquemática das etapas do ciclo diesel (Adaptado de Giacosa, 2000).....	21
Figura 2.2 – Efeito da turbulência pela admissão de ar (Giacosa, 2000 – Adaptado).....	23
Figura 2.3 – Câmara de injeção direta toroidal tipo Saurer (Giacosa, 2000 – Adaptado).....	23
Figura 2.4 – Linha de alimentação e de injeção de combustível (Adaptado de Heywood, 1988) .....	24
Figura 2.5 – Conjunto porta injetor em corte (Adaptado de Bosch, 2004) .....	25
Figura 2.6 – Bico injetor tipo furo (Adaptado de Bosch, 2004).....	26
Figura 2.7 – Detalhes do volume adicional abaixo do assento da agulha (Adaptado de Bosch, 2004).....	27
Figura 2.8 – Diagrama de Ohnesorge (Adaptado de Baumgarten, 2006) .....	29
Figura 2.9 – Efeito da densidade do gás na distância de quebra do jato (Adaptado de Baumgarten, 2006) .....	30
Figura 2.10 – Regimes de quebra de jato (Argachoy, 2001).....	31
Figura 2.11 – Curva de distância de quebra do jato na superfície em função da velocidade $u$ (Adaptado de Baumgarten, 2006).....	32
Figura 2.12 – Caracterização do <i>spray</i> (Adaptado de Heywood, 1988).....	35
Figura 2.13 – Influência da pressão do meio no comprimento de ruptura de núcleo do jato (Argachoy, 2001).....	38
Figura 3.1 – Montagem geral da bancada – Vista 1 .....	41
Figura 3.2 – Montagem geral da bancada – Vista 2 .....	42
Figura 3.3 – Câmara pressurizada .....	43
Figura 3.4 – Instalação do CPI no localizador.....	44
Figura 3.5 – Disposição dos itens periféricos.....	45
Figura 3.6 – Elementos constituintes do BIC (Bosch, 2006) .....	46
Figura 3.7 – Sistema de injeção de combustível manual.....	48
Figura 3.8 – Reservatório de combustível .....	49
Figura 3.9 – Estudo motor M90 ID – Torque máximo.....	51
Figura 3.10 – Câmera de alta velocidade com lente acoplada e tripé de fixação .....	54
Figura 3.11 – Luminária LED .....	55

Figura 3.12 – Termoresistências.....	56
Figura 3.13 – Sistema de aquisição de dados LXI .....	56
Figura 3.14 – Localização da instalação da termoresistência.....	57
Figura 3.15 – Pipeta graduada .....	58
Figura 3.16 – Distância de quebra (Adaptado de Reitz, 1978) .....	61
Figura 3.17 – Desenvolvimento da ponta e ângulo do <i>spray</i> .....	62
Figura 4.1 – Estudo fotográfico do jato de OD e OVS de 0,2 a 0,8 ms .....	66
Figura 4.2 – Estudo fotográfico do jato de OD e OVS de 1 a 1,6 ms .....	67
Figura 4.3 – Estudo fotográfico do jato de OD e OVS de 1,8 a 4 ms .....	68
Figura 4.4 – Valores da penetração da ponta do <i>spray</i> de OD e OVS. ....	69
Figura 4.5 – Penetração da ponta do <i>spray</i> de OD e OVS – 2 MPa.....	70
Figura 4.6 – Valores da velocidade de avanço da ponta do <i>spray</i> de OD e OVS. ....	71
Figura 4.7 – Velocidade de avanço da ponta do <i>spray</i> OVS.....	72
Figura 4.8 – Velocidade de avanço da ponta do <i>spray</i> 2 MPa. ....	72
Figura 4.9 – Valores do ângulo do <i>spray</i> de OD e OVS. ....	73
Figura A. 1 – Temperatura de calibração das termoresistências .....	79
Figura B. 1 – Temperaturas da câmara pressurizada durante o ensaio.....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Ácidos graxos do OVS (Misra, 2010) .....	40
Tabela 3.1 – Dados do BIC .....	46
Tabela 3.2 – Procedimento experimental .....	58
Tabela 3.3 – Propriedades dos combustíveis.....	59
Tabela 3.4 – Propriedades do gás nitrogênio.....	59
Tabela C. 2 – OD para a pressão de 2,5 MPa.....	81
Tabela C. 3 – OD para a pressão de 2 MPa.....	83
Tabela C. 4 – OD para a pressão de 1,5 MPa.....	85
Tabela D. 1 – OVS para a pressão de 2,5 MPa .....	87
Tabela D. 2 – OVS para a pressão de 2 MPa .....	89
Tabela D. 3 – OVS para a pressão de 1,5 MPa .....	91

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo
BI	Bomba injetora de combustível
BIC	Bico injetor de combustível
BH	Bomba hidráulica
CAV	Câmara de alta velocidade
CP	Câmara pressurizada
CPI	Conjunto porta injetor diesel
ICO	Ignição por compressão
ID	Injeção direta
MCI	Motores de combustão interna
NC	Número de cetano
OD	Óleo diesel
OV	Óleo vegetal “ <i>in natura</i> ”
OVS	Óleo vegetal de soja “ <i>in natura</i> ”
PMI	Ponto morto inferior
PMS	Ponto morto superior
PMMA	Polimetil-metacrilato
SP	Sistema de pressurização
SICM	Sistema de injeção de combustível manual

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_0$	Área do orifício de injeção, m <sup>2</sup>
$CD$	Coefficiente de descarga do injetor
$d$	Diâmetro do jato, m
$d_0$	Diâmetro do orifício de injeção, m
$FH$	Fluxo hidráulico do injetor, cm <sup>3</sup> /30s
$F_F$	Força da mola, N
$F_D$	Força resultante do combustível, N
$i$	Índice de refração
$l$	Comprimento do orifício do injetor, m
$L$	Distância de quebra, m
$n$	Número de orifícios do injetor
$n_1$	Coefficiente politrópico
$P_a$	Pressão de admissão do motor, MPa
$P_c$	Pressão no final da compressão, MPa
$P_i$	Pressão de injeção, MPa
$P_{N_2}$	Pressão de nitrogênio, MPa
$P_0$	Pressão atmosférica, MPa
$P_1$	Pressão do ar na entrada do motor, MPa
$P_2$	Pressão na câmara no instante de injeção, MPa
$Re_l$	Número de Reynolds, $\left[ \frac{u \cdot d_0 \cdot \rho_l}{\mu_l} \right]$
$R_{N_2}$	Constante do nitrogênio, J/kgK
$T$	Temperatura ambiente, °C
$T_a$	Temperatura admissão, K
$T_c$	Temperatura de compressão, K
$T_g$	Temperatura da câmara pressurizada, °C
$T_0$	Temperatura atmosférica, K

$T_1$	Temperatura do ar na entrada do motor, K
$T_2$	Temperatura na câmara no instante de injeção, K
$u$	Velocidade do líquido, m/s
$We_l$	Número de Weber do líquido, $\left[ \frac{u^2 \cdot d_0 \cdot \rho_l}{\sigma} \right]$
$We_g$	Número de Weber do gás, $\left[ \frac{u^2 \cdot d_0 \cdot \rho_g}{\sigma} \right]$
$Z$	Número de Ohnesorge, $\left[ \frac{\sqrt{We_l}}{Re_l} \right]$
$\Delta P$	Varição de pressão, MPa
$\theta$	Dispersão do jato, (graus)
$\mu_l$	Viscosidade dinâmica do líquido, Pa.s
$\rho_l$	Massa específica do líquido, kg/m <sup>3</sup>
$\rho_g$	Massa específica do gás, kg/m <sup>3</sup>
$\rho_0$	Massa específica do ar, kg/m <sup>3</sup>
$\rho_1$	Massa específica do ar na entrada do motor, kg/m <sup>3</sup>
$\rho_2$	Densidade na câmara no instante de início de injeção, kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{N_2}$	Densidade de nitrogênio, kg/m <sup>3</sup>
$\sigma_l$	Tensão superficial do líquido, mN/m
$\varepsilon$	Razão de compressão
$\nu$	Viscosidade cinemática, m <sup>2</sup> /s

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização do problema estudado

De acordo com Vaitilingom, 2013, o interesse em óleos vegetais “in natura” (OV) como combustível para motores de ignição por compressão (ICO) não é nova. A sua utilização como combustível é conhecida desde a fase de desenvolvimento do motor, havendo registros do emprego de óleo de amendoim em experimentos realizados por Rudolphe Diesel no ano de 1911. Na década de 1920, engenheiros e pesquisadores se dedicam a sua viabilidade e a partir desta época têm sido realizados estudos para o uso de OV como fonte de energia renovável. Desde a década de 70 experimentos vêm sendo realizados principalmente na Alemanha, demonstrando que é possível obter-se uma operação confiável com OV. No Brasil, a sua utilização ganhou espaço na década de 70, em virtude do grande potencial de cultivo de plantas oleaginosas que o país possui e com a crise do petróleo surge a criação do Pró-Óleo (Plano de Produção de Óleos Vegetais para fins Energéticos) pelo governo federal. Na década de 80 com a retomada da produção do petróleo e a venda a valores mais aceitáveis as pesquisas foram encerradas [Biodiesel e Óleo Vegetal in natura, 2008]. Em 2003, houve um interesse renovado na sua utilização, principalmente nos países em desenvolvimento, que dessa forma buscam promover o acesso ao serviço de energia a nível local em diferentes setores como na agricultura, com irrigação, geração de energia, abastecimento de água potável e processamento pós-colheita (descasque, moagem) [Vaitilingom, 2013].

Na geração de energia em comunidades isoladas, a utilização do OV prioriza atender o pequeno agricultor, que não tem acesso a energia elétrica e necessita se deslocar até grandes centros urbanos e ou comerciais para poder abastecer seus equipamentos. A utilização de motores estacionários para suprimento de energia elétrica a comunidades isoladas estaria prevista para locais de difícil acesso ao OD, e conseqüentemente com maior justificativa econômica para o uso do OV como combustível. Assim, com a possibilidade de poder obter seu combustível através de fabricação própria ou em conjunto com outros agricultores em pequenas cooperativas, gera economia e desenvolvimento do meio rural. Com a vantagem de ser um combustível totalmente renovável, o que auxilia na redução das emissões, pois o ciclo de germinação das oleaginosas reabsorve parte do carbono emitido na atmosfera pelos gases de escape, e o enxofre, característico no OD, é praticamente insignificante na sua composição.

## 1.2 Revisão bibliográfica

Poucos estudos sobre o comportamento da formação do *spray* em motores de injeção direta utilizando como combustível o OV são encontrados na literatura. Lüft *et al.* 2007, realizou um estudo da propagação do *spray* utilizando óleo vegetal de canola em comparação ao OD em uma câmara pressurizada com gás inerte. Nesse estudo, foi observado uma vaporização deficiente e um comportamento do perfil do *spray* não uniforme. Essas observações levaram a conclusão de que o principal motivo desse comportamento se deve as propriedades físico-químicas do OV, principalmente a alta viscosidade em comparação ao OD.

A grande maioria dos trabalhos nessa área está, relacionada ao estudo do funcionamento dos motores operando com OV em substituição ao OD e no acompanhamento dos resultados dos ensaios de desempenho e durabilidade. E de acordo com Pereira, 2013, são em sua maioria estudos realizados em motores de injeção direta, embora a injeção indireta seja apontada por diversos autores como a melhor forma de minimizar os problemas identificados quando da utilização de OV como combustível.

Estudos de desempenho com motores de ICO utilizando OV apresentam resultados satisfatórios. Wander *et al.*, 2011, estudou o desempenho comparativo de um motor monocilíndrico operando com óleo vegetal de soja “*in natura*” (OVS). Os valores obtidos nesse estudo para potência utilizando OVS apresentaram uma redução de 4%, mesmo percentual obtido para o torque. Ghidini, 2009, também estudou o desempenho comparativo do OVS com OD em dois motores bicilíndricos, um refrigerado a água e o segundo com refrigeração a ar. Os resultados obtidos para o torque e potência para OVS em ambos os motores foram próximos aos obtidos com o uso de OD.

Embora os estudos de desempenho utilizando OVS apresentem resultados satisfatórios, de acordo com Lüft *et al.*, 2007, as principais dificuldades de quando se utiliza esse tipo de combustível ocorrem em quase todas aplicações práticas. Os estudos de desempenho são ensaios de curta duração, com a utilização por tempos mais prolongados, acentuam-se os problemas de combustão incompleta e penetração estendida do *spray* que conduzem a um aumento de combustível no óleo lubrificante, além de carbonização no pistão, na câmara de combustão, nas válvulas e sobre o bico injetor e são responsáveis por sérias falhas no funcionamento do motor independente da quantidade de horas de funcionamento.

De acordo com Pereira, 2011, esses problemas identificados esta relacionado as propriedades físico-químicas do OV, que devido a sua elevada viscosidade provoca uma baixa atomização dentro do cilindro, gerando uma combustão incompleta que resulta em acúmulo no bico injetor e na câmara de combustão acrescido de um aumento do consumo de combustível.

Moresco, 2008, realizou um estudo comparativo do emprego de OVS em testes de durabilidade por 1000 horas de dois motores monocilíndricos. Durante este tempo de ensaio um dos motores que operou com OVS teve de ser aberto três vezes devido ao travamento dos anéis do pistão. Na abertura foi constatado um excesso de carbonização no topo do pistão, nas válvulas, na camisa e no cabeçote do motor.

O combustível injetado para dentro do cilindro do motor de ICO se desintegra em numerosas gotas de tamanhos diferentes. O movimento de avanço da ponta do *spray* e a distância de quebra dão indícios para a compreensão do processo de desintegração do jato de combustível e o ângulo é a resultante desse processo de desintegração. Estes parâmetros do pulverizador são relacionados uns aos outros no processo de desintegração e afetam a formação da mistura por meio de processos aerodinâmicos e termodinâmicos na câmara de combustão do motor de ICO. O entendimento das características macroestruturais de desintegração do *spray* tem importância na concepção de um motor ciclo diesel de alta qualidade, pois de acordo com Arai *et al.*, 1984, nesses motores a combustão é fortemente controlada pela pulverização do combustível injetado na câmara de combustão. No entanto, conforme Arai e Hiroyasu, 1990, o processo de combustão diesel são muito complexos e seus mecanismos detalhados não são bem compreendidos. O fator principal que controla essa combustão é a formação da mistura que é controlada, pelas características do sistema de injeção de combustível, turbulência de ar no dentro do cilindro e a caracterização da pulverização.

### **1.3 Objetivos**

Sabendo do potencial que o OVS possui como substituto ao OD de origem fóssil e dos consequentes problemas que se originam a partir da sua utilização, esse trabalho tem por objetivo realizar um estudo experimental da pulverização do OVS em um bico injetor diesel, visando acompanhar o comportamento das características macroestruturais do *spray* em

comparação ao OD em diferentes condições de pressão, com a finalidade de simular a pressão encontrada dentro da câmara de combustão do motor no instante de injeção do combustível.

Os objetivos específicos são:

- Avaliar a distância de quebra do jato para condição de pressão de 2,5 MPa,
- Estudo comparativo da penetração da ponta, velocidade e ângulo do *spray*, para as pressões de 2,5; 2 e 1,5 MPa.

#### **1.4 Estrutura do trabalho**

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos.

No Capítulo 1 foi apresentada a introdução, contextualizando o problema e apresentando a revisão dos estudos já realizados sobre o assunto. Em seguida foram apresentados os objetivos do trabalho.

No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica de motores de ICO, da atomização de óleos combustíveis, bem como do método de avaliação escolhida, destacando a importância das propriedades do fluido e do meio no processo de atomização.

O Capítulo 3, nomeado de Metodologia, apresenta a descrição da bancada de testes, e do procedimento experimental.

No Capítulo 4 é feita a apresentação e análise dos resultados dos ensaios e medições.

No Capítulo 5 são reunidas as principais conclusões e as sugestões de trabalhos futuros para aprofundamento do estudo.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo trata da literatura necessária para o desenvolvimento do trabalho. Esse estudo aborda duas grandes áreas de conhecimento, máquinas térmicas, mais especificamente motores de ICO de injeção direta e o processo básico de atomização com a desintegração de jatos líquidos. A união dessas duas áreas no processo de atomização do líquido ocorre no instante da injeção de combustível dentro da câmara de combustão do motor em forma de *spray*, facilitando a queima do combustível e gerando energia mecânica. Aqui será brevemente apresentado o funcionamento dos motores de ICO com foco no tempo de compressão para determinar as condições de operação no instante da injeção de combustível, a câmara de combustão de injeção direta, sistema de injeção e o atomizador utilizado em motores. Já para a compreensão do processo de atomização de jatos líquidos, as características externas tais como distância de quebra, penetração, velocidade da ponta e ângulo do *spray* serão os parâmetros macroestruturais abordados e detalhados assim como as condições do meio que afetam a sua formação. Para concluir, os combustíveis que serão empregados nesse estudo terão suas principais características detalhadas.

### 2.1 Motor de ignição por compressão

Os motores de combustão interna (MCI) funcionam transformando a energia calorífica resultante da queima ou da expansão térmica de uma mistura ar/combustível em energia mecânica e baseiam-se no princípio segundo o qual os gases se expandem quando aquecidos. O processo de conversão se dá através de ciclos termodinâmicos que envolvem compressão, expansão e mudança de temperatura de gases. Toda a pressão gerada pela mistura ar/combustível formada dentro da câmara de combustão nos motores ciclo diesel pode ser utilizada para movimentar órgãos do motor (máquina Térmica), transformando toda a energia calorífica do combustível em energia mecânica [Taylor,1988]. No motor ciclo diesel a combustão da mistura ar/combustível se dá por um processo chamado de “compressão” do ar, que faz com que toda a mistura contida na câmara de combustão seja transformada em trabalho ou calor perdido para o meio ambiente [Heywood, 1988]. Funcionam pelo princípio de ignição espontânea, isto é, a combustão é iniciada quando o combustível é injetado

diretamente dentro da câmara de combustão, quando a compressão do ar está próxima do seu ponto máximo.

O ciclo de operação dos MCI se entende pela sucessão de movimentos que o fluido escuta no cilindro e se repete periodicamente. O motor ciclo diesel de maior aplicação é o de quatro tempos, onde o ciclo se desenvolve em quatro movimentos alternativos do pistão, que equivale a duas rotações do virabrequim. A duração do ciclo compreende o deslocamento alternativo do pistão do ponto morto inferior (PMI) ao ponto morto superior (PMS). Os motores são ditos de quatro (4) tempos quando o ciclo se realiza com quatro movimentos do pistão, ou seja, a cada duas (2) voltas da árvore de manivela. É importante salientar que nos motores de quatro tempos somente no tempo de combustão se produz energia mecânica, enquanto que os outros três absorvem energia. Um ciclo diesel real de quatro tempos é apresentado na Figura 2.1:

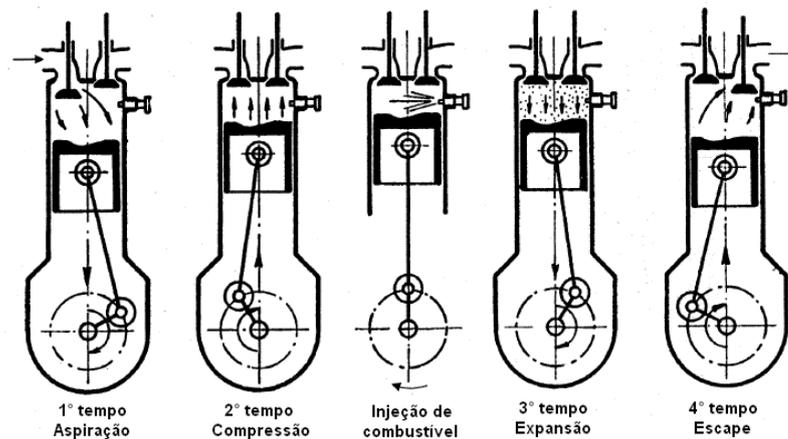


Figura 2.1 – Representação esquemática das etapas do ciclo diesel (Adaptado de Giacosa, 2000).

2º tempo – Compressão: Após a introdução do ar no cilindro o movimento do pistão do PMS ate o PMI, ocorre o fechamento da válvula de admissão e o pistão inverte o movimento e se desloca para o PMS, onde o volume de ar contido no cilindro é comprimindo e aumentando sua pressão chegando a temperaturas para valores da ordem de 600°C.

Injeção de combustível: Pouco antes do pistão, atingir o PMS, ao ser injetado, o combustível é atomizado no interior do cilindro e ao contato com o ar aquecido inicia sua autoignição. Esta fase de combustão ou de introdução de calor é teoricamente realizada a

pressão constante, pois as gotículas de combustível são injetadas no cilindro ao tempo em que o pistão inicia a etapa de expansão.

O combustível produz potência num motor de ICO quando é atomizado e misturado com ar na câmara de combustão. A pressão criada pela subida do pistão no cilindro causa um rápido aumento de temperatura, assim quando o combustível é injetado, a mistura ar/combustível inflama-se e a energia do combustível é liberada forçando o pistão para baixo, movimentando o virabrequim [Heisler, 2002].

3° tempo – Combustão e expansão: O valor alcançado pela pressão depois da queima desloca o pistão para baixo, gerando torque do motor. Antes de o pistão chegar ao PMI a válvula de escape inicia a abertura, e os gases da combustão que já estão com uma pressão baixa começam a ser expelidos.

## **2.2 Câmara de combustão de injeção direta**

A câmara de injeção direta (ID) é caracterizada por gerar uma combustão com elevado valor de pressão e de sensibilidade à qualidade do combustível. O combustível é injetado diretamente sobre a cabeça do pistão pelo bico injetor em pequenos orifícios direcionados segundo um ângulo apropriado. Funciona com pressões elevadas para conseguir uma pulverização muito fina e uma distribuição adequada do combustível no ar a alta pressão. Conforme Heisler, 2002, torque, potência e consumo de combustível do motor, são profundamente influenciados pela câmara de combustão e geometria do topo do pistão, a geometria da câmara de combustão tem a função de otimizar o enchimento e esvaziamento do cilindro em todas as faixas de rotação do motor, criando uma condição de mistura ar/combustível com uma alta turbulência, a fim de queimar todo o material no menor tempo possível.

Também de acordo com Heisler, 2002, a intensidade da mistura ar/combustível depende da atomização e da turbulência do ar admitido. A turbulência é o movimento de rotação do fluxo de ar dentro do cilindro em torno do seu eixo e é gerada pelo posicionamento do duto de admissão em um dos lados do cilindro, promovendo a entrada do ar no cilindro de forma tangencial, como apresentado na Figura 2.2. Quando o movimento do pistão inverte em direção ao PMS, a turbulência do ar aumenta com o auxílio da geometria da câmara, promovendo também o aumento da temperatura com a compressão. O nível de turbulência

criado pela geometria da câmara é baixa e a mistura é auxiliada pela pulverização do combustível através de orifícios pequenos do bico injetor, que a uma elevada pressão geram jatos com uma adequada penetração que permite gerar o contato necessário entre as partículas de combustível e o ar admitido, impedindo a formação de gotas maiores que não queimam.

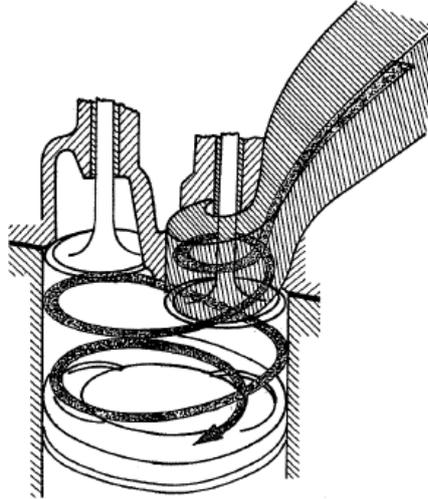


Figura 2.2 – Efeito da turbulência pela admissão de ar (Giacosa, 2000 – Adaptado)

Como pontos críticos, temos a elevada temperatura do pistão, porém o menor consumo de combustível e uma maior simplicidade construtiva, além da melhora na partida do motor são algumas das suas vantagens. O modelo de câmara mais tradicional é apresentado na Figura 2.3.

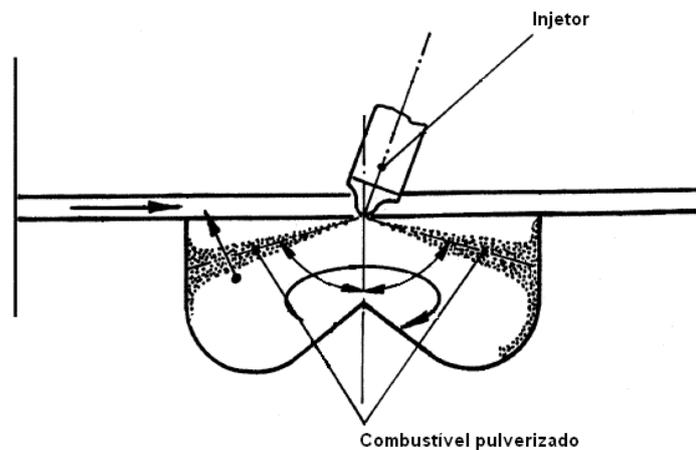


Figura 2.3 – Câmara de injeção direta toroidal tipo Saurer (Giacosa, 2000 – Adaptado)

### 2.3 Sistema de injeção de combustível do motor de ignição por compressão

O sistema de injeção de combustível de um motor de ICO, através da bomba injetora (BI), deve ser capaz de fornecer a quantidade necessária de combustível, em função da rotação e carga do motor, e realizar a injeção no momento correto e com a velocidade desejada. A pressão elevada gerada pela BI, transporta o combustível através do tubo de alta pressão para o bico injetor de combustível (BIC) instalado no topo do cilindro. O excesso de combustível não injetado é transportado de volta para o tanque de combustível pela tubulação de retorno.

A Figura 2.4 apresenta uma representação esquemática da linha de alimentação e de injeção de combustível de um motor de ICO com a indicação dos principais componentes.

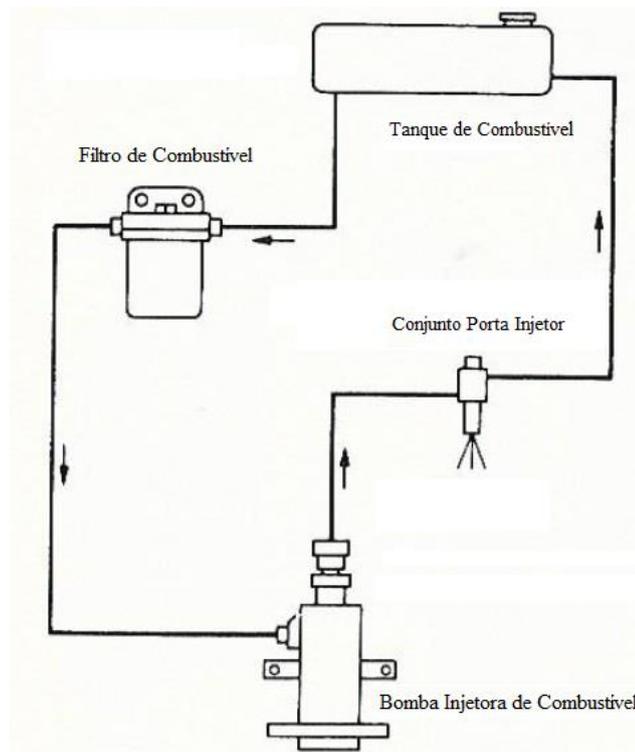


Figura 2.4 – Linha de alimentação e de injeção de combustível (Adaptado de Heywood, 1988)

#### 2.3.1 Conjunto porta injetor

O conjunto porta injetor diesel (CPI) conecta a linha de injeção de combustível ao motor. O CPI é composto de duas partes distintas: o corpo injetor e o BIC propriamente dito.

No seu funcionamento a abertura e fechamento da agulha têm funcionamento automático pelo efeito da pressão no seu interior. A agulha do BIC se movimenta no começo da injeção, devido ao impacto da pressão na linha de combustível, suprida pela BI. Durante os intervalos de tempo entre as injeções, se mantêm fechado automaticamente pela ação de uma mola calibrada. Uma pequena quantidade de combustível utilizada para lubrificar e remover calor das partes móveis dos injetores é retornada ao sistema de alimentação através do tanque de combustível.

O CPI contendo o BIC tipo furo, em geral é instalado em uma posição específica que assegura um alinhamento correto entre o orifício de injeção a câmara de combustão e o topo do pistão. Por esta razão, saliências ou parafusos ocos são geralmente empregados para fixar o CPI no cabeçote do motor, mantendo a sua posição e orientação de instalação. As molas de compressão são adequadas para o uso de acordo com o diâmetro da agulha e pressões de abertura extremas a partir de 180 bar (18 MPa) [Bosch, 2004]. Na Figura 2.5 é apresentado o desenho do CPI utilizado nesse trabalho.

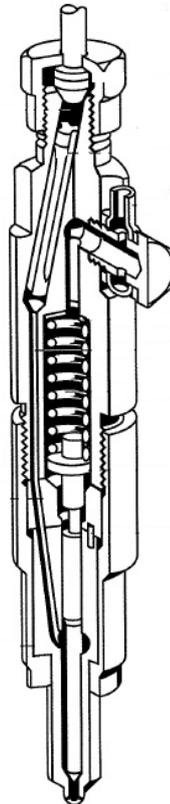


Figura 2.5 – Conjunto porta injetor em corte (Adaptado de Bosch, 2004)

### 2.3.2 Bico injetor de combustível

A parte mais importante do sistema de injeção é o BIC. Na Figura 2.6, é apresentado o modelo tipo furo que equipa os motores de ID. A sua finalidade é acelerar o combustível e suas características construtivas e de funcionamento possuem um papel importante no desenvolvimento da penetração e no ângulo de formação do *spray*. De acordo com Giacosa, 2000, o tamanho do orifício de saída (comprimento e diâmetro) é importante, pois, garante a direção da penetração e do jato do *spray* da atomização do combustível. Essas características afetam a formação da mistura e, assim, a potência do motor, o consumo de combustível e os níveis de emissões.

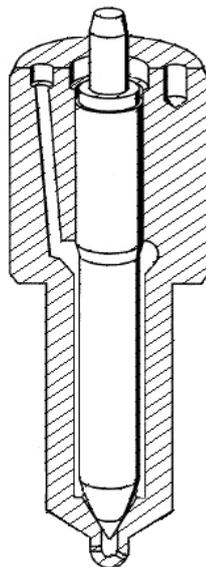


Figura 2.6 – Bico injetor tipo furo (Adaptado de Bosch, 2004)

O BIC tipo furo que equipa os motores de ID possui um volume adicional abaixo do assento da agulha, conhecido como furo cego e que juntamente com a integridade mecânica do cone do injetor, limita o comprimento do orifício em 0,8 mm. Na Figura 2.7 é possível visualizar em mais detalhes o volume adicional e do assentamento da agulha no cone do injetor.

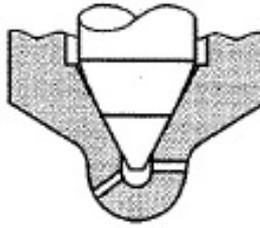


Figura 2.7 – Detalhes do volume adicional abaixo do assento da agulha (Adaptado de Bosch, 2004)

## 2.4 Atomizadores de líquido

A primeira função de um atomizador de pressão é acelerar e desintegrar um jato de líquido, conduzindo à dispersão das gotas resultantes de forma a constituírem um *spray*. O modelo mais simples de atomizador de pressão é o de orifício plano. O princípio de funcionamento deste gênero de atomizadores é a conversão da energia de pressão em energia cinética do jato de líquido em movimento à saída do atomizador. Quanto maior a pressão de injeção, mais refinada é a atomização, ou seja, menor é o tamanho das gotas formadas. Os jatos de líquido ficam sujeitos a forças de atrito ao serem injetadas num meio em repouso, o que provoca a sua desintegração em gotas. Fajgenbaum, 2013, afirma que o aspecto do jato que emerge do injetor se assemelha ao de um jato contínuo, formando gotas quando a pressão de injeção é elevada ou excede a pressão do gás ambiente onde está inserido. De acordo com Coelho e Costa, 2007, os parâmetros determinantes da qualidade do *spray* neste tipo de atomizadores são o diâmetro do orifício do injetor, a diferença de pressão, a taxa de escoamento e as propriedades físicas do líquido.

## 2.5 Processo de atomização

Para aumentar a área superficial do líquido é necessário realizar trabalho, que é alcançado com o auxílio de forças externas, que, no caso do processo de atomização, são as forças aerodinâmicas. A inclusão da influência dessas forças na análise de instabilidade, portanto, é de grande importância. Além disso, a turbulência no escoamento do líquido pode contribuir bastante para o processo de atomização. Esta turbulência pode ser descrita pela velocidade do escoamento do líquido, que quanto maior, mais facilmente atomiza. A

atomização normalmente é alcançada combinando-se a energia cinética do líquido com o contato entre a corrente de líquido e gás. Para tanto, imprime-se uma velocidade a um dos fluidos ou aos dois simultaneamente. Em atomizadores de pressão, o líquido, em alta velocidade, entra em contato com o ar parado ou se movendo com baixa velocidade. Vale ressaltar que a turbulência por si só já é capaz de romper o líquido, não havendo necessidade, em alguns casos, de haver forças externas [Fajgenbaum, 2013].

Dependendo da sua velocidade, das propriedades do líquido e do gás circundante, o rompimento de um jato de líquido é regido por diferentes mecanismos de quebra. Estes mecanismos diferentes são normalmente caracterizados pela distância entre o orifício e o ponto de formação da primeira gota, o chamado comprimento de quebra, e o tamanho das gotículas que são produzidas. De acordo com Reitz e Bracco, 1986, apud Baungarten, 2006, podem ser distribuídas em quatro regimes, o regime de Rayleigh, o primeiro e segundo regimes de ruptura induzida pelo meio, e o regime de atomização.

A fim de descrever quantitativamente o processo de quebra do jato, Ohnesorge realizou medições do comprimento do jato intacto e mostrou que o processo de desintegração pode ser descrito pelo número de Weber do líquido

$$We_l = \frac{u^2 \cdot d_0 \cdot \rho_l}{\sigma} \quad (2.1)$$

e pelo número de Reynolds, também baseado nas propriedades do combustível

$$Re = \frac{u \cdot d_0 \cdot \rho_l}{\mu_l} \quad (2.2)$$

Igualando-se as expressões da velocidade do jato  $u$ , deriva-se o número adimensional de Ohnesorge,

$$Z = \frac{\sqrt{We_l}}{Re} = \frac{\mu_l}{\sqrt{\sigma \cdot \rho_l \cdot d_0}} \quad (2.3)$$

que inclui todas as propriedades relevantes do fluido onde  $\sigma$  é a tensão superficial na interface líquido-gás,  $\rho_l$  é a densidade do líquido,  $\mu_l$  é a viscosidade dinâmica do líquido, bem como o diâmetro de orifício  $d_0$  do injetor. A Figura 2.8 mostra o diagrama Ohnesorge, 1878, apud

Baumgarten, 2006, na qual a combinação de  $Z$  e  $Re$  permite delimitar as razões correspondentes aos diferentes regimes de atomização.

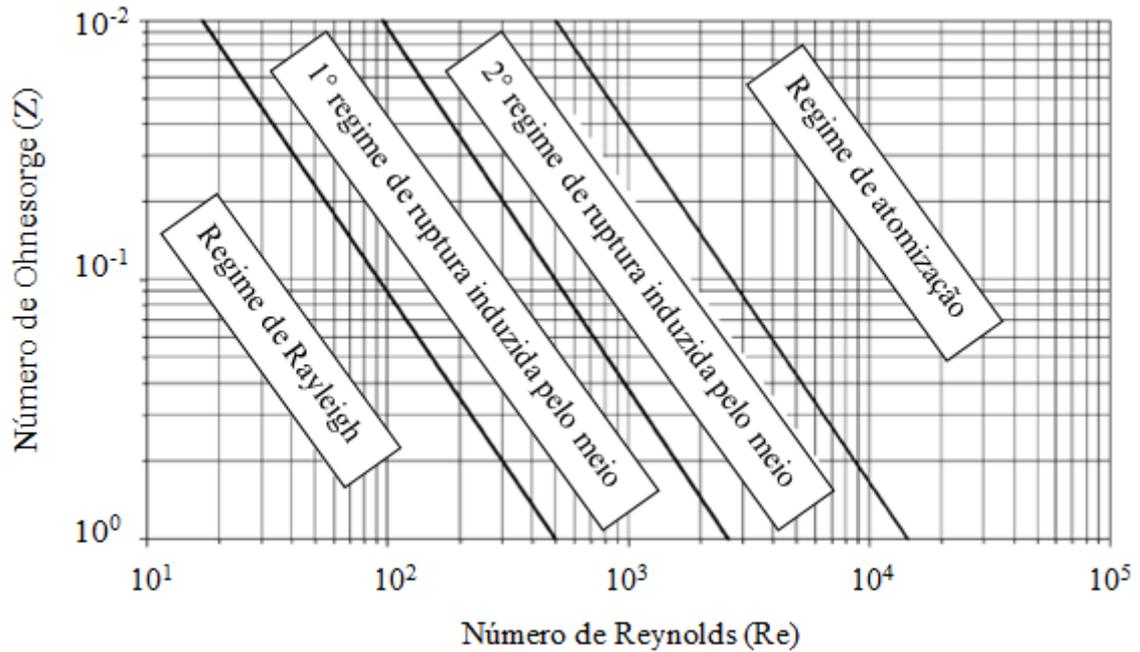


Figura 2.8 – Diagrama de Ohnesorge (Adaptado de Baumgarten, 2006)

No entanto, tem-se que apenas as propriedades da fase líquida na descrição dos regimes não é o suficiente, porque a atomização pode ser melhorada pelo aumento da massa específica do gás (por exemplo, Torda, 1973, Hiroyasu e Arai, 1990) apud Baumgarten, 2006. Assim, Reitz, 1978, sugeriu incluir a razão entre a massa específica do gás e do líquido para estender o diagrama de Ohnesorge em uma forma tridimensional, como mostrado na Figura 2.9.

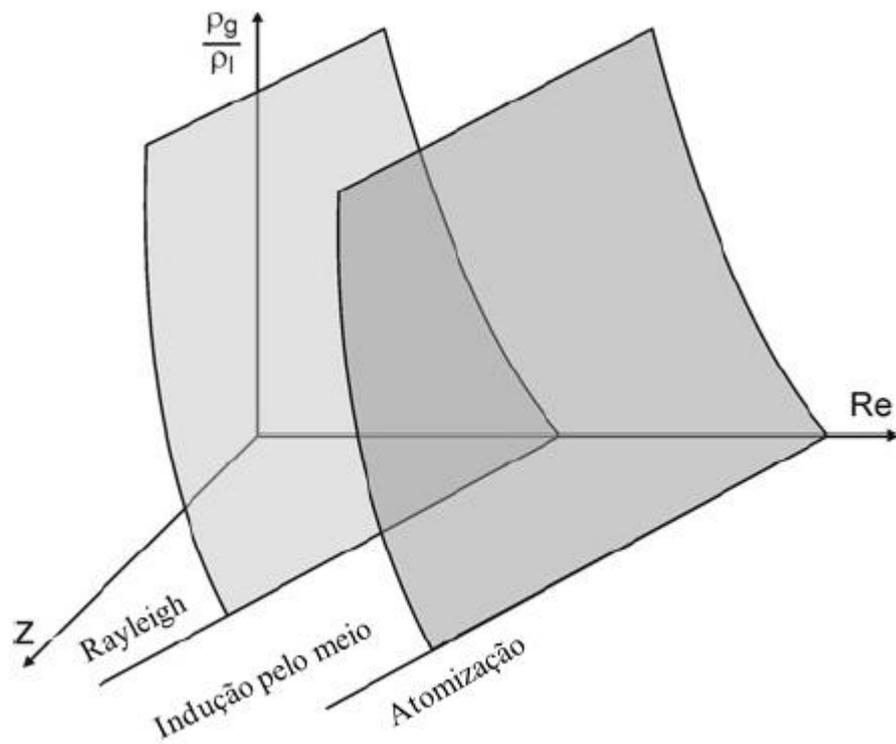


Figura 2.9 – Efeito da densidade do gás na distância de quebra do jato (Adaptado de Baumgarten, 2006)

Uma descrição esquemática dos diferentes regimes de jato de dissolução é apresentada na Figura 2.10. Se a geometria do injetor é fixa e as propriedades do líquido não variam, a única variável é a velocidade do líquido  $u$ .

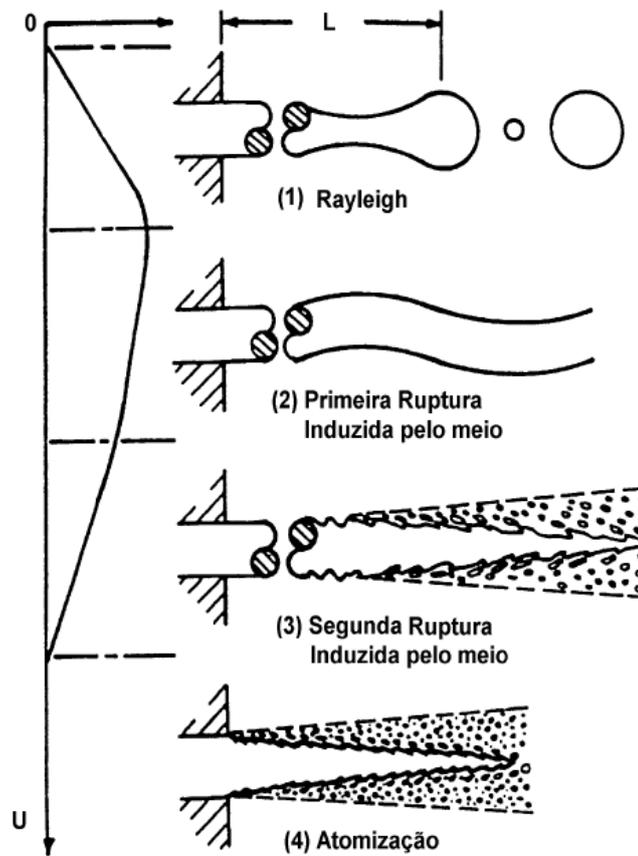


Figura 2.10 – Regimes de quebra de jato (Argachoy, 2001)

A Figura 2.11 mostra a correspondente curva de quebra, que descreve o comprimento do jato ininterrupto como uma função da velocidade do jato  $u$ . Nela pode ser identificada: ABC – gotejamento, CD quebra de Rayleigh, EF – primeira ruptura induzida pelo meio, FG (FH) – segunda ruptura induzida pelo meio, abaixo de G (H) – regime de atomização.

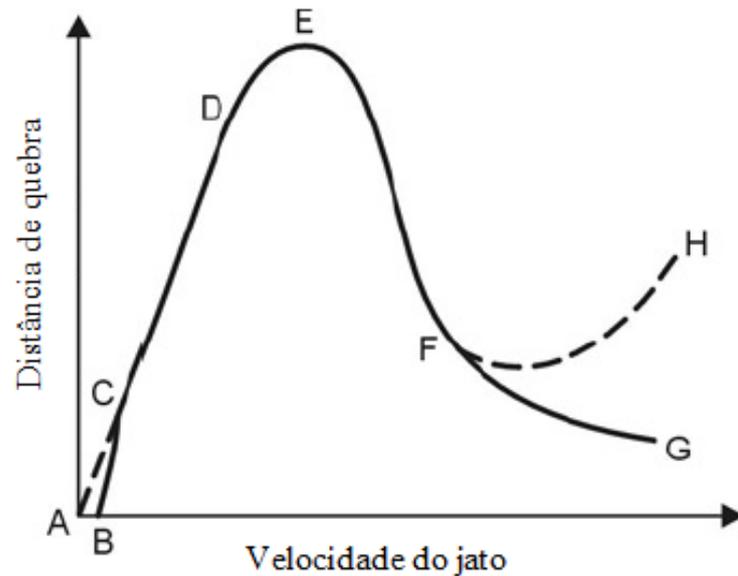


Figura 2.11 – Curva de distância de quebra do jato na superfície em função da velocidade  $u$   
(Adaptado de Baumgarten, 2006)

Em velocidades muito baixas, ocorre o gotejamento e nenhum jato é formado. Um aumento da velocidade de injeção resulta na formação de um comprimento do jato ininterrupta, que aumenta proporcionalmente a velocidade. Este regime é chamado de quebra de Rayleigh (CD). A quebra ocorre devido ao crescimento das oscilações do eixo de simetria do jato completo, iniciadas pela inércia do líquido e pela força de tensão superficial. As gotas se contraem para fora do jato, e o seu tamanho é maior que o diâmetro do orifício do injetor  $d_0$ . Outras descrições foram publicadas, por Yuen 1968, Nayfey 1968, e Rutland e Jameson, 1970 apud Baumgarten, 2006.

Um novo aumento da velocidade do jato resulta em uma diminuição do comprimento de quebra, que ainda é um múltiplo do diâmetro do injetor. O tamanho médio das gotas diminui, e está agora na escala do diâmetro do bocal. Neste primeiro regime induzido pelo vento, as forças relevantes do regime de Rayleigh são amplificadas por forças aerodinâmicas. O parâmetro relevante é o número Weber da fase gasosa ( $We_g$ ), que descreve a influência da fase de gás do meio. Uma análise teórica detalhada é dada em Reitz e Bracco, 1990 apud Baumgarten, 2006.

No segundo regime de quebra induzida pelo vento, o escoamento no interior do bico se torna turbulento. A quebra do jato ocorre, devido ao crescimento instável de ondas curtas de superfície e de comprimento de onda que são iniciadas pela turbulência do jato e

amplificadas pelas forças aerodinâmicas devidas à velocidade relativa entre o gás e o jato. O diâmetro das gotículas resultantes é menor do que o diâmetro do injetor, e o comprimento de desmembramento diminui com um aumento do número de Reynolds, linha FG na Figura 2.11. A análise teórica detalhada é novamente dada em Reitz e Bracco, 1990 apud Baumgarten, 2006. O jato não rompe mais como um todo e devido à separação de pequenas gotículas da superfície do jato, o processo de desintegração começa na superfície do jato e é gradualmente fragmentado até que esteja completamente quebrado. Verificam-se dois comprimentos de quebra, o comprimento medido do orifício ao início da superfície de ruptura (distância de quebra) e o comprimento até o fim da quebra do jato (comprimento do cone). Enquanto o comprimento de superfície intacta diminui com o aumento da velocidade do jato, o comprimento do núcleo pode aumentar. No entanto, deve-se salientar que as medições de ambos os comprimentos tornam-se extremamente difícil com o aumento do número de Reynolds e por esta razão, resultados experimentais de diferentes autores apresentam diferenças.

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. Um núcleo intacto ou, pelo menos, um núcleo denso consistindo de fragmentos grandes de líquidos pode ainda estar presente vários diâmetros de orifício a jusante do injetor. As gotículas resultantes são muito menores do que o diâmetro do orifício do injetor. A descrição teórica de quebra do jato no regime de atomização é muito mais complexa do que em qualquer outro regime, porque o processo de desintegração depende fortemente das condições de escoamento no interior do orifício do injetor, que são geralmente desconhecidas e de natureza caótica. A validação de modelos também é difícil, porque os experimentos tornam-se extremamente complicados devido às altas velocidades, às pequenas dimensões, e à pulverização muito densa [Baumgarten, 2006].

## **2.6 Parâmetros macroestruturais da atomização**

Heywood, 1988, descreve que o combustível é introduzido dentro do cilindro do motor de ICO através de um ou mais orifícios do BIC com uma grande diferença de pressão entre a linha de combustível e o cilindro. Assim que o jato deixa o atomizador ele se torna turbulento

e se espalha, misturando-se com o ar comprimido contido no cilindro. A superfície externa quebra-se em gotas próximos à saída do atomizador e a coluna de líquido que deixa o BIC se desintegra no interior do cilindro através de um comprimento finito chamado distância de quebra. A medida que avança, a massa de ar dentro do *spray* aumenta, ele se dispersa, sua largura aumenta e a velocidade diminui. As gotas de combustível evaporam devido ao processo de entrada do ar e a ponta do *spray* penetra para dentro do cilindro a uma taxa menor. O *spray* que penetra no ar se espalha e desce com uma velocidade menor devido a massa de ar que aumenta a dispersão do *spray*. As gotas da parte externa evaporam antes, criando uma mistura vapor de ar/combustível que envolve o núcleo líquido. As altas velocidades são no eixo do jato. A razão equivalente é maior na linha central (rica em combustível ao longo da maior parte do jato), decrescendo a zero (sem mistura de ar) na fronteira do *spray*.

A esse *spray* de gotas formado de acordo com Fajgenbaum, 2013, se atribuem alguns parâmetros que tem como finalidade caracterizar a atomização. Dentre os parâmetros, são designados de macroestruturais aqueles que caracterizam o *spray* como um todo. Os parâmetros macroestruturais característicos são a distância de quebra, a penetração e o ângulo do *spray*. As disposições dos parâmetros podem ser identificados na Figura 2.12.

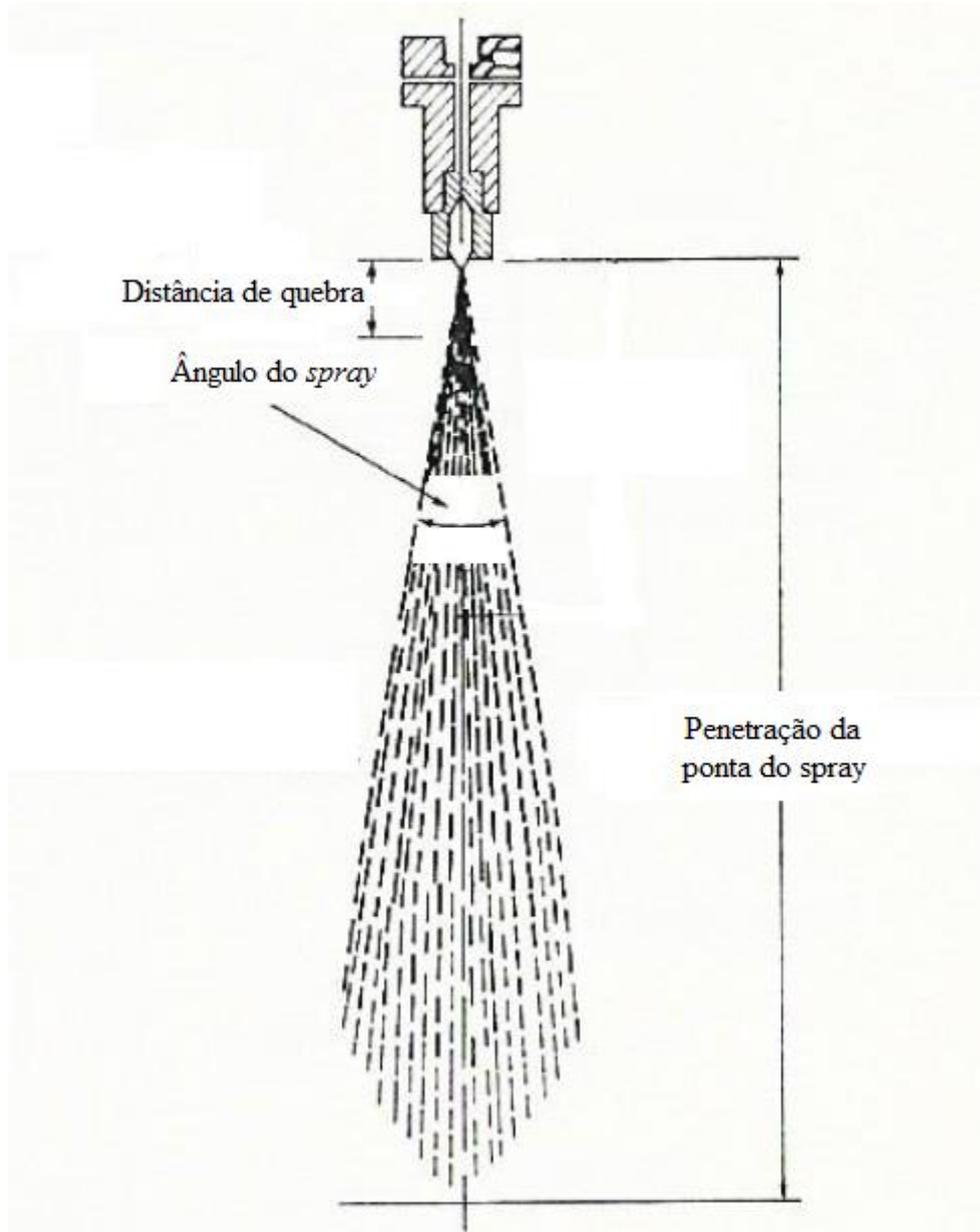


Figura 2.12 – Caracterização do *spray* (Adaptado de Heywood, 1988)

### 2.6.1 Distância de quebra

A distância de quebra é caracterizada pelo parâmetro que mede a distância desde o orifício de injeção até o ponto onde o filme líquido inicia sua quebra em ligamentos e deixa de ser contínuo [Fajgenbaum, 2013]. A distância de quebra identifica em qual regime de quebra o jato pertence, a sua formação logo abaixo do orifício de injeção independente do seu comprimento caracteriza que o jato está no segundo regime induzido pelo meio, já quando a dispersão do jato é identificada logo na saída do orifício o regime de atomização é atingido.

### 2.6.2 Penetração da ponta do *spray*

A penetração pode ser definida como o alcance máximo do *spray*. Sua medida considera a máxima distância que o *spray* atinge, portanto é como se uma linha imaginária fosse traçada entre o orifício de injeção e o ponto onde o *spray* termina [Fajgenbaum, 2013]. É um parâmetro importante para o projeto de motores, pois, quando devidamente considerado, minimiza o choque do *spray* com as paredes do cilindro e topo do pistão e auxilia na redução do consumo de combustível.

### 2.6.3 Ângulo do *spray*

O ângulo do cone do *spray* é o parâmetro que mede a dispersão do jato atomizado. Para auxiliar nessa análise, duas linhas retas imaginárias partindo com origem do centro do orifício de injeção são traçadas paralelas as fronteiras do jato para facilitar a medição do ângulo formado, uma vez que, na realidade, os contornos do *spray* são curvados quando a injeção for realizada em um meio que não seja o vácuo [Fajgenbaum, 2013].

## 2.7 Condições que afetam a atomização

O processo de atomização, avaliado por meio dos parâmetros que o caracterizam, listados no item anterior, pode ser influenciado por fatores relacionados ao líquido a ser atomizado ou ao ambiente no qual o líquido será despejado. Há, ainda, fatores relacionados à geometria do atomizador e as condições de operação que podem influenciar no resultado da atomização. Tanto o líquido quanto o meio que interage com ele afetam o processo de atomização por meio de suas propriedades intensivas [Fajgenbaum, 2013].

### 2.7.1 Influência das propriedades do líquido na atomização

As propriedades dos líquidos que exercem influência no processo de atomização são massa específica, tensão superficial e viscosidade. Para autores como Lefebvre e Bayvel e Orzechowski apud Baumgarten, 2006 a massa específica do líquido é a propriedade que menos afeta a sua atomização, se comparada às outras duas propriedades. Isto ocorre por dois

motivos, o primeiro é que os fluidos comumente utilizados para atomização possuem massa específica próximas umas das outras, o que dificulta a comparação desta propriedade entre eles, o segundo é que quando dois fluidos de massa específica distintas são utilizados para fins de teste, as outras propriedades, como viscosidade e tensão superficial, variam amplamente também, o que prejudica a análise individual da massa específica.

Segundo Lefebvre, 1989, a força de tensão superficial é definida como a tensão superficial multiplicada pelo aumento da área superficial do líquido após ser atomizado. Sendo a propriedade responsável por se opor ao processo de atomização e por esta razão é um parâmetro de atomização importante, pois quanto maior for o seu valor mais difícil será romper o filme líquido em gotas e gotículas e formar essa nova área superficial.

A viscosidade é a propriedade mais abordada nos estudos que investigam a influência de parâmetros na atomização. A viscosidade é a medida de resistência do líquido ao escoamento. Viscosidade elevada significa que o combustível pode não fluir com facilidade, aumentando o desgaste da BI e do BIC. Isto porque, segundo Lefebvre, 1989, uma modificação desta propriedade afeta não só o tamanho médio das gotas formadas como também o padrão do *spray* e a vazão através do bocal de saída do injetor. A viscosidade, assim como a tensão superficial, também se relaciona com a dificuldade que o líquido enfrenta ao entrar em contato com o ar e se romper em gotas e gotículas e está ligada às perdas viscosas e, portanto, na quantidade de energia disponível para que o processo de atomização ocorra.

### 2.7.2 Influência das propriedades do meio na atomização

No final do ciclo de compressão dos motores de ICO, o combustível é injetado na câmara de combustão preenchida com ar que está sobre uma pressão significativamente maior do que a atmosférica. A diferença de pressão no injetor é fator determinante na velocidade do jato e influencia significativamente na formação do *spray*.

Conforme Chigier, 1981 apud Argachoy, 2001, registros fotográficos de alta velocidade mostram que em injeções ocorrendo em ambientes à pressão atmosférica, são observados longos ligamentos de líquido na região central do *spray*. Nesta condição, a quebra do núcleo do jato (comprimento do cone) ocorre a uma considerável distância a jusante do

injetor e a densidade do número de gotas na periferia do *spray* diminui, quando comparada com as injeções ocorrendo em condições de pressões do meio, maiores do que a atmosférica.

O efeito da pressão do meio no comprimento de ruptura do jato pode ser visto mais diretamente na Figura 2.13, no levantamento experimental comparativo feito por Hiroyasu, 1982 apud Lefebvre, 1989. As curvas indicam um significativo efeito da pressão na faixa de 0,1 a 3 MPa, enquanto que o aumento de 3 para 4 MPa teve um efeito mais modesto no comprimento de ruptura do núcleo do jato [Argachoy, 2001].

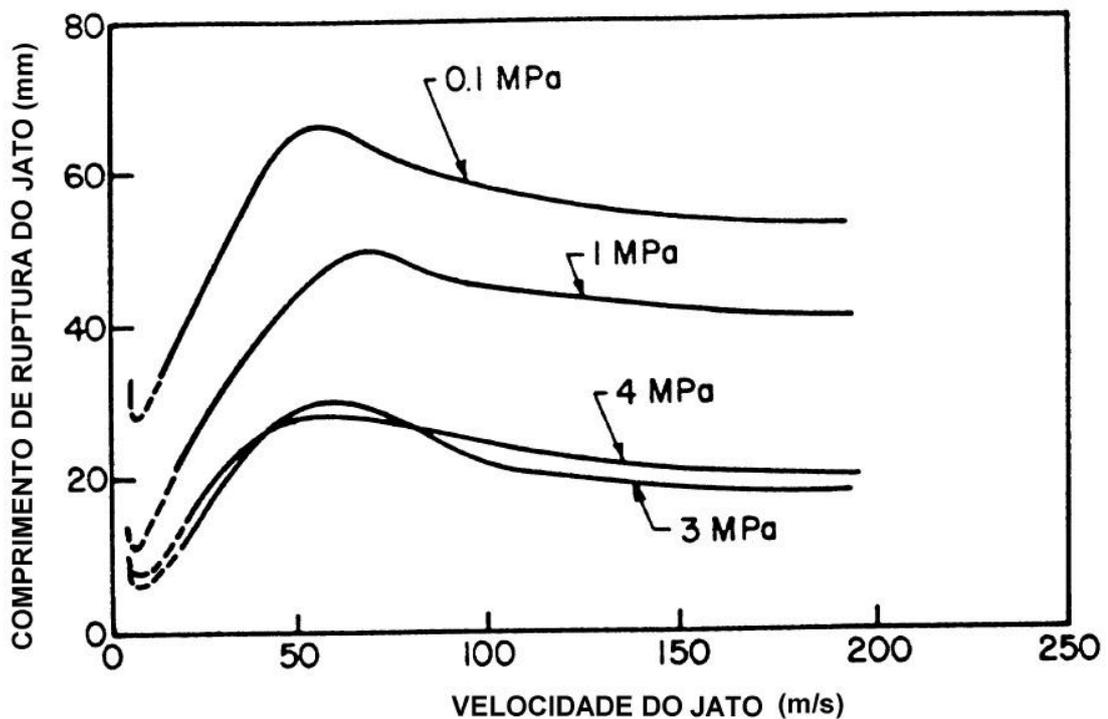


Figura 2.13 – Influência da pressão do meio no comprimento de ruptura de núcleo do jato (Argachoy, 2001)

## 2.8 COMBUSTÍVEIS

O enfoque básico deste trabalho está nos combustíveis líquidos, especificamente o OD e o OVS. De acordo com Taylor, 1995, o caráter do combustível usado pode ter considerável influência sobre o projeto, potência, eficiência, consumo e, em muitos casos, confiabilidade e durabilidade do motor. As propriedades físico-químicas do combustível são importantes para o funcionamento do motor de ICO, pois exercem grande influência na injeção.

### 2.8.1 Óleo Diesel

O combustível OD conforme especificação da ANP é um dos vários derivados do petróleo e sua produção ocorre por processos de refino de petróleo pelo processamento de gás natural destinado a motores de ICO. O OD se encontra entre os produtos medianamente pesados do processo de destilação do petróleo, apresentando de 10 a 22 carbonos em suas cadeias carbônicas, formadas por alcanos, compostos aromáticos e naftênicos. A resolução mais recente da ANP que regulamenta o OD é a resolução ANP N°50 de 24/12/2013, esta resolução estabelece um OD rodoviário tipo A sem adição de biodiesel e um óleo diesel rodoviário tipo B com adição de biodiesel. No ANEXO I são apresentadas as propriedades físico-químicas do óleo diesel produzido e comercializado no Brasil para uso rodoviário.

### 2.8.2 Óleo vegetal de soja

O fato de o OV ser um combustível adequado para motores de ICO demonstra que deve haver alguma similaridade com as propriedades do OD. A melhor propriedade que demonstra essa compatibilidade é o número de cetano (NC) que para o OV é de 38, já para o OD é de 50. As vantagens do OV como combustível são a fácil disponibilidade, o fator de renovabilidade e menor teor de enxofre e aromáticos na sua composição. As desvantagens são a elevada viscosidade (que varia de 10 a 17 vezes mais que a do OD), baixa volatilidade, e a reatividade das cadeias de hidrocarbonetos insaturados.

A viscosidade mais elevada do OV como já discutido produz uma má atomização do combustível, conduzindo a uma combustão incompleta e formação de depósitos no motor. Para a utilização do OV como combustível é necessária a compreensão de suas propriedades físico-químicas, dentre as mais importantes temos a viscosidade, massa específica, ponto de fluidez, inflamabilidade, destilação e ponto de névoa. As propriedades carburantes estão relacionadas ao poder calorífico, índice de cetano, viscosidade, curva de destilação e ponto de névoa. Dentre as quais o poder calorífico influencia diretamente na potência máxima a ser atingida pelo motor de ICO.

A viscosidade do OV é em média quinze vezes mais elevada que do OD, assim é uma das principais propriedades a serem observadas na sua utilização como combustível em motores de ICO. Ela está associada à medida da resistência interna ao escoamento de um

fluido, que reflete diretamente no mecanismo de atomização do combustível pelo bico injetor e no processo de combustão dentro da câmara e influenciará na potência desenvolvida pelo motor.

O OVS é constituído principalmente por triglicerídeos (ésteres de glicerol com ácidos graxos) que possuem na ligação principal três carbonos com uma longa cadeia de HC, anexado a cada um dos carbonos. Essas cadeias são unidas através de um átomo de oxigênio e um de carbono. A maioria das cadeias de ácidos graxos de OV possuem na sua base dezoito carbonos de comprimento e entre zero e três ligações duplas. Cadeias de ácidos graxos sem duplas ligações são chamados de saturado e com ligações duplas são chamados de insaturados. Algumas das características importantes do OVS são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Ácidos graxos do OVS (Misra, 2010)

Ácidos Graxos	Valor típico
Palmítico	8,0%
Esteárico	4,0%
Total de Ácidos Graxos Saturados	12,0%
Oléico	25,0%
Linoleico	55,0%
Linolênico	8,0%
Total de Ácidos Graxos Insaturados	88,0%

### 3 METODOLOGIA

Esse capítulo trata da descrição da bancada de ensaios e do procedimento experimental adotado para a realização desse estudo. Serão descritos em detalhes três componentes essenciais da bancada, que simulam o funcionamento do sistema de injeção de combustível e a condições de pressurização da câmara de combustão de um motor de ICO. Para simular a injeção de combustível e a condição de pressão dentro da câmara de combustão, foram projetados e fabricados um sistema de injeção de combustível manual (SICM) e uma câmara pressurizada (CP) acrescida da instalação do BIC. Para a coleta dos dados necessários para a análise foram definidas as condições de ensaio e o procedimento experimental, que juntamente com a instrumentação e os ajustes iniciais, possibilitaram a realização do estudo comparativo entre os combustíveis OD e OVS.

#### 3.1 Bancada de ensaios

A montagem da bancada para a realização do estudo pode ser visualizada na Figura 3.1 e Figura 3.2, onde são identificados os equipamentos e sistemas necessários para que a simulação do sistema de injeção de combustível e pressão do interior da câmara de combustão do motor de ICO possa ser realizada dentro de uma sala de laboratório.

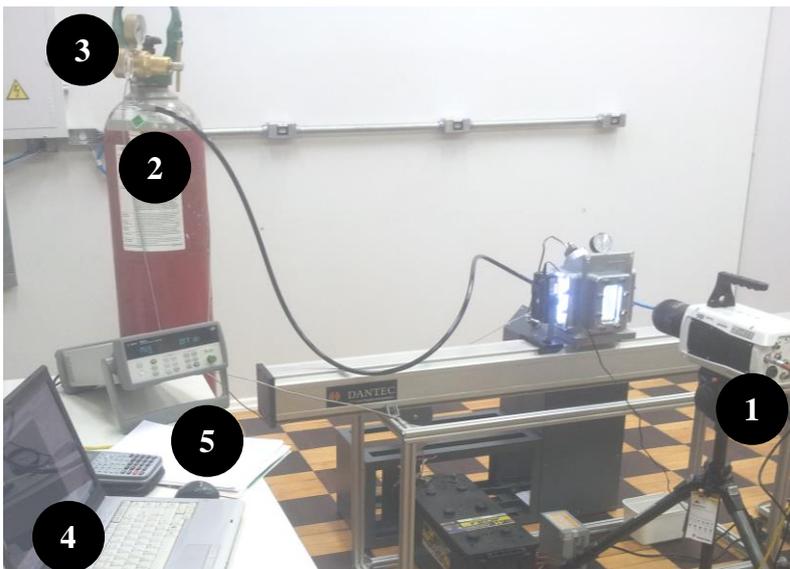


Figura 3.1 – Montagem geral da bancada – Vista 1

1	Câmera de alta velocidade
2	Cilindro de nitrogênio
3	Válvula reguladora de pressão
4	Computador
5	Data logger
6	Câmara pressurizada
7	Sistema de iluminação
8	Sistema de injeção de combustível manual

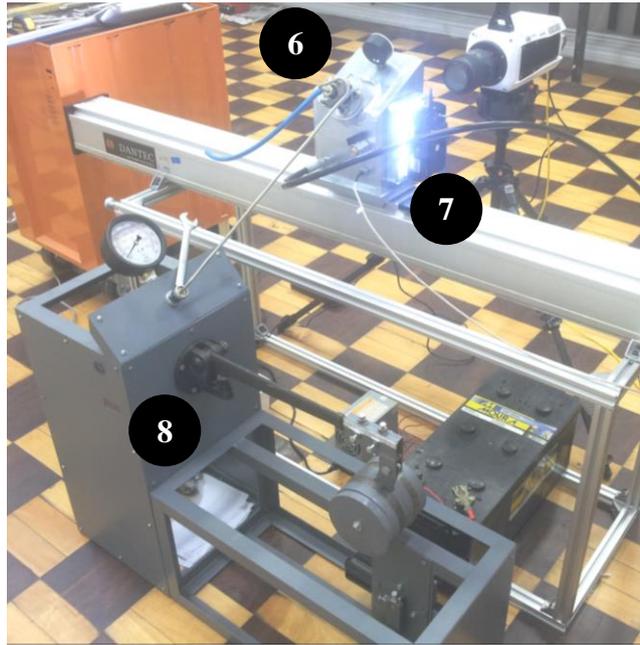


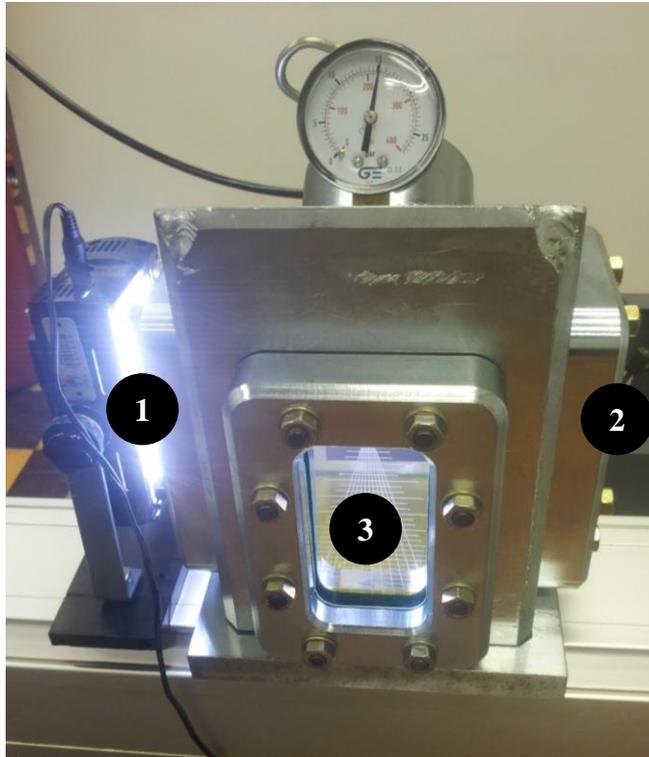
Figura 3.2 – Montagem geral da bancada – Vista 2

### 3.1.1 Câmara pressurizada

A CP permite visualizar as variações nos parâmetros macroestruturais da atomização para as diferentes condições de pressão, o projeto permite realizar ensaios com pressão máxima de gás de 5 MPa (50 bar) para a condição de temperatura ambiente. Isso possibilita que a condição de pressão que existe dentro da câmara de combustão do motor de ICO no instante da injeção possa ser simulada na bancada. Foi fabricada em formato quadrado com chapas soldadas de aço com 18 mm de espessura. A largura total externa é de 150 mm com altura total de 200 mm, o fechamento inferior é em chapa quadrada de 180 mm de lado por 18 mm de espessura fixada no corpo da câmara por 12 parafusos M8 x 25 DIN 912.

Três rebaixos retangulares foram usinados nas paredes laterais para a instalação das janelas de visualização de 145x95 mm, onde após a montagem, a área de visualização interna de cada janela é de 100x50 mm conforme pode ser visualizado em detalhes no ANEXO II. Duas das três janelas ficam dispostas uma de frente para a outra (janela 1 e 2) e ambas permitem a instalação e posicionamento do sistema de iluminação. A posição da terceira janela (janela 3) é perpendicular às janelas 1 e 2, e permite a visualização dos parâmetros macroestruturais a serem estudados. Na Figura 3.3 é possível visualizar a CP em detalhes

instalada sobre o trilho da bancada com o sistema de iluminação já posicionado para a realização do ensaio.



1	Janela de visualização 1
2	Janela de visualização 2
3	Janela de visualização 3

Figura 3.3 – Câmara pressurizada

Cada janela de visualização possui dimensão de 145 × 95 mm e 15 mm de espessura, com cantos arredondados conforme desenho no ANEXO III. São fabricadas em polimetilmetacrilato (PMMA) fixada na estrutura da CP por flange com 8 parafusos prisioneiros M8 × 40 DIN 835 e aparafusadas por de 8 porcas sextavadas M8 DIN 934.

Como o CPI utilizado possui quatro orifícios de injeção, houve a necessidade de se projetar um sistema de regulagem na CP, para que somente um dos furos de injeção ficasse exatamente alinhado permitindo o escoamento do jato verticalmente para baixo e paralelo à janela de visualização número 3. A fixação do CPI é ajustada pelo localizador que possibilita o alinhamento vertical correto do orifício de injeção com a janela de visualização, esse localizador é fixado à estrutura por quatro parafusos prisioneiros M8 × 25 DIN 835. Mais detalhes do localizador são identificados no ANEXO IV. O CPI é instalado no localizador por dois parafusos prisioneiros M8 × 60 DIN 939 através de duas porcas sextavadas M8 DIN 934, a vedação entre o CPI e a CP é por uma arruela de cobre. A fixação e alinhamento do

localizador com o CPI pode ser visualizado na Figura 3.4. Para garantir uma boa vedação dessas peças instaladas junto ao corpo da CP foram utilizadas juntas fabricadas em papelão hidráulico.

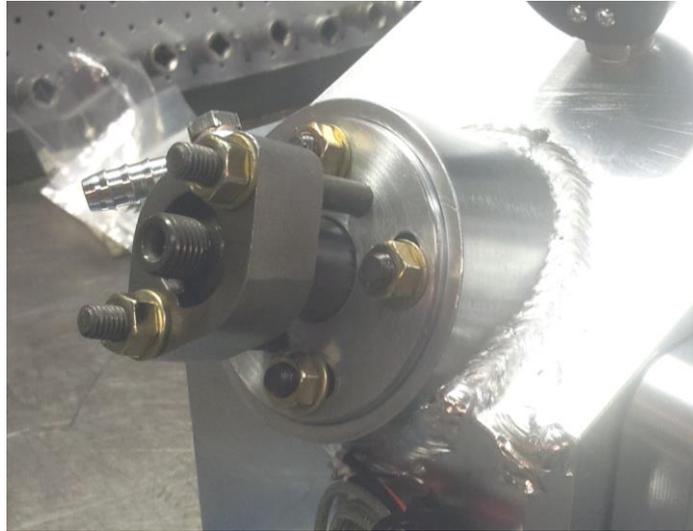


Figura 3.4 – Instalação do CPI no localizador

Para realizar a pressurização, depressurização e medição da temperatura interna da CP na parte traseira, logo abaixo do CPI, foi instalado o terminal para acoplamento da mangueira de alta pressão, a válvula de alívio com atenuador de ruído e a termoresistência. A disposição da instalação desses itens periféricos pode ser visualizada na Figura 3.5. Na parte superior da CP fica instalado o manômetro de pressão que mede a pressão interna.

Para analisar a integridade estrutural e verificar a existência de vazamentos, a CP foi testada antes da realização dos ensaios. Após a montagem completa foram realizados dois testes de pressurização com nitrogênio, o primeiro tinha como objetivo verificar a existência de vazamentos e para isso a pressão de trabalho utilizada foi de 1,0 MPa (10 bar). Após atingir a pressão desejada, a CP foi mantida pressurizada pelo tempo de 30 minutos. Durante esse procedimento, verificou-se uma pequena queda na pressão interna e constatou-se a existência de um vazamento junto à vedação da rosca do manômetro de pressão. Após a eliminação do vazamento, o segundo teste consistiu em realizar uma nova pressurização até a pressão de 3,0 MPa (30 bar) para verificar a integridade estrutural. Após atingir a pressão desejada, a CP foi mantida pressurizada pelo tempo de 60 minutos. Nessa segunda etapa não foi constatado nenhum indicio de falha estrutural e nenhum vazamento.



1	Terminal para acoplamento da mangueira de alta pressão
2	Termoresistência
3	Válvula de alívio com atenuador de ruído

Figura 3.5 – Disposição dos itens periféricos

### 3.1.2 Bico injetor

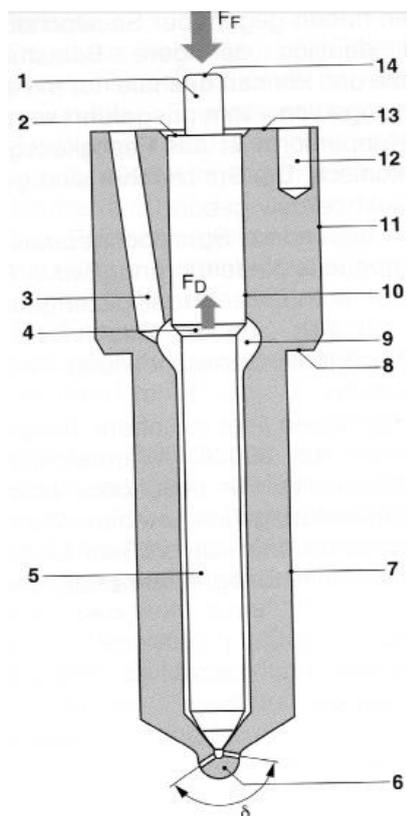
Para esse estudo, um BIC de quatro furos fabricado pela empresa Robert Bosch Limitada, modelo DLLA 140 S 567 (0 433 271 269) foi utilizado. Esse BIC junto com o corpo injetor modelo KBAL 77 S9/13 (0 431 213 011) formam o CPI 0 432 291 838. Mais informações podem ser consultadas no ANEXO V.

As especificações de projeto do BIC indicam que o furo do orifício de injeção possui diâmetro de 0,280 mm, comprimento de 0,8 mm, pressão de abertura máxima de  $190 + 9$  bar (19 MPa); curso da agulha de 0,25 mm e fluxo hidráulico de 658 a 729 cm<sup>3</sup>/30s. Mais parâmetros de funcionamento do BIC podem ser visualizados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Dados do BIC

Parâmetros	Unidade	Valores
$n$	-	4
$l_0$	mm	0,8
$d_0$	mm	0,280
$A_0$	mm <sup>2</sup>	0,0615
$FH$	cm <sup>3</sup> /30s à 100 bar	658 a 729
$CD$	-	0,589
$P_i$	MPa	18
Curso da agulha	mm	0,25

A conexão entre o CPI e o sistema de injeção de combustível se dá pelo tubo de alta pressão que é fixado às extremidades por porcas M14 x 1,5. Já a fixação da linha de retorno do excesso de combustível é realizada por um parafuso oco M8 x 1 conectado a mangueira de combustível por um terminal e direcionado para um reservatório externo. Na Figura 3.6 são apresentados os elementos constituintes do BIC e as forças que atuam no seu funcionamento.



1	Haste da agulha
2	Superfície de pressão
3	Orifício de entrada
4	Cone de pressão
5	Agulha do injetor
6	Cúpula do injetor (furo cego)
7	Corpo do injetor
8	Superfície de apoio
9	Câmara de pressão
10	Guia da agulha
11	Superfície de contato
12	Furo de montagem
13	Superfície de vedação
14	Contato do pino de pressão
$\delta$	Ângulo entre os orifícios de injeção
FF	Força da mola
FD	Força resultante do combustível

Figura 3.6 – Elementos constituintes do BIC (Bosch, 2006)

A agulha do BIC é acionada pela força axial resultante da pressão do combustível sobre a sede da agulha, que força a agulha contra a mola calibrada. O combustível pressurizado age basicamente na superfície definida pelo cone de pressão, e na superfície cônica resultante da diferença entre a área da seção transversal da agulha e a área do acento de vedação no furo cego, para compor a força  $F_D$ , que é composta ainda pela força proveniente da pressão existente na câmara de pressurização, a qual o injetor está exposto através dos orifícios de injeção. Quando esta força resultante  $F_D$  for maior que a força exercida pela mola  $F_F$  inicia-se a injeção, que ocorre até que a força da mola seja maior que a força  $F_D$ . Quando a agulha se movimenta para cima, um jato líquido de alta velocidade é formado, desintegrando-se em um *spray* imediatamente após deixar o orifício de injeção. Esta desintegração é devida a alta velocidade do escoamento promovida pela grande diferença de pressão.

### 3.1.3 Sistema de injeção de combustível manual

O funcionamento do sistema de injeção de combustível manual (SICM) é similar ao de uma bancada utilizada em teste para CPI comumente encontrada em oficinas mecânicas de motores de ciclo diesel. Esse tipo de bancada de teste possui uma bomba hidráulica (BH) de acionamento manual, um reservatório para combustível com filtro, um manômetro e um tubo de alta pressão. Seu princípio de funcionamento é realizar a injeção do combustível através do CPI de forma manual, permitindo a verificação da pressão de abertura e analisar o jato do combustível em relação à forma e atomização, em todos os orifícios de saída do injetor. Também é possível verificar a estanqueidade no BIC e verificar a existência de ruído no CPI.

O SICM tem seu funcionamento pelo movimento alterno de uma alavanca com um curso de acionamento de 150 mm que desloca um êmbolo de 10,5 mm de diâmetro por um percurso de 7 mm. Com esse movimento o combustível é succionado do reservatório e conduzindo até o BID. Permitindo alcançar pressões de injeção que vençam a pressão de calibração da mola do CPI. Para manter uma repetibilidade nas injeções de combustível, o acionamento foi realizado por uma massa de 10 kg, que foi escolhida como a melhor razão entre o tempo de injeção e a limitação de peso para acionamento do sistema de injeção de combustível projetado. A fixação da massa à alavanca foi realizada por um adaptador retangular fabricado em tubo 20 x 40 mm, o adaptador é fixado a alavanca por oito parafusos M6 e a massa é fixada ao adaptador por um parafuso M10 com porca e arruela.

Para o estudo, o SICM foi fabricado em duas estruturas em aço com cantoneiras de abas iguais de 30 mm. Cada uma das duas estruturas possui uma base quadrada de 30 x 30 cm e 60 cm de comprimento e foram fixadas através de quatro parafusos M8 com porca e arruela, formando uma estrutura final no formato em “L”. Na parte superior da estrutura foi fixada a BH com alavanca acoplada ao manômetro de pressão e ao reservatório de combustível. Na linha entre a BH e o BIC está instalado o manômetro de pressão. Esse manômetro tem a função de medir a pressão de injeção em cada repetição de ensaio realizada. Esse manômetro é da marca Flamaflex com escala de pressão de 0 a 400 bar (0 a 40 MPa) e menor divisão de escala de 5 bar (0,5 MPa). O SICM é apresentado na Figura 3.7.

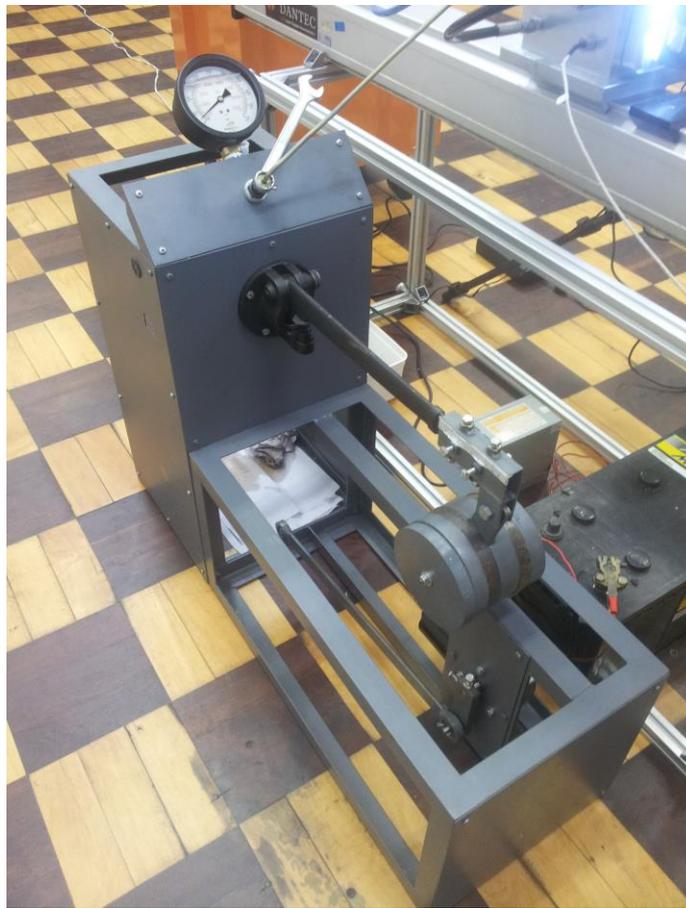


Figura 3.7 – Sistema de injeção de combustível manual

A ligação entre a BH e o CPI é por um tubo de alta pressão de 450 mm de comprimento onde o diâmetro interno por onde passa o combustível possui 1,9 mm e a fixação das extremidades é na BH e no CPI é realizado por duas porcas M14x 1,5. A BH é

alimentada por um reservatório de combustível graduado com escala em 1 ml fabricado em polipropileno e com volume total de 25 ml. O reservatório pode ser visualizado na Figura 3.8.



Figura 3.8 – Reservatório de combustível

### 3.2 Condições de ensaio

O BIC utilizado nesse estudo possui aplicação em motores de um e dois cilindros, modelos M90 e M790 de injeção direta e fabricados pela empresa Agrale S.A.. De acordo com Vaitilingom, 2013, o funcionamento do motor de ICO se baseia na habilidade do combustível atomizar em alguns milissegundos, quando injetado em um meio a pressões na ordem de 19 a 50 bar (1,9 a 5 MPa) e a uma temperatura de 500 a 700°C.

A Figura 3.9 apresenta um estudo gráfico realizado pela empresa Bosch no motor M90 onde foram coletados e mapeados os dados de pressão e tempo de injeção do combustível assim como a pressão de combustão e curso da agulha para a rotação de torque máximo (2300 rpm). A escala do gráfico é tempo (ms) no eixo das abscissas e de tensão (mV) no eixo das ordenadas.

A curva de interesse é a de número 2 que representa a pressão de combustão, nesta linha é possível identificar o crescimento da pressão até o pico de 9 MPa (90 bar). De acordo com Knothe, 2006, a combustão pode ter início em qualquer região da câmara de combustão onde as condições sejam propícias para a queima, porém não ocorre imediatamente após o combustível ser injetado, mas sim depois de um pequeno intervalo de tempo no qual cada gota sofre as transformações que tornam possível o início da ignição. Assim, o valor de pressão de interesse é aquela que ocorre no instante do início da injeção do combustível e que no gráfico é identificada com um círculo vermelho no instante próximo a 3 ms. A pressão registrada nesse instante é de 50 bar (5 MPa) o que caracteriza o início do processo de combustão devido a formação do jato de combustível atomizado no interior cilindro.

De acordo com Arai e Hiroyasu, 1990 apud Baumgarten, 2006, o comportamento geral dos parâmetros macroestruturais para o combustível OD para o regime de *spray* quase estacionário já foram realizados e publicados por muitos autores e descreve a fase principal da injeção, quando a agulha do BIC está totalmente elevada.

A bancada montada dentro do laboratório não permite simular a temperatura oriunda da elevação da pressão dentro da câmara de combustão durante o funcionamento do motor. Com isso, existe a necessidade de definir de forma teórica a pressão e a temperatura de compressão e posteriormente definir a massa específica de ar resultante desse tempo de funcionamento do motor. Para a pressurização da CP será utilizado gás nitrogênio a temperatura ambiente, com isso existe a necessidade de verificar qual pressão é necessária para conseguir reproduzir a mesma condição de massa específica do meio com esse gás. Assim, utilizando a metodologia termodinâmica para o cálculo do ciclo diesel, Equação 3.1 e 3.2, é possível, definir a pressão e a temperatura no final do tempo de compressão.

$$P_c = (P_0 - \Delta P_a) \cdot \varepsilon^{n_1} \quad (3.1)$$

$$T_c = T_a \cdot \varepsilon^{(n_1-1)} \quad (3.2)$$

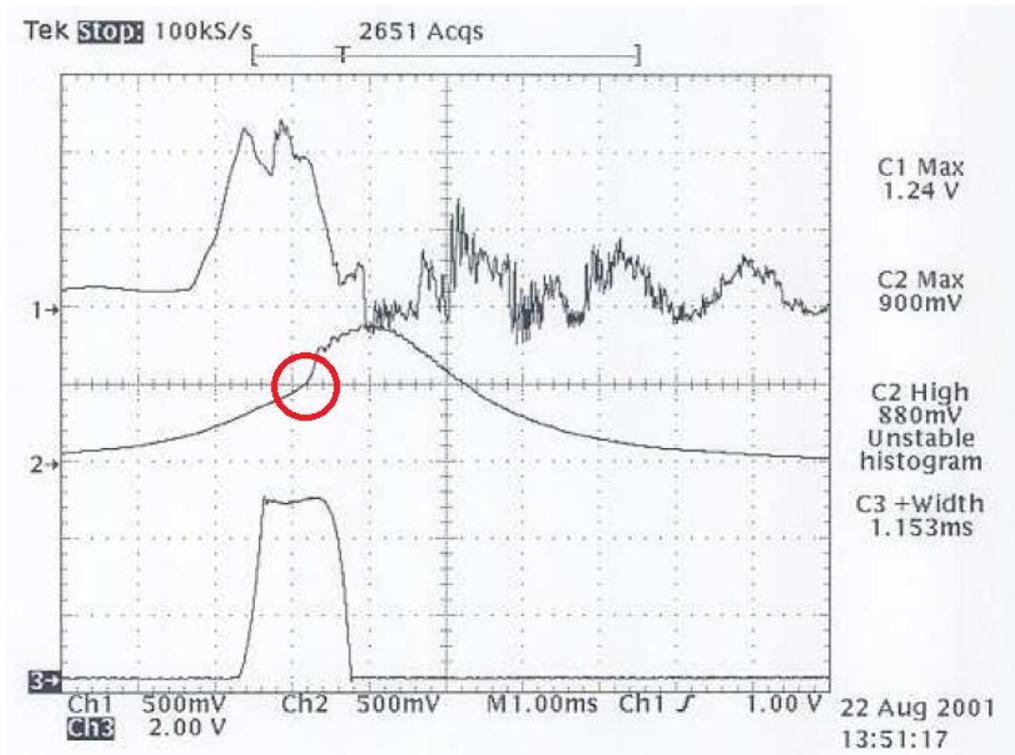


Figura 3.9 – Estudo motor M90 ID – Torque máximo

De acordo com Pérez e Alexeev, 1984, nessas equações, o valor médio do coeficiente politrópico de compressão ( $n_1$ ) para motores de ICO varia entre 1,32 a 1,4. Onde os maiores valores de  $n_1$  são característicos para motores rápidos e para motores de arrefecimento por ar. Isso, pelo fato de que se a compressão fosse adiabática o valor para  $n_1$  seria de 1,41, porém em um processo real de compressão de um MCI, na primeira fase de compressão o fluido operante contido no cilindro ganha energia térmica, ou seja, existe uma transferência de calor das paredes do cilindro para o fluido operante, nesse caso o  $n_1$  é 1,5, já na segunda fase da compressão, a transferência de calor é do fluido operante para as paredes do cilindro, diminuindo o valor de  $n_1$  para 1,33. Assim, para motores rápidos e para motores de arrefecimento por ar, existe uma maior transferência de calor das paredes do cilindro para o fluido operante do que vice e versa.

O motor de um cilindro modelo M90 possui uma  $\epsilon$  de 20:1 e através dessa metodologia, utilizando o  $n_1$  de 1,4 os valores teóricos obtidos para a pressão e temperatura de compressão são respectivamente 5,27 MPa e 777 K. Conforme Sonntag e Van Wylen, 2006, utilizando a Equação 3.3 (equação geral dos gases), para definir a massa específica do

ar nessa condição de pressão e temperatura de funcionamento do motor e substituindo os valores para as constantes  $P_1$ ,  $T_1$  e  $\rho_1$  estão de acordo com Pérez e Alexeev, 1984 para condições normais de temperatura e pressão a nível do mar temos que a massa específica do ar na câmara de combustão no instante de início de injeção ( $\rho_2$ ) é 23,24 kg/m<sup>3</sup>.

$$\frac{P_1}{\rho_1 \cdot T_1} = \frac{P_2}{\rho_2 \cdot T_2} \quad (3.3)$$

em que:

- $P_1$  = Pressão do ar na entrada do motor (0,1 MPa)
- $P_2$  = Pressão na câmara no instante de injeção (5,27 MPa)
- $T_1$  = Temperatura do ar na entrada do motor (298 K)
- $T_2$  = Temperatura na câmara no instante de início de injeção (777 K)
- $\rho_1$  = Massa específica do ar na entrada do motor (1,17 kg/m<sup>3</sup>)
- $\rho_2$  = Massa específica na câmara no instante de início de injeção

Utilizando o gás nitrogênio para preencher a CP, e considerando suas diferentes propriedades em relação ao ar, é necessário determinar a pressão na qual deve ser submetido este gás para que seja possível manter a mesma massa específica do ar na câmara de combustão no instante do início da injeção. Os ensaios serão realizados com a CP na temperatura ambiente ( $T = 298$  K) e de acordo com Sonntag e Van Wylen, 2006, a constante  $R$  para o gás nitrogênio é 296,8 J/kg.K. Substituindo esses dados na Equação 3.4 a pressão obtida para o gás nitrogênio é 2,05 MPa e desta forma, nos ensaios a contrapressão na CP com gás nitrogênio foi ajustada para 2.0 MPa (20 bar).

$$\frac{P_{N_2}}{\rho_{N_2}} = R_{N_2} \cdot T \quad (3.4)$$

Buscando expandir o estudo para mais de uma condição de  $\epsilon$ , foi buscado na literatura os limites máximos e mínimos. Assim, conforme Heywood, 1988 e Giacosa, 2000, os limites para a  $\epsilon$  para os principais projetos de motores ficam entre 14:1 a 24:1, essa variação é decorrente do tamanho do motor e do sistema de admissão empregado. Assim, as condições simuladas foram 24:1, 20:1 e 14:1. Aplicando a mesma metodologia de cálculo, a pressão

para o gás nitrogênio para a  $\epsilon$  de 24:1 é de 2,5 MPa (25 bar) e para 14:1 temos 1,5 MPa (15 bar).

### 3.3 Instrumentação

#### 3.3.1 Sistema de pressurização

O sistema de pressurização (SP) tem a função de proporcionar a bancada simular as diferentes condições de massa específica do gás que se deseja dentro da CP, através da regulagem e transferência. O SP é composto pelo cilindro de gás, válvula reguladora de pressão, mangueira de alta pressão e pela CP. O gás é fornecido por um cilindro de aço de alta pressão do tipo “T” com volume total de 9 m<sup>3</sup> a uma pressão de serviço de 18,14 MPa (181 bar). A vazão do gás para a CP é controlada pelo regulador para operar com gás modelo Climatester de simples estágio com pressão de saída de 0 a 55 bar e vazão máxima de 120 m<sup>3</sup>/h. O regulador pode ser visualizado no ANEXO V. A ligação entre o regulador e a CP é realizada por uma mangueira hidráulica termoplástica de alta pressão de 1 trama de poliéster modelo Balflex, para trabalho com nitrogênio, com diâmetro nominal de 1/4”, 2 m de comprimento e com fator de segurança de 4:1 e pressão máxima de trabalho de 19 MPa (190 bar). Mais especificações da mangueira podem ser visualizadas no ANEXO VI. Para realizar a despressurização da CP, uma válvula de bloqueio com esfera do tipo reta com um atenuador de ruído incorporado é utilizado. O controle da pressão interna é monitorado pelo manômetro de pressão instalado no topo da CP.

Antes de iniciar o procedimento de transferência do gás nitrogênio para a realização dos ensaios, foi realizada a limpeza da CP. A limpeza consiste em retirar o ar contido dentro da CP, permitindo somente que o gás nitrogênio seja pressurizado. Para realizar a limpeza a válvula de bloqueio da CP é totalmente aberta, permitindo que o ar possa sair. Na sequência a válvula do cilindro de gás é toda aberta, para que a linha entre o cilindro e o regulador seja pressurizada. Após a válvula do cilindro é fechada, permitindo que o gás contido na linha entre o cilindro e o regulador seja deslocado para a CP, empurrando o ar contido de dentro da câmara para fora. Após esse procedimento a válvula de bloqueio é rapidamente fechada, e a pressurização da CP pode ser iniciada.

Após esse procedimento, tem início o processo de pressurização, onde após verificar que a válvula do regulador de pressão está fechada, é aberta a válvula do cilindro para que o gás seja transferido para a CP. Com a válvula do cilindro aberta é iniciada a pressurização com a abertura da válvula do regulador. É possível acompanhar a pressão na saída do cilindro através do manômetro do regulador e a pressão interna através do manômetro da CP. Esse procedimento é conduzido até que a pressão desejada seja atingida.

### 3.3.2 Sistema de coleta de imagens

O registro do desenvolvimento dos parâmetros macroestruturais da atomização na CP é realizado com uma câmera de alta velocidade (CAV) modelo Phantom V411, da marca Ametek. A CAV é apresentada na Figura 3.10.



Figura 3.10 – Câmera de alta velocidade com lente acoplada e tripé de fixação

A utilização da CAV se deve ao fato de que é necessário uma alta taxa de aquisição de imagens para um completo mapeamento do desenvolvimento dos parâmetros macroestruturais resultantes da alta velocidade do fenômeno de injeção do combustível. A CAV gerenciada

pelo programa Phantom Camera Control, versão 2.3, também desenvolvido pela Ametek sendo conectada a um computador através de um cabo ethernet, que permite realizar as configurações dos parâmetros de captura de imagem, para isso possui um sensor de captura de imagem CMOS monocromático com resolução de 1280 x 800 pixels, onde foi instalada uma lente AF-S VR Micro-Nikkor de 105mm com ajuste da distância de foco manual que permite uma abertura de 23,3° que auxilia em uma menor deformação das imagens capturadas.

Para o posicionamento e alinhamento da CAV junto a CP foi utilizado um tripé com uma base (cabeça) de 2 movimentos com trava manual que possibilita regulagem de altura e de nível de acordo com o ângulo de abertura da base que possui três níveis regulados manualmente. Para fornecer a iluminação necessária dentro da CP, uma luminária LED de 100 W modelo MicroBeam 128 é instalada em uma das janelas laterais (janela 1) com o auxílio de um suporte é possível posicionar e fixar a luminária junto a base da bancada. A luminária é alimentada por uma fonte de 12V e permite o ajuste manual da luminosidade através de um botão posicionado na parte traseira. A luminária pode ser visualizada na Figura 3.11.



Figura 3.11 – Luminária LED

### 3.3.3 Sistema de coleta de temperaturas

Para acompanhamento das temperaturas da câmara pressurizada e do ambiente foram utilizados termoresistências do tipo PT100. Essas termoresistências podem ser visualizadas na

Figura 3.12. A imagem (a) apresenta a termoresistência da temperatura ambiente que possui pote e haste em isolamento mineral de inox 304 com 3 mm de diâmetro e 60 mm de comprimento com cabo de 1,5 m.



(a) Ambiente



(b) Câmara pressurizada

Figura 3.12 – Termoresistências



Figura 3.13 – Sistema de aquisição de dados LXI

A imagem (b) apresenta a termoresistência para a temperatura da câmara pressurizada, que possui bucin e rosca 1/4 BSP com haste de isolamento mineral em inox 304 com 3 mm de diâmetro e 60 mm de comprimento com cabo de 1,5 m.



Figura 3.14 – Localização da instalação da termoresistência

O valor da temperatura é coletado pelo sistema de aquisição de dados LXI da marca Agilent modelo 34972A, apresentado na Figura 3.13. Com o programa Bench Link Data Logger 3, versão 4.3, os canais foram selecionados e configurados para fornecer um valor de temperatura a cada 2 segundos durante todo o período de ensaio. A Figura 3.14 identifica o local de instalação da termoresistência dentro da câmara pressurizada.

#### 3.3.4 Sistema de coleta de volume de líquido

A medição do volume de combustível injetado em cada repetição do ensaio foi realizada manualmente. Para uma maior precisão foi utilizado uma pipeta de vidro graduada com escala de 1 ml e volume total de 10 ml. A pipeta pode ser visualizada na Figura 3.15.



Figura 3.15 – Pipeta graduada

### 3.4 Procedimento experimental

Para um melhor entendimento dos ensaios a serem realizados, o procedimento experimental adotado foi resumidos na Tabela 3.2, onde pode ser identificado o número de repetições realizadas com cada combustível na condição de pressão desejada. Para definir com maior precisão os parâmetros macroestruturais, o estudo foi dividido em duas partes, a primeira parte ira definir a distância de quebra e consiste na análise do acompanhamento da formação do jato do combustível desde o orifício de saída do BIC, até a distância onde se pode visualizar a quebra do jato, já a segunda parte consiste no acompanhamento da penetração da ponta e ângulo do *spray* desde o orifício de saída do bico injetor, através da janela de visualização.

Tabela 3.2 – Procedimento experimental

Ensaio	Combustível	Pressão	Nº de repetições
Distância de quebra	OD	2,5 MPa	3
	OVS		3
Penetração, velocidade e ângulo do <i>spray</i>	OD	2,5 MPa	3
	OVS		3
Penetração, velocidade e ângulo do <i>spray</i>	OD	2 MPa	3
	OVS		3
Penetração, velocidade e ângulo do <i>spray</i>	OD	1,5 MPa	3
	OVS		3

O combustível OD é originalmente empregado nos motores de ICO, com isso o foco da investigação será comparar os parâmetros macroestruturais do OVS com os do OD para três diferentes condições de massa específica do gás dentro da CP, a fim de verificar semelhanças ou divergências. Na

Tabela 3.3 são apresentadas as propriedades dos combustíveis utilizados nos ensaios.

Tabela 3.3 – Propriedades dos combustíveis

Propriedade	Unidade	OD	OVS
$\rho_l$	kg/m <sup>3</sup>	839,5	919,3
$\nu$ (40°C)	mm <sup>2</sup> /s	2,814	30,354
$\sigma_i$ (20°C)	mN/m	28,24	32,72

Para estudar os efeitos das diferentes condições de massa específica do meio sobre os parâmetros de atomização foi escolhido um gás inerte, assim a CP foi preenchida com gás nitrogênio. As propriedades desse gás podem ser visualizadas na

Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Propriedades do gás nitrogênio

Propriedade	Unidade	Nitrogênio
$\rho_g$	kg/m <sup>3</sup>	1,16
Grau	-	4.6
Pureza Mínima	-	99,996%
Peso molecular	-	28,01

#### 3.4.1 Procedimento de ensaio

Para iniciar os ensaios é necessário concluir a montagem da CP com a fixação da base inferior, porém antes, é necessária a instalação de uma cartolina no interior da CP na cor preta, formando um fundo escuro na janela de visualização com o objetivo de realçar as imagens da formação do *spray* a serem registradas. Também é necessário realizar a limpeza das janelas de visualização em ambas as faces, com objetivo de minimizar a oleosidade e

permitir uma melhor transparência com uma solução líquida para lentes fabricadas em polimetil-metacrilato (PMMA).

Após esse procedimento é instalado na CP o CPI, o tubo de alta pressão a mangueira de gás e a termoresistência, possibilitando assim a realização do alinhamento e nivelamento de toda a bancada juntamente com a CAV que é posicionada na janela de visualização correspondente, também é posicionada na janela 2 a luminária LED e ajustada para a máxima potência (100 W).

O próximo passo é realizar a alimentação do combustível manualmente no SICM, com o auxílio da pipeta de vidro graduada é possível encher o reservatório até atingir o seu volume máximo. Antes de iniciar a pressurização, o sistema de aquisição de temperaturas iniciar a coleta dos dados, auxiliando no acompanhamento instantâneo da variação da temperatura interna durante o processo de pressurização e também na verificação da temperatura de estabilização antes da realização dos ensaios.

A sequência de repetições para cada uma das condições de pressão para um combustível é realizada com uma única pressurização. Dessa maneira a CP é pressurizada até a condição de 2,5 MPa (25 bar) e após a realização das três repetições, a pressão é reduzida para a condição de 2 MPa (20 bar) e posteriormente para a última condição de 1,5 MPa (15 bar). A redução da pressão interna é possível com a abertura da válvula de alívio, o comportamento da temperatura dentro da CP durante a realização dos ensaios pode ser visualizada na Figura B. 1 no APÊNDICE B.

A alavanca do SICM é erguida de forma manual até o fim de curso a altura de 160 mm e liberada para que o acionamento seja realizado pela queda da massa de 10 kg. Esse movimento de levantar a alavanca permite o enchimento da BH com combustível do reservatório e que será deslocado até o BIC e injetado a uma pressão de 18 MPa (180 bar).

Durante o ensaio, foram registrados os dados da pressão de injeção do combustível fornecido pelo manômetro de pressão instalado na BICM, a pressão do meio no interior da CP pelo manômetro de pressão instalado no topo da CP, as temperaturas do ambiente e do meio foram medidas e registradas pelo sistema de coleta de temperaturas e o volume de líquido injetado foi medido, utilizando uma pipeta graduada.

Após todo o levantamento de ensaios com um dos combustíveis, a CP é totalmente despressurizada e inicia-se o processo de desmontagem e limpeza para a repetição de todo o procedimento descrito com outro combustível.

### 3.4.2 Distância de quebra

De acordo com Reitz, 1978, a divergência do ângulo do *spray* tem um crescimento até a condição de massa específica de  $26 \text{ kg/m}^3$ , ou seja, um posterior aumento da massa específica não possui efeito sobre o ângulo do *spray*. Assim, para o estudo da distância de quebra a condição de maior pressão estudada foi escolhida (2,5 MPa), pois representa uma massa específica de  $27 \text{ kg/m}^3$ . O comportamento da distância de quebra pode ser visualizado em detalhes na Figura 2.1, onde  $L$  representa o comprimento de jato contínuo de combustível e que não apresenta interação com o gás do meio próximo o orifício de saída do BIC.



Figura 3.16 – Distância de quebra (Adaptado de Reitz, 1978)

Para esse estudo no programa Phantom Camera Control, versão 2.3 a resolução do sensor de imagem da câmara é ajustado para  $128 \times 400$  pixels, que permite uma taxa de aquisição de 40.000 imagens por segundo (tempo entre imagem de 0,025 ms), permitem o acompanhamento do desenvolvimento da distância de quebra. Para cada repetição do ensaio, um arquivo contendo a sequência total de imagens registradas é salvo na memória do computador.

### 3.4.3 Penetração e ângulo do *spray*

Para o estudo da penetração e ângulo, um mapeamento da coleta de dados imagem por imagem do desenvolvimento da formação do *spray* foi realizado, utilizado o programa Phantom Camera Control, versão 2.3. Na Figura 3.17 é apresentada uma montagem com a sequência de imagens de um ensaio realizado com OD para ilustrar o método de coleta de dados durante o desenvolvimento do *spray*.

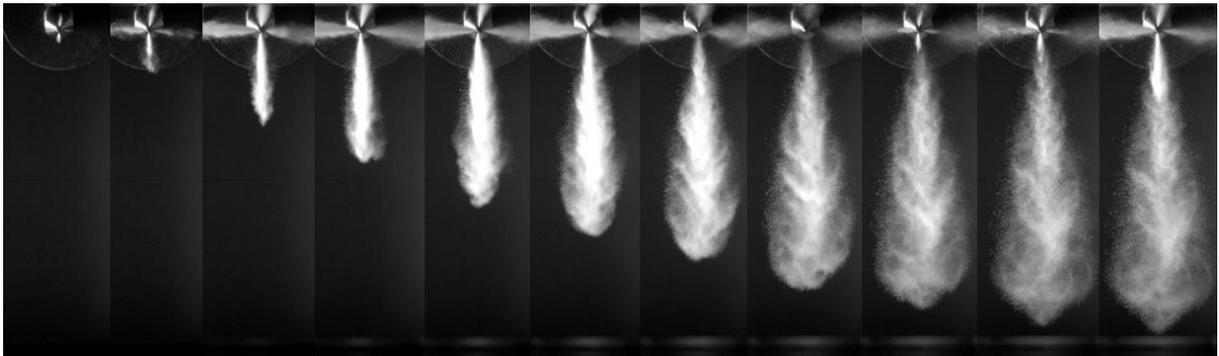


Figura 3.17 – Desenvolvimento da ponta e ângulo do *spray*

A coleta dos parâmetros instantaneamente com um clique sobre cada a imagem na região de interesse gera automaticamente uma tabela dentro do programa com todos os dados capturados. Para o estudo da penetração e ângulo do *spray*, a imagem da câmara é ajustada para  $400 \times 800$  pixels, a quantidade de 8.000 imagens por segundo e a função *auto trigger* é selecionada, dando início ao procedimento de gravação na câmara.

Já para o levantamento dos dados da penetração e ângulo do *spray* é feita de modo indireto, a partir da medição temporal do deslocamento dos pontos extremos do jato, nas imagens capturadas. Para tanto, é utilizada a função "*play*" do programa na realização do estudo. Essa função permite abrir o arquivo de imagens salvo nos ensaios e, mediante uma calibração, é possível mensurar os parâmetros desejados.

A calibração da imagem é ajustada para a seguinte relação: 400 pixels é igual a 0,05 m (0,000125 m/pix). Essa relação, juntamente com a taxa de aquisição de imagens de 8.000 imagens por segundo (tempo entre imagem de 0,25 ms). Após a calibração da imagem e definição do ponto de origem, o avanço das imagens ocorre automaticamente a cada clique realizado sobre o ponto desejado na imagem. Dessa maneira, é possível mapear o avanço da ponta do *spray* e o ângulo formado.

Para o valor do ângulo, um ponto de referência é fornecido no centro do furo de saída do injetor e, com a função “*distance & angle & speed: origin + 1 point*”, é possível coletar o ângulo formado pela distância entre dois pontos imagem por imagem com relação a origem escolhida. O ângulo coletado é referente a meio cone, sendo que para o valor do ângulo completo o valor coletado é multiplicado por dois, já a velocidade é calculada instantaneamente a cada clique sobre a imagem e os valores coletados foram salvos em arquivo no formato “.txt” e importados para uma planilha eletrônica.

Para cada uma das três repetições de ensaio que foram conduzidas nas diferentes condições de pressão e com ambos os combustíveis, foram realizadas mais três repetições de coletas de pontos sobre as imagens, com o objetivo de gerar uma média de três coletas para cada ensaio. Esses dados reunidos forneceram uma média de nove planilhas de coleta de pontos para cada condição de pressão ensaiada. Os valores médios calculados e tabelados para cada condição de pressão para o OD podem ser visualizados nas Tabela C. 1, Tabela C. 2 e Tabela C. 3 contidas no APÊNDICE C. Para o OVS, os valores médios podem ser consultados na Tabela D. 1, Tabela D. 2 e Tabela D. 3 do APÊNDICE D.

### **3.5 Ajustes iniciais**

Antes da realização dos ensaios experimentais existe a necessidade de realizar alguns ajustes e calibrações no sistema de coleta de imagens e temperaturas.

#### **3.5.1 Calibração das termoresistências**

Antes de instalar a termoresistência da CP, um procedimento de calibração foi realizado. O procedimento de calibração consiste em dispor as duas termoresistências que serão utilizadas em uma condição padrão, para conferência dos valores de temperaturas fornecidos. Para isso as termoresistências foram inseridas em um recipiente com água e o valor da temperatura fornecida foi comparada para verificar possíveis divergências. Mais informações podem ser visualizadas no APÊNDICE A.

### 3.5.2 Ajuste da captura de imagem

Para o estudo dos parâmetros de atomização, duas configurações de ajuste de posição da CAV são utilizadas. Para o estudo da distância de quebra foi utilizada toda a largura (50 mm) da janela e a CAV é posicionada a distância de 35 cm da janela de visualização. Com essa distância, a resolução é ajustada para  $1280 \times 400$  pixels, que representa metade da área da janela de visualização  $50 \times 50$  mm. Como a área de visualização é menor para uma mesma resolução é possível reduzir a resolução para  $128 \times 400$  pixels, para que seja registrada somente a região próxima ao furo de injeção. Para esse ajuste de resolução do sensor da CAV é possível programar a câmera para uma taxa de aquisição de 40.000 imagens por segundo (25  $\mu$ s entre imagens).

Já para o estudo da penetração, velocidade e ângulo do *spray*, durante todo o tempo de injeção é utilizada toda a altura (100 mm) da janela de visualização. Assim, a CAV é posicionada a uma distância de 80 cm da janela de visualização (janela 3). Essa distância permite que a área de resolução da CAV seja ajustada para  $400 \times 800$  pixels, que representa a área total da janela de visualização de  $50 \times 100$  mm. Para esse ajuste de resolução do sensor da CAV é possível programar a CAV para uma taxa de aquisição de 8.000 imagens por segundo (250  $\mu$ s entre imagens).

O princípio de captura das imagens na CAV ocorre de forma contínua em uma memória interna de 16 GB. Assim, para registrar a formação do *spray*, a função Image-based Auto-Trigger é selecionada no programa PCC. Essa função tem como objetivo registrar na memória da CAV somente a quantidade definida de imagens, antes ou depois do ponto de trigger especificado, e o trigger é acionado somente quando uma alteração no movimento da imagem acontece. Essa função auxilia a fixar o ponto de início da gravação logo no início da formação do *spray*.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo será feita a apresentação e análise dos resultados do levantamento dos ensaios e medições dos dados obtidos sobre as imagens capturadas nos ensaios propostos para estudo da distância de quebra do jato e da penetração, velocidade e ângulo do *spray* com os combustíveis OD e OVS. Os resultados serão apresentados de forma comparativa, com o intuito de verificar o comportamento do OVS em relação ao OD para as mesmas condições de ensaio.

Para o estudo da distância de quebra será apresentado um levantamento fotográfico comparativo com o desenvolvimento da formação do jato próximo ao orifício de saída do injetor a cada 0,2 ms com o objetivo de verificar o comportamento inicial do jato e verificar em qual tempo ocorre a estabilização da distância de quebra.

Já para o estudo da penetração, velocidade e ângulo do *spray* serão apresentados gráficos comparativos do comportamento entre os combustíveis nas diferentes condições de pressão no interior da câmara pressurizada. Os resultados são obtidos desde a formação do jato próximo ao orifício de saída do injetor até a distância máxima de 80 mm. Já para os resultados do estudo do ângulo do *spray* os gráficos mostram um estudo comparativo a partir do instante de tempo em que ocorre a estabilização da distância de quebra que para o OVS ocorre a partir do tempo de 3 ms e para o OD a partir de 2 ms.

### 4.1 Distância de quebra

Para o estudo da distância de quebra do jato foram selecionadas doze imagens da formação inicial do jato para OVS e OD para comparativo nos mesmos instantes de tempo. O furo de saída do orifício do BID esta localizado na parte superior da imagem com o escoamento do jato direcionado verticalmente para baixo. Na Figura 4.1, Figura 4.2 e Figura 4.3, o avanço do jato no tempo aumenta da esquerda para a direita nos intervalos de tempo indicado abaixo das imagens também é possível visualizar o comportamento do início do escoamento até a distância de 9 mm no meio pressurizado com 2,5 MPa (25 bar). Em cada estudo dez figuras igualmente espaçadas (0,2 ms) no tempo ilustram o comportamento dos líquidos injetados. As duas imagens finais ilustram a estabilização da formação do jato nos

tempos de 3 e 4 ms e permitem uma comparação com o desenvolvimento do jato apresentado nas figuras anteriores.

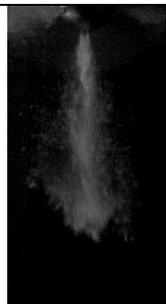
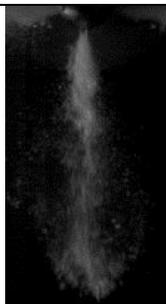
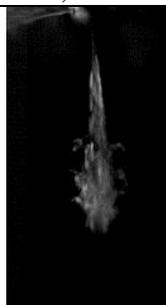
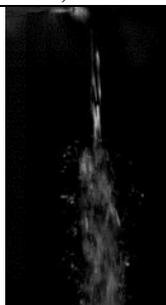
OD					1	mm
					2	
					3	
					4	
					5	
					6	
					7	
					8	
					9	
Tempo	0,2 ms	0,4 ms	0,6 ms	0,8 ms		
OVS					1	mm
					2	
					3	
					4	
					5	
					6	
					7	
					8	
					9	
Tempo	0,2 ms	0,4 ms	0,6 ms	0,8 ms		

Figura 4.1 – Estudo fotográfico do jato de OD e OVS de 0,2 a 0,8 ms

No instante de 0,2 ms para o OD é possível identificar uma maior interação em forma de vórtice na ponta do jato com o meio gasoso. Também é possível identificar que a região do escoamento na vizinhança da cabeça do jato líquido contém muitas partículas finas atomizadas aparentemente se movendo com o jato a partir do tempo de 0,4 ms. O desenvolvimento do jato é simétrico em relação ao eixo vertical conforme ocorre o avanço axial do jato.

Realizando uma análise comparativa do OVS com o OD no instante de 0,2 ms, o jato ainda está na forma líquida e na ponta já é possível identificar uma deformação do líquido devido a massa específica do gás na CP. A partir do tempo de 0,4 ms, é possível identificar uma maior interação em forma de vórtice, não contendo partículas finas atomizadas na interface líquido/gás. Esse comportamento se mantém até o tempo de 1 ms. Nesse período de tempo, referente à primeira parte da análise, a distância de quebra apresenta um comportamento instável. Analisando o jato do instante de 0,2 a 1 ms é possível verificar a

formação de uma divergência do jato. Já para a condição de jato totalmente desenvolvido é observado no instante de 3 ms.

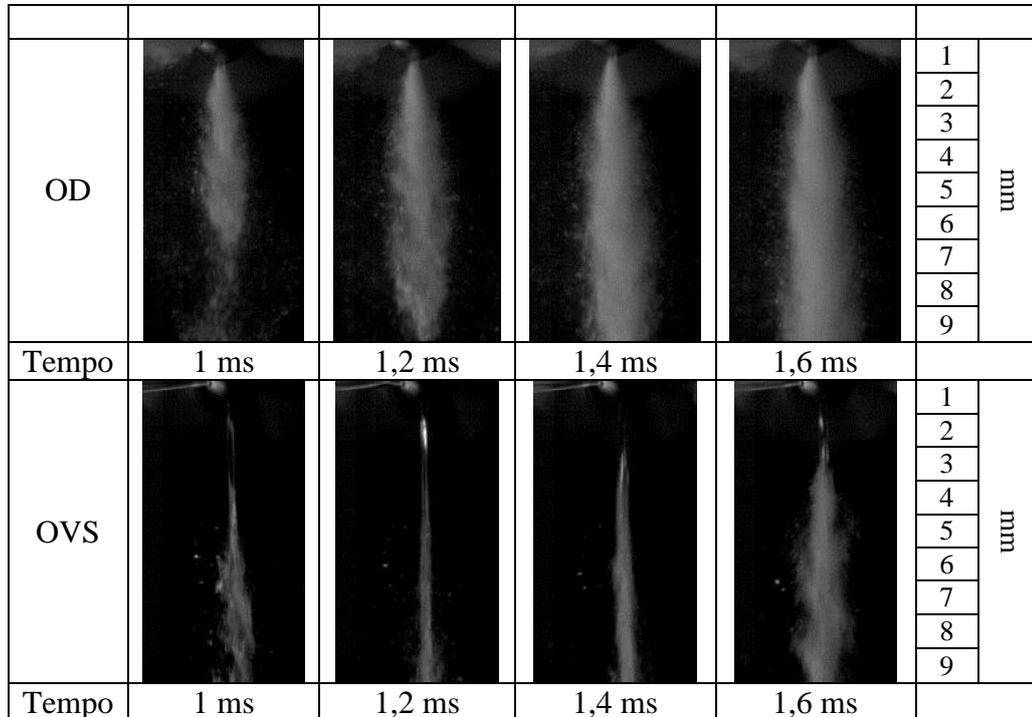


Figura 4.2 – Estudo fotográfico do jato de OD e OVS de 1 a 1,6 ms

No instante referente ao tempo de 1,2 ms ocorre a redução dos vórtices na interface líquido/gás e tem início o surgimento de partículas atomizadas. A distância de quebra tende a se estabilizar. Esse fenômeno caracteriza que o escoamento está no segundo regime de indução pelo vento.

Uma análise sobre o tempo de 2 ms revela que a partir desse instante de tempo decorrido do início da injeção não existe mais evidências de uma região não divergente logo abaixo do plano de saída do orifício do injetor, ou seja, a partir desse instante de tempo o escoamento se encontra na região de atomização, pois o jato se desintegra imediatamente na vizinhança da saída do injetor.

Essa constatação caracteriza que o escoamento está no segundo regime de indução pelo vento, não conseguindo entrar no regime de atomização.

Uma análise sobre a imagem no instante de tempo de 3 ms revela que existe uma distância de quebra estabilizada em 1,5 mm a jusante do orifício do injetor, ou seja, em

nenhum instante de tempo o escoamento se encontra na região de atomização, pois o jato se desintegra somente a uma distância específica do orifício do injetor.

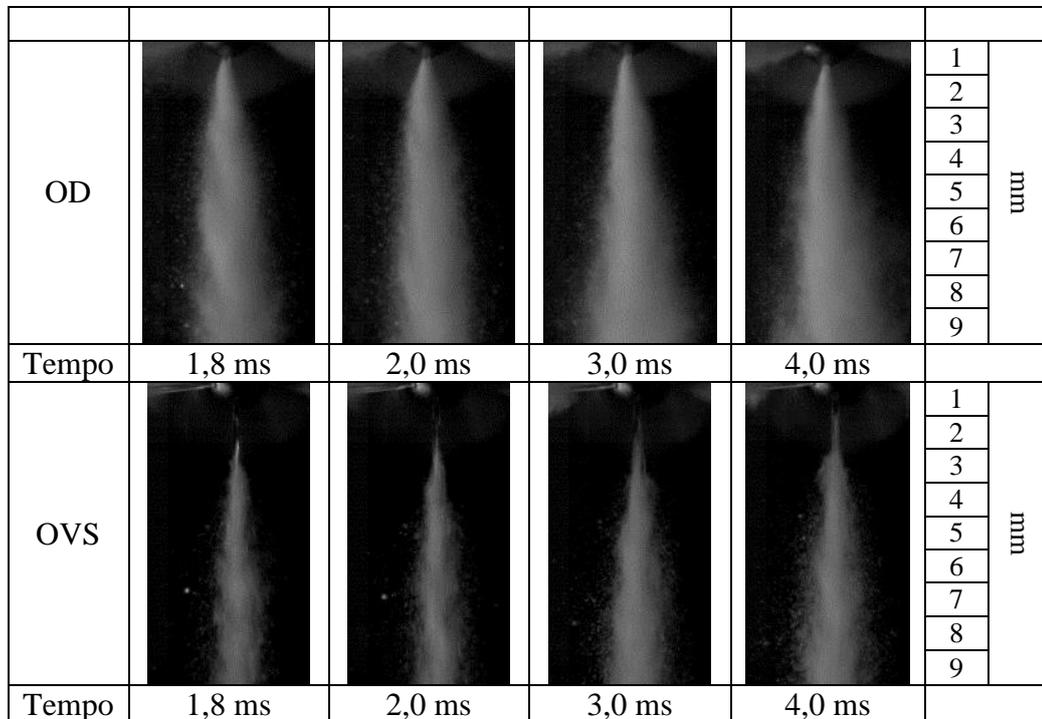


Figura 4.3 – Estudo fotográfico do jato de OD e OVS de 1,8 a 4 ms

#### 4.2 Penetração da ponta do *spray*

Durante a realização dos ensaios foi possível perceber que o avanço da penetração da ponta do *spray* se desenvolveu mais rapidamente com a redução da massa específica do gás no interior da CP e esse comportamento também foi percebido nos ensaios com OVS em comparação ao OD. Na Figura 4.4 é apresentado um gráfico comparativo dos dados coletados do avanço da penetração da ponta do *spray* durante todo o tempo de injeção, o avanço foi medido em mm, já o tempo de injeção foi capturado em ms. Neste gráfico são comparados os dados obtidos para OD e para OVS nas três condições de massa específica do gás ensaiadas na CP. É possível verificar que o desenvolvimento do *spray* ocorre de forma mais lenta com o aumento da pressão do gás. Esse comportamento ocorre tanto para o OD como para o OVS. O valor máximo da penetração é de 80 mm (limite de visualização da janela 3). O avanço mais lento da penetração da ponta do *spray* é observado para OD na condição de pressão de 2,5 MPa (25 bar), já o avanço mais rápido é do OVS para a condição de pressão de 1,5 MPa (15

bar). Próximo ao tempo de 1,5 ms é percebido uma variação que destoa do perfil da curva do avanço da penetração. Essa deformação se repete para todos os ensaios realizados, tanto para OD como para OVS. Uma explicação para esse fenômeno pode estar relacionada ao sistema de acionamento SIC e também ao mecanismo de abertura do início de injeção do BID utilizado, que por ser de funcionamento mecânico controlado por uma mola calibrada para a pressão de abertura de 18 MPa (180 bar).

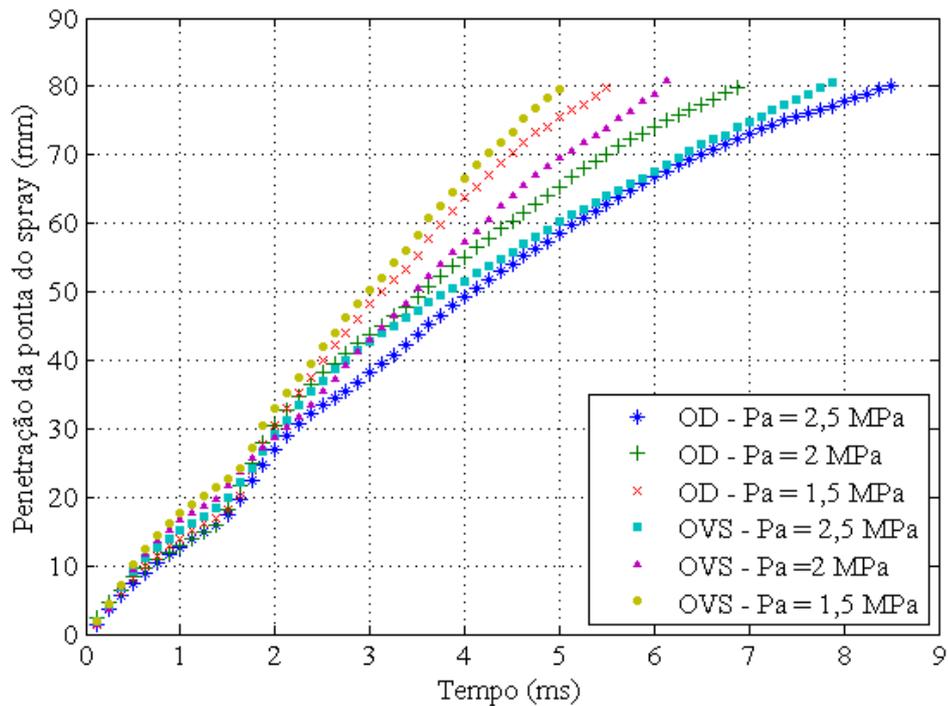


Figura 4.4 – Valores da penetração da ponta do *spray* de OD e OVS.

Avaliando o comportamento dos avanços da penetração da ponta do *spray* coletados nos ensaios entre OVS e OD para a mesma condição de pressão de ensaio, os valores mantiveram o mesmo comportamento com relação ao perfil da curva e sempre com tempo menor para o OVS, no entanto é interessante verificar a condição para a pressão de 2 MPa. Na Figura 4.5 é apresentado o gráficos comparando exclusivamente a penetração da ponta do *spray* para OD e OVS individualmente para a condição de pressão de 2 MPa. Para essa pressão, verifica-se que o comportamento das penetrações se comportam de forma muito similares até o tempo de 4 ms e no período entre 1,5 e 3 ms ocorreu uma inversão no comportamento do avanço, o OD avançou mais do que o OVS. Esse comportamento

caracteriza que para essa condição de massa específica do gás dentro da câmara pressurizada, o comportamento para o avanço da ponta do *spray* foi muito similar entre o OD e OVS.

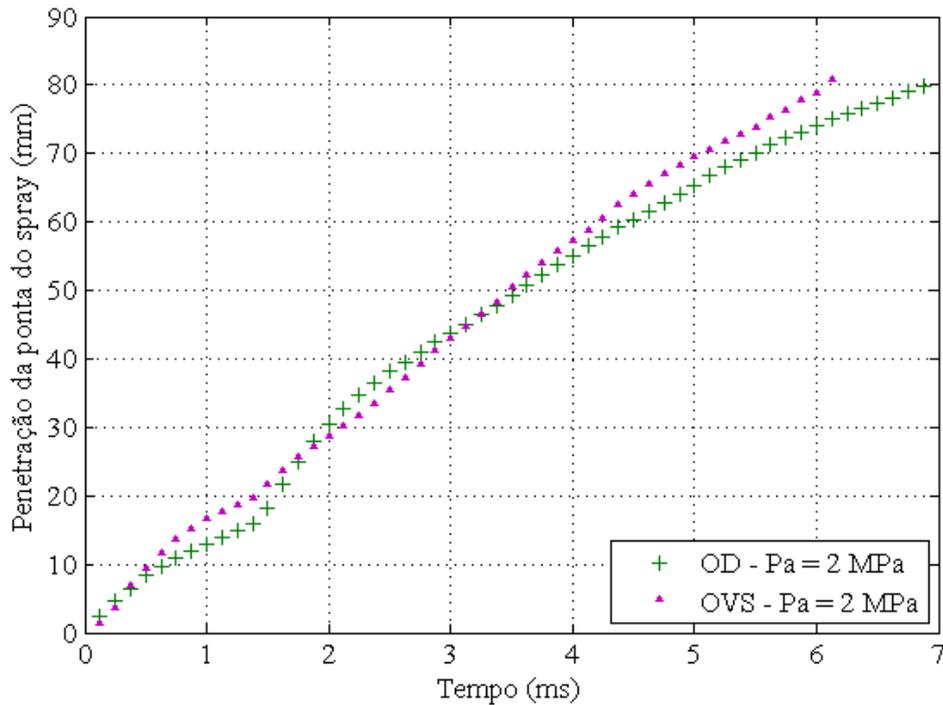


Figura 4.5 – Penetração da ponta do *spray* de OD e OVS – 2 MPa.

### 4.3 Velocidade da ponta do *spray*

Com a possibilidade de captura do avanço da ponta do *spray* sobre as imagens capturadas a uma taxa de aquisição de 250  $\mu$ s foi possível obter a velocidade de avanço da ponta do *spray*. A velocidade é informada em m/s para o tempo de avanço do *spray* em ms. Na Figura 4.6 é apresentado um gráfico comparativo dos valores obtidos na coleta de dados da velocidade da ponta do *spray*. Neste gráfico são comparados os resultados obtidos para OD e OVS nas três condições de massa específica do gás dentro da CP. É possível verificar que o comportamento que a velocidade da ponta do *spray* diminui com o aumento da pressão no interior da CP, tanto para o OVS com para o OD. A maior velocidade é observada para o OVS na condição de 1,5 MPa, chegando próximo a 19 m/s. No tempo entre 0 e 2 ms ocorre um pico de velocidade, seguido de uma queda. Como os valores para a velocidade são uma consequência da aquisição dos dados do avanço da penetração no instante de tempo para a uma taxa de aquisição de imagens de 250  $\mu$ s, uma explicação para esse fenômeno continua

sendo relacionada ao sistema de acionamento SIC e também ao mecanismo de abertura do início de injeção do BID utilizado. Os tempos mais curtos nos ensaios com OVS ocorrem devido ao tempo menor necessário para a ponta do *spray* atingir a distância de penetração de 80 mm.

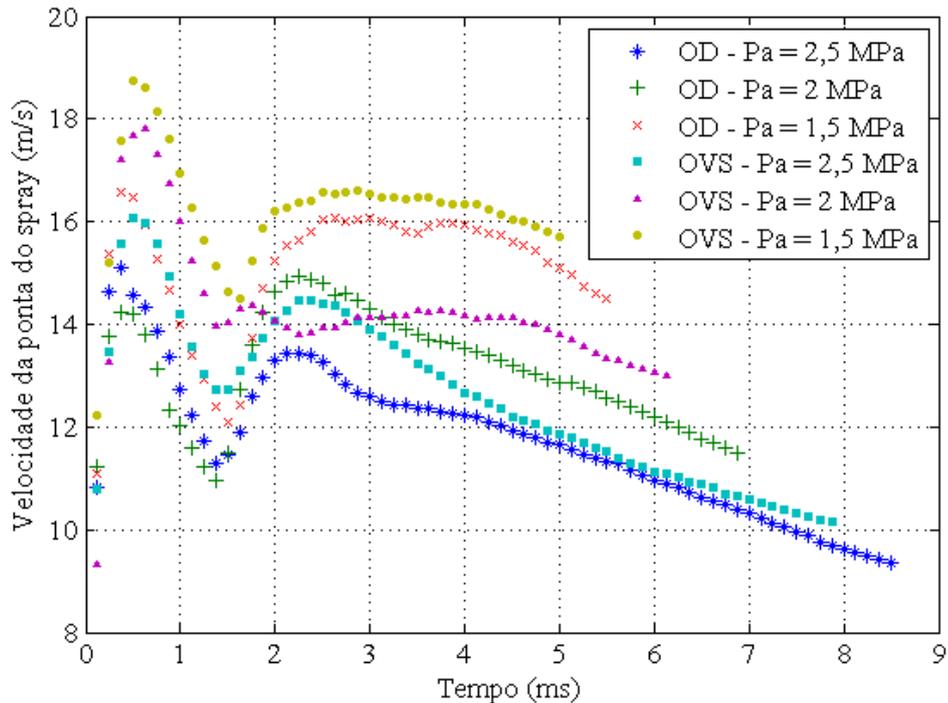


Figura 4.6 – Valores da velocidade de avanço da ponta do *spray* de OD e OVS.

Na Figura 4.7 e Figura 4.7 apresenta os valores da velocidade da ponta do *spray* para OVS nas três condições de pressão e para OD e OVS na condição de 2 MPa respectivamente. É possível verificar que para o comparativo do OVS nas três condições de pressão ensaiadas, o comportamento da velocidade apresentou dois picos antes da estabilização, o primeiro pico foi de 17,8 m/s, seguido de um de 14,6 m/s entre os instante de tempo de 2 a 3 ms e estabilizando a velocidade próximo a 14 m/s ficando com velocidades menores no instante de tempo de 2 a 3 ms que o OVS na pressão de 2,5 MPa. Já para o comparativo do OVS com o OD para a condição de 2 MPa, além dessa variação já descrita para o OVS a velocidade para o OD apresenta seu valor máximo no segundo pico, no valor de 14,9 m/s, visto que no primeiro a velocidade chegou a 13,8 m/s. Esses resultados reforçam a condição de que para a

condição de 2 MPa além de ocorrerem a maior similaridades entre o comportamento dos combustíveis, também se percebe as maiores instabilidades nos ensaios.

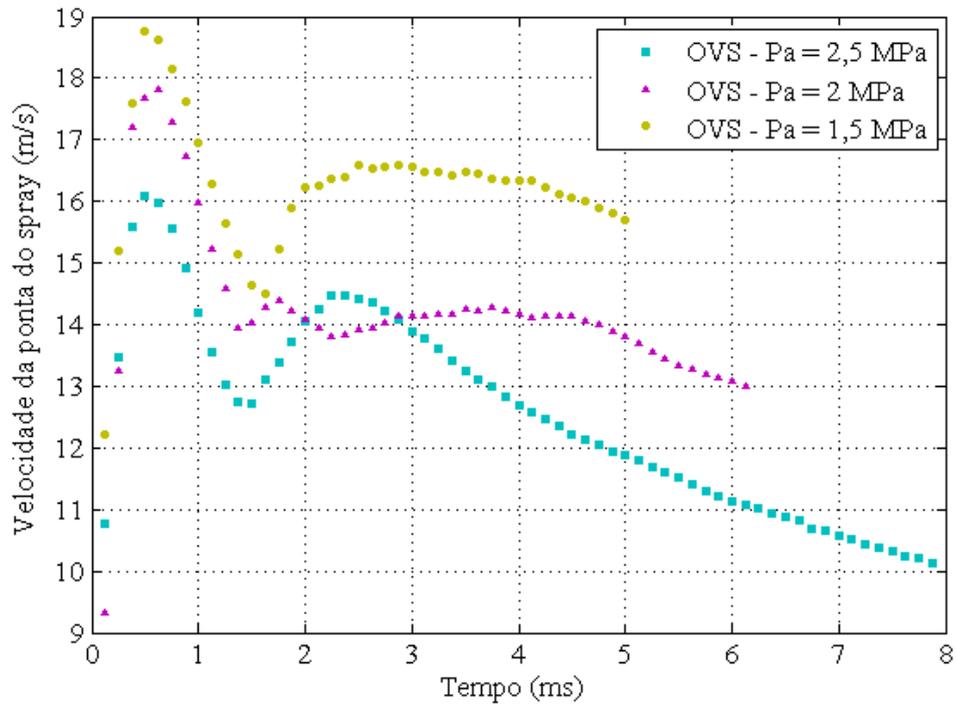


Figura 4.7 – Velocidade de avanço da ponta do *spray* OVS.

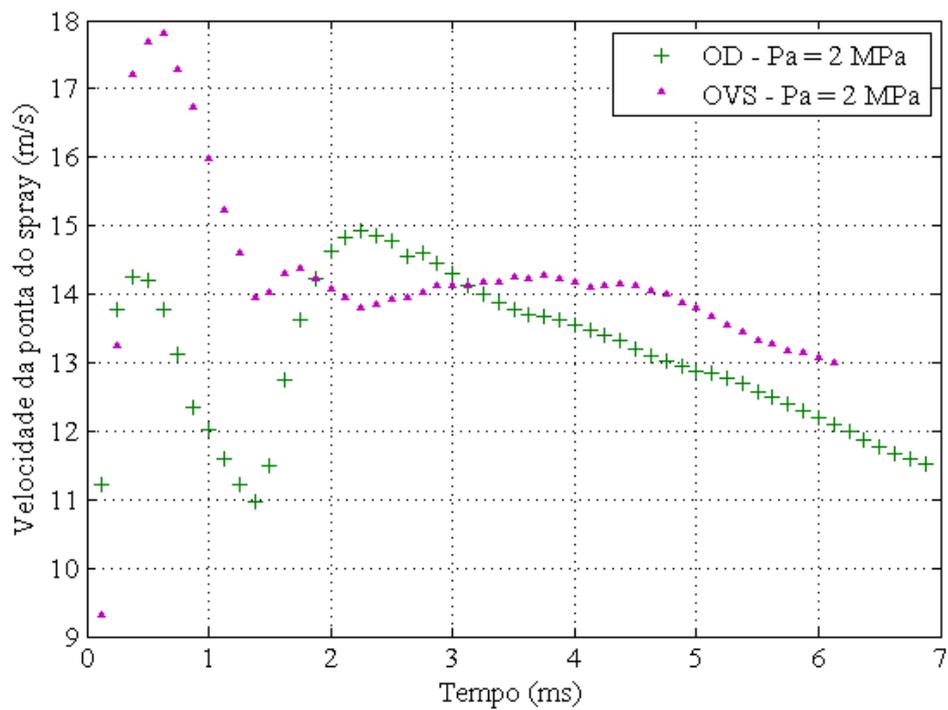


Figura 4.8 – Velocidade de avanço da ponta do *spray* 2 MPa.

#### 4.4 Ângulo do *spray*

Como discutido na seção 4.1, a distância de quebra ocorre tanto para o OD quanto o OVS, e estabiliza para após o tempo de 2 ms para OD e 3 ms para OVS. Isso foi observado no instante das coletas dos dados, pois devido a essa instabilidade não existe dispersão do combustível. Na Figura 4.9 é apresentado o gráfico comparativo dos valores obtidos na coleta de dados do ângulo do *spray* de OD e OVS para as três condições de pressão ensaiadas. É possível verificar que os maiores ângulos foram obtidos para o OD, sendo que para a condição de pressão de 2,5 MPa e 1,5 MPa apresentaram comportamento similar, já para a condição de 2 MPa os valores obtidos ficaram um pouco abaixo, mas ainda próximos da 25°. Para o OVS o ângulo medido foi menor, caracterizando uma menor interação entre o combustível com o gás, isso caracteriza uma atomização deficiente quando comparada com o OD. Para o OVS os valores maiores para o ângulo foram obtidos para a condição de pressão de 2,5 MPa, com pouca diferença quando comparado a condição de pressão de 2 MPa, visto que até o tempo de aproximadamente 5 ms maiores valores para os ângulos foram obtidos com a pressão de 2 MPa. Os resultados para a condição de pressão de 1,5 MPa se manteve abaixo das demais em todo o tempo do ensaio.

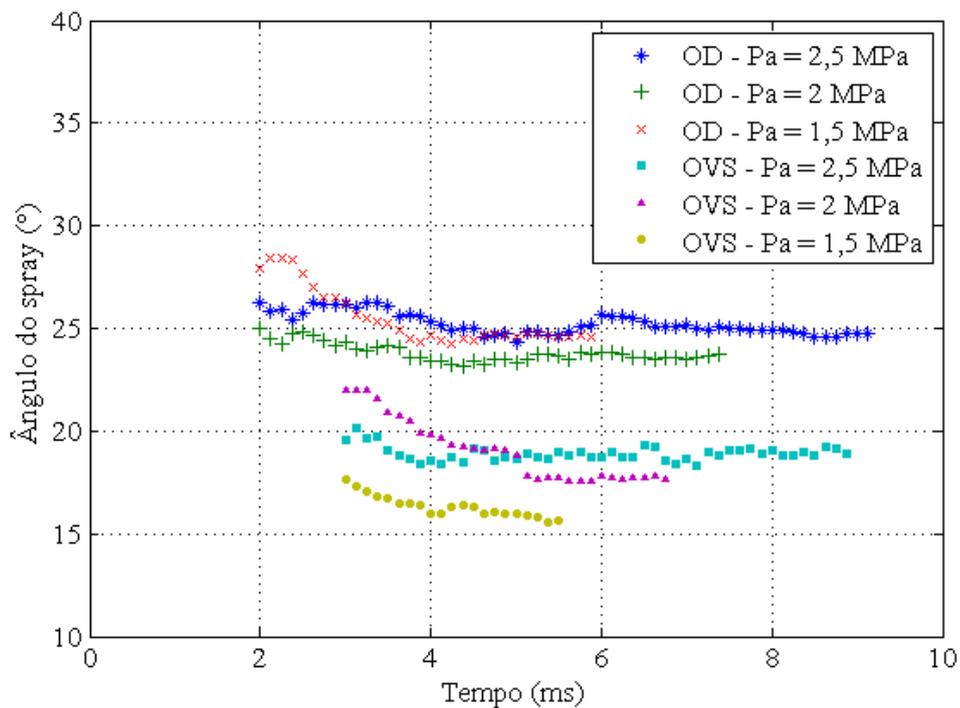


Figura 4.9 – Valores do ângulo do *spray* de OD e OVS.

## 5 CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos nesse trabalho é possível verificar que os parâmetros de atomização são influenciados com a alteração das propriedades do combustível e da massa específica do gás. Como o injetor foi mantido o mesmo, pode-se afirmar que os resultados obtidos são exclusivamente consequência das diferentes propriedades dos combustíveis ensaiados e da massa específica do gás.

Influência das propriedades dos combustíveis ensaiados: das propriedades físicas dos combustíveis a que mais se destaca é a viscosidade que é quinze vezes maior para o OVS em relação ao OD. Isso afeta o padrão do *spray*, dificultando a interação líquido/gás e isso pode ser constatado nos gráficos da penetração e ângulo do *spray*, onde os valores encontrados para o OVS foram menores em relação ao OD, resultando em menores ângulos e maiores velocidades de propagação no meio. Os resultados revelaram uma leve diminuição no ângulo de divergência do jato com o líquido mais viscoso. Já com relação à penetração, verifica-se um avanço mais rápido para o líquido mais viscoso, que percorre a câmara pressurizada em menos tempo. Consequentemente, as velocidades desenvolvidas pelo *spray* foram maiores. Também é possível constatar que para o líquido mais viscoso a distância de quebra do jato é maior, rompendo-se a alguns diâmetros a jusante do orifício do injetor. Com o comprimento de jato intacto maior, é possível verificar uma variação significativa entre os ângulos de dispersão entre o óleo vegetal e o óleo diesel.

Influência das propriedades do meio: A massa específica do gás é determinante na velocidade do *spray* e isso pode ser verificado no estudo da penetração, velocidade e ângulo do *spray*, onde o aumento da pressão gerou maiores ângulos do *spray* e consequentemente menores velocidades de propagação da penetração da ponta do *spray*. De acordo com Reitz, 1978, a massa específica do meio tem influência até o valor de  $26 \text{ kg/m}^3$ . Acima desse valor, pouca ou nenhuma diferença pode ser visualizada. Assim, o estudo da distância de quebra foi conduzido na condição mais crítica (2,5 MPa). Embora os ensaios confirmem os efeitos da pressão sobre a divergência do ângulo do *spray* as condições experimentais utilizadas nesse trabalho não foram suficientes para conseguir atingir o regime de quebra por atomização para os combustíveis ensaiados. O estudo que mais se aproximou foi com o OD onde o regime de quebra por atomização foi atingindo parcialmente após um tempo de injeção de 2 ms. Até

esse tempo o OD ficou no regime de quebra por segunda indução do vento. Já todos os ensaios com OVS ficaram dentro do regime de quebra por segunda indução do vento.

### 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Com os resultados obtidos, alguns fatores podem ser destacados para que futuros trabalhos possam ser realizados com mais variáveis a serem consideradas e possam fornecer mais informações para enriquecer os resultados já atingidos nesse estudo.

A primeira limitação encontrada foi com relação ao SIC utilizado no presente estudo. Ficou claro ao comparar os tempos de injeção obtidos no trabalho que para obter resultados mais próximos do funcionamento real do BID utilizado, maiores velocidades de injeção são necessárias, o que resultaria em menores tempos de injeção. Ainda com relação ao SIC, seria de grande interesse o estudo para mais de uma condição de velocidade de injeção, que teria a função de simular o comportamento da injeção para diferentes condições de rotação do motor.

Embora o projeto da CP não permita realizar o aquecimento do gás para a condição próxima a pressão de compressão dos motores ciclo diesel, pode-se buscar realizar ensaios para diferentes condições de temperatura dos combustíveis. Com o aquecimento do combustível é possível reduzir a sua viscosidade e este seria um importante estudo para verificar para qual faixa de temperatura o OVS possui um comportamento de atomização mais próximo ao do OD.

Para um melhor aproveitamento da velocidade de captura de imagens que se pode obter com a câmera Phantom V411, utilizando a lente Nikon de 105 mm para o estudo fotográfico dos parâmetros do *spray*, é sugerido a utilização mais de uma luminária LED. Essa segunda luminária pode ser instalada na janela de visualização de número 3, o que garantiria uma quantidade de luz suficiente para o estudo da formação do jato próximo a saída do orifício de injeção para tempos de aquisição de 1  $\mu$ s.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arai, M., Tabata, M., Shimizu, M., **Desintegrating process and spray characterization of fuel jet injected by a Diesel nozzle**. SAE Paper No. 840275, 1984.

Arai, M., Hiroyasu, H., **Structure of fuel sprays in Diesel Engines**. SAE Paper 900475, 1990.

Argachoy, C., **Aplicação da técnica interferométrica a laser e do princípio da máxima entropia na análise de injetores de motores diesel**. Dissertação de mestrado, ITA, 2001.

Ashgriz, N., **Handbook of atomization and sprays – Theory and applications**, Springer, Canada, 2011.

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

**Bosch Automotive Handbook**. 6. ed., Germany, 2004.

Brunelli, R. R., **Estudo de viabilidade operacional e desempenho de motores de combustão interna, operando com combustível biodiesel em relação ao combustível diesel automotivo**, Dissertação de mestrado, UFRGS, 2009.

Chauhan, B. S., Kumar, N., Jun, Y. D., Lee, K. B., **Performance and emission study of preheated Jatropha oil on medium capacity diesel engine**, Energy, 2010, vol. 35, pp. 2484-2492.

Coelho, P., Costa, M., **Combustão**, Edições Orion, Alfragide, 2007.

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

Ghidini, R. L., **Análise do uso de óleo vegetal de soja como combustível alternativo para motores diesel bicilíndrico**, Trabalho de conclusão de curso, UCS, Caxias do Sul, 2009.

Giasosa, D. **Motori Endotermici**, Ulrico Hoepli Editore S.p.A., Milano, 2000.

Gonzalez, W. A., **Biodiesel e óleo vegetal in natura**, Ministério de Minas e Energia, 2008.

Heywood, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**, McGraw-Hill, New York, 1988.

Hiroyasu, H. **Diesel engine combustion and its modeling**. COMODIA 85 – Proceeding of the international symposium on diagnostics and modeling of combustion in reciprocating engines, September 1985, pp. 53-75.

**Motor diesel**, 2006. Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/biodiesel/motor-diesel/motor-diesel.htm>>

Kim, H.J., Park, S.H., Lee, C.S., **A study of a macroscopic spray behavior and atomization characteristics of biodiesel and dimethyl ether spray under increased ambient pressure**. Fuel processing technology, 2010, vol. 91, pp. 354-363.

Knothe, G., Gerpen, J. V., Krahl, J., Ramos, L. P., **Manual de biodiesel**, Edgard Blücher, São Paulo, 2006.

Lefebvre, A.H., **Atomization and sprays**. Taylor & Francis, Indiana, 1989.

Lüft, M., Bernhardt, S., Velji, A., Spicher, U., **Optimization of injection of pure rape seed oil in modern Diesel engines with direct-injection**. SAE Paper 2007-01-2031.

Misra, R. D., Mutthy, M. S., **Straight vegetable oils usage in a compression ignition engine – A review**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010.

Moresco, A, L., **Análise do uso de óleo vegetal de soja como combustível alternativo para motores diesel monocilíndrico**, Trabalho de conclusão de curso, UCS, Caxias do Sul, 2008.

Perera, S. C., **Desenvolvimento e avaliação do sistema de aquecimento de combustível para uso em motor de ignição por compressão monocilíndrico para funcionamento com óleo vegetal**, Trabalho de conclusão de curso, UCS, 2011.

Pérez, R. C., Alexeev, I. **Elementos de Construcción y Cálculo de Los Motores de Combustión Interna**, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, 1984.

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

Sonntag, R. E., Borgnakke, C., Wylen, G. J. V. **Fundamentos da termodinâmica**, Edgard Blücher, São Paulo, 2006.

Taylor, C. F., **Análise dos motores de combustão interna**, Edgard Blücher, São Paulo, 1995.

Wander, P.R., Altafini, C.R., Colombo, A.L., Perera, S.C., **Durability studies of mono-cylinder compression ignition engines operating with diesel, soy and castor oil methyl esters**. Energy, 2010, vol. 36, pp. 3917-3923.

Wander, P.R., Altafini, C.R., Moresco, A.L., Colombo, A.L., Lusa, D., **Performance analysis of a mono-cylinder diesel engine using raw soy oil as fuel varying temperature and injection point.** Biomass and Bioenergy, 2011, vol. 35, pp. 3995-4000.

Wander, P.R., Altafini, C.R., Colombo, A.L., Perera, S.C., **Performance of a small stationary engines using blends of diesel fuel with biodiesel of soybean.** SAE Paper 2010-36-0379.

## APÊNDICE A – Gráfico de temperatura de calibração das termoresistências

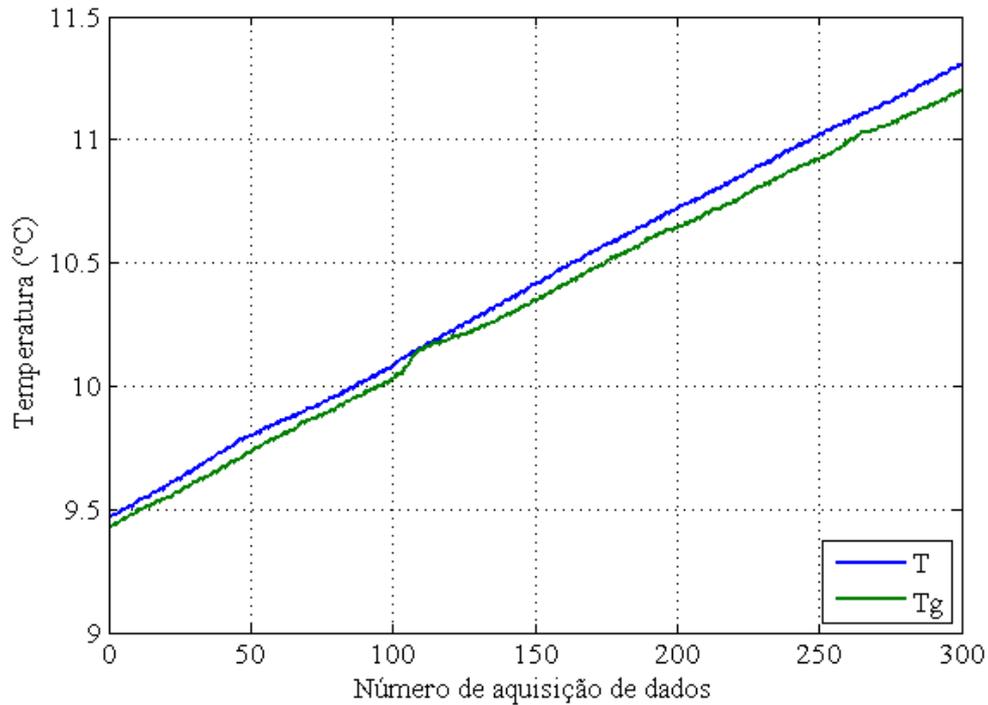


Figura A. 1 – Temperatura de calibração das termoresistências

O equipamento de aquisição de temperatura foi ligado e o valor das temperaturas coletadas. Na Figura A. 1 pode ser visualizado o gráfico de calibração para o ensaio onde se percebe um comportamento crescente nas retas, devido a estabilização da temperatura da água do recipiente com a temperatura ambiente. Também é possível identificar uma diferença máxima de temperatura de 0,15 °C entre as termoresistências utilizadas.

## APÊNDICE B – Acompanhamento da temperatura da câmara pressurizada durante o ensaio

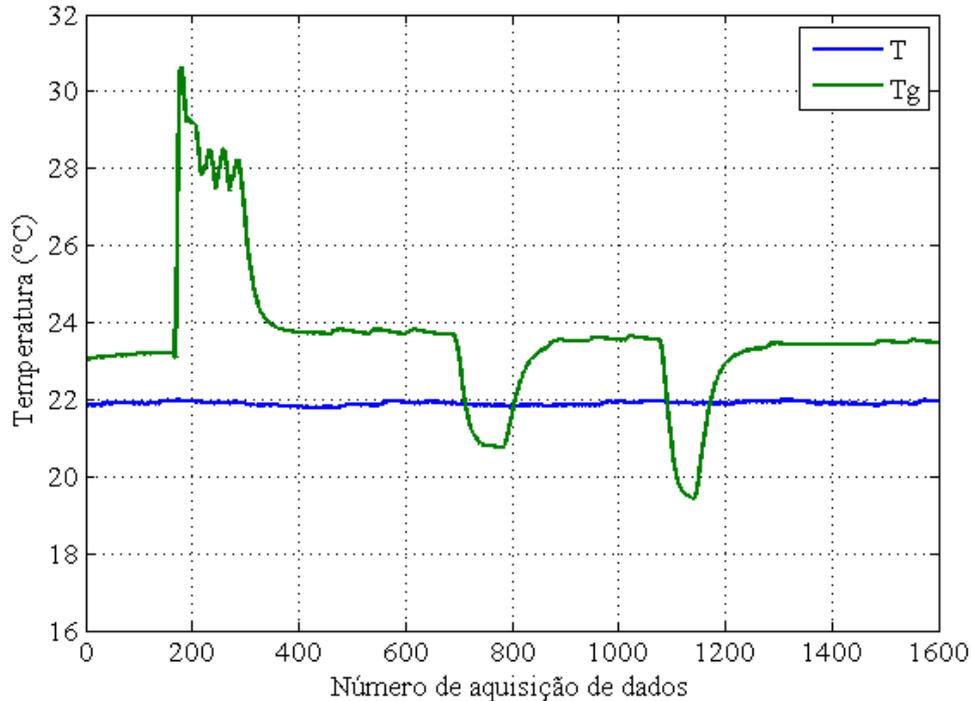


Figura B. 1 – Temperaturas da câmara pressurizada durante o ensaio

A pressurização foi realizada de forma manual e mantendo sempre o cuidado de realizar a coleta das imagens após a estabilização da temperatura na pressão desejada, pois esse fator influenciaria diretamente na pressão e conseqüentemente na massa específica do gás.

Verifica-se que ao iniciar o processo de pressurização a temperatura interna da câmara se eleva, chegando a um pico de 30,6°C. Após atingir a pressão de 2,5 MPa (25 bar), ocorre a estabilização da temperatura a um valor um pouco acima da temperatura interna inicial da câmara. Após a conclusão dos ensaios com a pressão de 2,5 MPa (25 bar) é reduzida a pressão para 2,0 MPa (20 bar), nesse procedimento é possível verificar que a temperatura cai para 20,7°C. Após uma nova estabilização da temperatura inicia-se a realização dos ensaios a pressão de 2,0 MPa (20 bar). Após a conclusão dos ensaios ocorre uma nova despressurização para a pressão final de 1,5 MPa (15 bar) onde constata-se novamente uma redução da temperatura atingindo 19,4°C.

## APENDICE C – Valores médios calculados para óleo diesel

Tabela C. 1 – OD para a pressão de 2,5 MPa

Tempo (ms)	Penetração (mm)	Velocidade (m/s)	Ângulo (°)
0,125	1,354	10,834	-
0,250	3,660	14,640	-
0,375	5,666	15,110	-
0,500	7,290	14,581	-
0,625	8,969	14,350	-
0,750	10,392	13,857	-
0,875	11,680	13,348	-
1,000	12,725	12,725	-
1,125	13,929	12,229	-
1,250	14,987	11,726	-
1,375	15,854	11,297	-
1,500	17,523	11,452	-
1,625	19,706	11,902	-
1,750	22,391	12,581	-
1,875	24,672	12,957	-
2,000	26,996	13,307	26,217
2,125	28,952	13,446	25,807
2,250	30,599	13,433	25,953
2,375	32,193	13,400	25,425
2,500	33,523	13,263	25,715
2,625	34,572	13,033	26,253
2,750	35,593	12,815	26,177
2,875	36,792	12,676	26,194
3,000	38,158	12,602	26,145
3,125	39,433	12,5076	26,028
3,250	40,753	12,433	26,290
3,375	42,260	12,420	26,224
3,500	43,633	12,369	26,094
3,625	45,170	12,365	25,607
3,750	46,412	12,285	25,649
3,875	47,913	12,276	25,550
4,000	49,191	12,212	25,351
4,125	50,625	12,190	25,165
4,250	51,772	12,101	24,936
4,375	53,016	12,040	24,993
4,500	53,944	11,913	25,040
4,625	55,229	11,869	24,540
4,750	56,340	11,790	24,689

Tempo (ms)	Penetração (mm)	Velocidade (m/s)	Ângulo (°)
4,875	57,374	11,700	24,778
5,000	58,648	11,663	24,350
5,125	59,731	11,558	24,866
5,250	60,682	11,464	24,845
5,375	61,743	11,395	24,659
5,500	62,795	11,328	24,641
5,625	63,927	11,279	24,818
5,750	64,816	11,161	25,111
5,875	65,879	11,053	25,183
6,000	66,753	10,969	25,641
6,125	67,653	10,894	25,559
6,250	68,526	10,817	25,586
6,375	69,209	10,714	25,472
6,500	69,977	10,627	25,370
6,625	70,852	10,560	25,095
6,750	71,647	10,483	25,084
6,875	72,331	10,393	25,090
7,000	73,084	10,316	25,189
7,125	73,717	10,225	25,037
7,250	74,356	10,138	24,932
7,375	75,072	10,064	25,057
7,500	75,575	9,964	24,992
7,625	76,169	9,880	24,961
7,750	76,544	9,771	24,898
7,875	77,148	9,693	24,935
8,000	77,861	9,632	24,955
8,125	78,384	9,549	24,926
8,250	78,942	9,473	24,845
8,375	79,608	9,412	24,736
8,500	80,153	9,339	24,585

Tabela C. 2 – OD para a pressão de 2 MPa

Tempo (ms)	Penetração (mm)	Velocidade (m/s)	Ângulo (°)
0,125	2,381	11,219	-
0,250	4,564	13,773	-
0,375	6,503	14,249	-
0,500	8,284	14,209	-
0,625	9,772	13,787	-
0,750	10,953	13,131	-
0,875	11,843	12,344	-
1,000	13,030	12,022	-
1,125	14,0201	11,606	-
1,250	14,941	11,216	-
1,375	15,995	10,973	-
1,500	18,204	11,496	-
1,625	21,779	12,741	-
1,750	24,951	13,614	-
1,875	27,836	14,226	-
2,000	30,425	14,619	24,960
2,125	32,727	14,837	24,490
2,250	34,817	14,941	24,220
2,375	36,472	14,855	24,780
2,500	38,151	14,787	24,810
2,625	39,389	14,560	24,650
2,750	41,110	14,604	24,400
2,875	42,530	14,464	24,160
3,000	43,848	14,302	24,370
3,125	45,120	14,137	24,010
3,250	46,466	14,008	23,880
3,375	47,797	13,883	24,100
3,500	49,183	13,783	24,180
3,625	50,644	13,708	24,110
3,750	52,211	13,667	23,540
3,875	53,753	13,622	23,560
4,000	55,124	13,537	23,420
4,125	56,551	13,472	23,380
4,250	57,869	13,387	23,270
4,375	59,217	13,314	23,120
4,500	60,409	13,211	23,450
4,625	61,586	13,111	23,250
4,750	62,799	13,022	23,520
4,875	64,012	12,938	23,520
5,000	65,256	12,865	23,310

Tempo (ms)	Penetração (mm)	Velocidade (m/s)	Ângulo (°)
5,125	66,822	12,856	23,460
5,250	67,959	12,768	23,760
5,375	69,116	12,687	23,780
5,500	70,057	12,571	23,640
5,625	71,266	12,508	23,500
5,750	72,215	12,403	23,830
5,875	73,179	12,304	23,780
6,000	74,007	12,188	23,810
6,125	74,96	12,097	23,860
6,250	75,852	11,998	23,710
6,375	76,587	11,880	23,620
6,500	77,379	11,775	23,610
6,625	78,216	11,681	23,480
6,750	79,067	11,592	23,620
6,875	79,925	11,507	23,540

Tabela C. 3 – OD para a pressão de 1,5 MPa

Tempo (ms)	Penetração (mm)	Velocidade (m/s)	Ângulo (°)
0,125	1,386	11,089	-
0,250	3,843	15,374	-
0,375	6,215	16,575	-
0,500	8,239	16,479	-
0,625	9,971	15,954	-
0,750	11,463	15,284	-
0,875	12,834	14,668	-
1,000	14,004	14,004	-
1,125	15,068	13,394	-
1,250	16,142	12,913	-
1,375	17,025	12,382	-
1,500	18,143	12,095	-
1,625	20,209	12,436	-
1,750	24,047	13,741	-
1,875	27,589	14,714	-
2,000	30,470	15,235	27,910
2,125	33,010	15,534	28,410
2,250	35,172	15,632	28,430
2,375	37,557	15,813	28,320
2,500	40,056	16,022	27,680
2,625	42,215	16,082	27,040
2,750	43,985	15,994	26,530
2,875	46,125	16,043	26,510
3,000	48,254	16,084	26,290
3,125	49,972	15,991	25,690
3,250	51,828	15,947	25,520
3,375	53,306	15,794	25,300
3,500	55,215	15,775	25,210
3,625	57,664	15,907	24,920
3,750	59,906	15,975	24,480
3,875	61,871	15,966	24,340
4,000	63,743	15,935	24,670
4,125	65,266	15,822	24,400
4,250	66,995	15,763	24,280
4,375	68,815	15,729	24,480
4,500	70,232	15,607	24,410
4,625	71,856	15,536	24,670
4,750	73,350	15,442	24,730
4,875	74,168	15,214	24,640
5,000	75,558	15,111	24,560
5,125	76,677	14,961	24,730

Tempo (ms)	Penetração (mm)	Velocidade (m/s)	Ângulo (°)
5,250	77,420	14,746	24,750
5,375	78,550	14,614	24,700
5,500	79,770	14,503	24,620

## APÊNDICE D – Valores médios calculados para óleo vegetal de soja

Tabela D. 1 – OVS para a pressão de 2,5 MPa

Tempo (ms)	Penetração (mm)	Velocidade (m/s)	Ângulo (°)
0,125	1,938	10,780	-
0,250	4,201	13,460	-
0,375	6,833	15,585	-
0,500	9,068	16,076	-
0,625	11,032	15,972	-
0,750	12,701	15,570	-
0,875	14,036	14,921	-
1,000	15,144	14,206	-
1,125	16,167	13,567	-
1,250	17,159	13,033	-
1,375	18,363	12,733	-
1,500	19,933	12,723	-
1,625	22,161	13,095	-
1,750	24,312	13,379	-
1,875	26,664	13,724	-
2,000	29,095	14,065	-
2,125	31,288	14,263	-
2,250	33,552	14,475	-
2,375	35,365	14,478	-
2,500	36,998	14,411	-
2,625	38,672	14,363	-
2,750	40,083	14,226	-
2,875	41,431	14,080	-
3,000	42,621	13,894	19,548
3,125	43,988	13,776	20,140
3,250	45,113	13,597	19,663
3,375	46,189	13,417	19,738
3,500	47,218	13,236	19,099
3,625	48,449	13,121	18,790
3,750	49,606	12,995	18,621
3,875	50,597	12,833	18,362
4,000	51,573	12,678	18,547
4,125	52,752	12,580	18,424
4,250	53,811	12,461	18,728
4,375	54,891	12,353	18,443
4,500	55,758	12,204	19,167
4,625	56,918	12,126	19,049
4,750	58,093	12,055	18,593

Tempo (ms)	Penetração (mm)	Velocidade (m/s)	Ângulo (°)
4,875	59,033	11,940	18,691
5,000	60,198	11,875	18,653
5,125	61,247	11,791	18,892
5,250	62,139	11,681	18,756
5,375	63,147	11,598	18,617
5,500	64,153	11,518	18,970
5,625	64,901	11,396	18,811
5,750	65,723	11,293	18,962
5,875	66,680	11,216	18,720
6,000	67,606	11,137	18,698
6,125	68,632	11,078	18,942
6,250	69,605	11,013	18,757
6,375	70,478	10,935	18,737
6,500	71,531	10,887	19,308
6,625	72,380	10,810	19,212
6,750	72,944	10,695	18,566
6,875	74,027	10,658	18,422
7,000	74,837	10,584	18,622
7,125	75,615	10,508	18,290
7,250	76,463	10,444	19,015
7,375	77,359	10,389	18,835
7,500	78,054	10,310	19,106
7,625	78,841	10,244	19,090
7,750	79,766	10,199	19,114
7,875	80,567	10,139	18,868

Tabela D. 2 – OVS para a pressão de 2 MPa

Tempo (ms)	Penetração (mm)	Velocidade (m/s)	Ângulo (°)
0,125	1,389	9,316	-
0,250	3,683	13,258	-
0,375	6,998	17,199	-
0,500	9,433	17,689	-
0,625	11,767	17,824	-
0,750	13,588	17,292	-
0,875	15,244	16,737	-
1,000	16,570	15,988	-
1,125	17,697	15,228	-
1,250	18,787	14,591	-
1,375	19,712	13,950	-
1,500	21,581	14,031	-
1,625	23,781	14,291	-
1,750	25,734	14,379	-
1,875	27,244	14,228	-
2,000	28,698	14,070	-
2,125	30,172	13,939	-
2,250	31,593	13,798	-
2,375	33,421	13,841	-
2,500	35,367	13,925	-
2,625	37,163	13,945	-
2,750	39,162	14,038	-
2,875	41,193	14,135	-
3,000	42,968	14,139	22,019
3,125	44,712	14,134	22,027
3,250	46,599	14,171	22,026
3,375	48,352	14,166	21,567
3,500	50,442	14,256	20,924
3,625	52,145	14,233	20,773
3,750	54,060	14,268	20,451
3,875	55,656	14,219	19,906
4,000	57,279	14,180	19,859
4,125	58,763	14,110	19,661
4,250	60,630	14,134	19,306
4,375	62,437	14,144	19,273
4,500	64,134	14,129	19,126
4,625	65,500	14,043	19,064
4,750	67,076	14,005	19,120
4,875	68,247	13,887	19,061
5,000	69,556	13,802	18,854
5,125	70,680	13,686	17,848

Tempo (ms)	Penetração (mm)	Velocidade (m/s)	Ângulo (°)
5,250	71,721	13,559	17,675
5,375	72,784	13,441	17,701
5,500	73,872	13,333	17,693
5,625	75,257	13,283	17,558
5,750	76,332	13,182	17,584
5,875	77,764	13,145	17,524
6,000	78,967	13,071	17,773
6,125	80,728	13,007	17,749

Tabela D. 3 – OVS para a pressão de 1,5 MPa

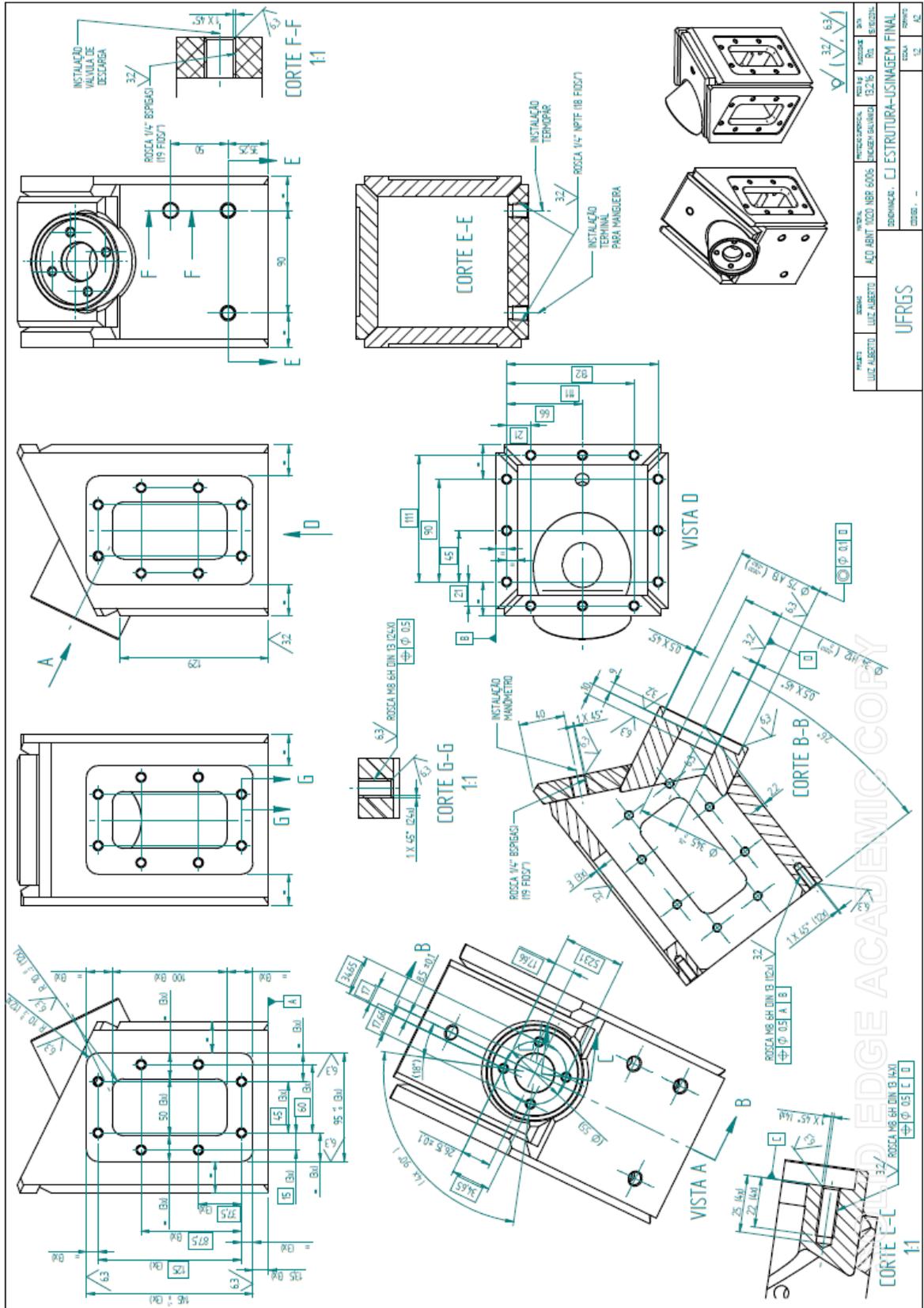
Tempo (ms)	Penetração (mm)	Velocidade (m/s)	Ângulo (°)
0,125	1,864	12,231	-
0,250	4,330	15,192	-
0,375	7,248	17,585	-
0,500	10,096	18,750	-
0,625	12,360	18,615	-
0,750	14,334	18,160	-
0,875	16,132	17,625	-
1,000	17,639	16,955	-
1,125	18,971	16,273	-
1,250	20,211	15,653	-
1,375	21,459	15,152	-
1,500	22,564	14,643	-
1,625	24,165	14,513	-
1,750	27,261	15,237	-
1,875	30,383	15,881	-
2,000	33,044	16,215	-
2,125	35,171	16,260	-
2,250	37,473	16,377	-
2,375	39,589	16,403	-
2,500	42,083	16,579	-
2,625	44,028	16,536	-
2,750	46,163	16,562	-
2,875	48,324	16,595	-
3,000	50,266	16,552	17,617
3,125	52,103	16,477	17,293
3,250	54,182	16,484	17,028
3,375	56,036	16,424	16,787
3,500	58,284	16,480	16,752
3,625	60,866	16,457	16,468
3,750	62,592	16,370	16,434
3,875	64,472	16,327	16,374
4,000	66,552	16,333	16,012
4,125	68,645	16,342	15,987
4,250	70,204	16,229	16,290
4,375	71,776	16,124	16,413
4,500	73,452	16,049	16,292
4,625	75,239	16,001	16,006
4,750	76,731	15,896	16,029
4,875	78,325	15,815	15,942
5,000	79,719	15,700	15,964

## ANEXO I – Diferença do óleo diesel comercializado no Brasil

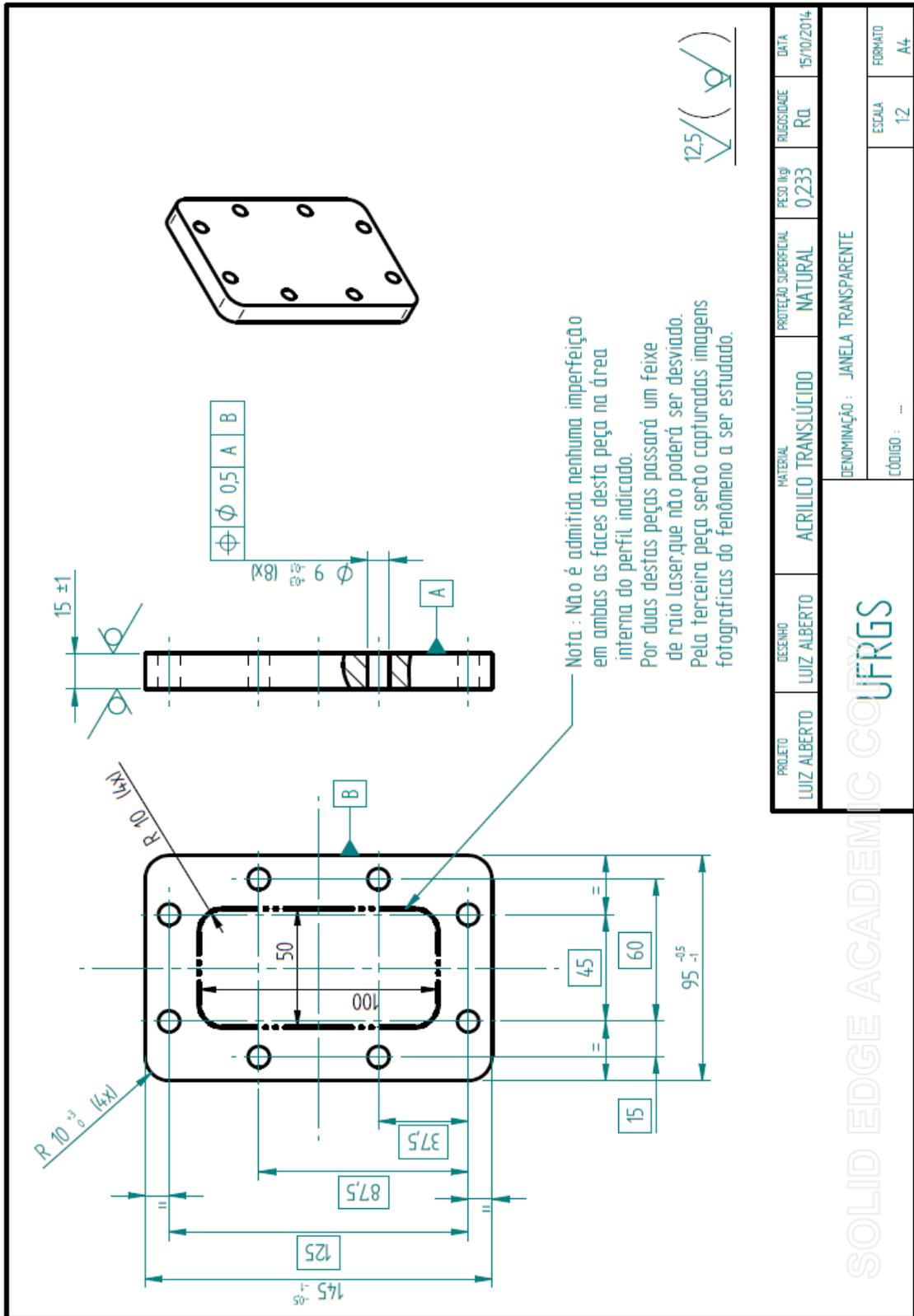
<b>DIFERENÇAS PRINCIPAIS DOS ÓLEO DIESEL COMERCIALIZADO NO BRASIL</b>					
<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>LIMITE</b>		<b>MÉTODO</b>	
		<b>TIPO A E TIPO B</b>		<b>ABNT NBR</b>	<b>ASTM/EN</b>
		<b>S 10</b>	<b>S500</b>		
<b>Aspecto (2) (22) (23)</b>	-	Límpido e isento de impurezas		14954	D4176
<b>Cor</b>	-	(3)	Vermelho (4)		
<b>Cor ASTM, máx. (5)</b>	-	3,0		14483	D1500 D6045
<b>Teor de Biodiesel (6)</b>	% volume	(7)		15568	EN 140768
<b>Enxofre total, máx. (21)</b>	mg/kg	10,0 (8)	-	-	D2622 D5453 D7039 D7212 (9) D7220
		-	500	14533 (9)	D2622 D4294 (9) D5453 D7039 D7220
<b>Destilação</b>					
<b>10% vol., recuperados, mín.</b>	°C	180	Anotar	9619	D86
<b>50% vol., recuperados</b>		245,0 a 295,0	245,0 a 310,0		
<b>85% vol., recuperados, máx.</b>		-	360		
<b>90% vol., recuperados</b>		-	Anotar		
<b>95% vol., recuperados, máx.</b>		370,0	-		
<b>Massa específica a 20°C</b>	kg/m <sup>3</sup>	815,0 a 850,0 (10)	815,0 a 865,0	7148 14065	D1298 D4052
<b>Ponto de fulgor, mín.</b>	°C	38,0		7974 14598	D56 D93 D3828 D7094
<b>Viscosidade cinemática a 40°C</b>	mm <sup>2</sup> /s	2,0 a 4,5	2,0 a 5,0	10441	D445
<b>Ponto de</b>	°C	(11)		14747	D6371

<b>entupimento de filtro a frio, máx.</b>					
<b>Número de cetano, mín. ou número de cetano derivado (NCD), mín.</b>	-	48	42 (12)	-	D613 D6890 D7170
<b>Resíduo de carbono Romsbot-tom no resíduo dos 10% finais da destilação, máx.</b>	% massa	0,25		14318	D524
<b>Cinzas, máx.</b>	% massa	0,010		9842	D482
<b>Corrosividade ao cobre, 3h a 50°C, máx.</b>	-	1		14359	D130
<b>Teor de água (13), máx.</b>	mg/kg	200	500	-	D6304 EM ISO 12937
<b>Contaminação total (14), máx.</b>	mg/kg	24	-	-	EN 12662
<b>Água e sedimentos (14), máx.</b>	% volume	-	0,05	-	D2709
<b>Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (9) (15), máx.</b>	% massa	11	-	-	D5186 D6591 (16) EN 12916
<b>Estabilidade a oxidação (15), máx.</b>	mg/100ml	2,5	-	-	D2274 (17) D5304 (17)
<b>Índice de acidez (24)</b>	mg KOH/g	Anotar	-	14248	D664 D974
<b>Lubricidade, máx.</b>	µm	(18)			ISO 12156 D6079
<b>Condutividade elétrica, mín. (19)</b>	pS/m	25	25 (20)	-	D2624 D4308
<b>Referência</b>	ANP N° 50, de 23/12/2013 – DOU 24/12/2013				

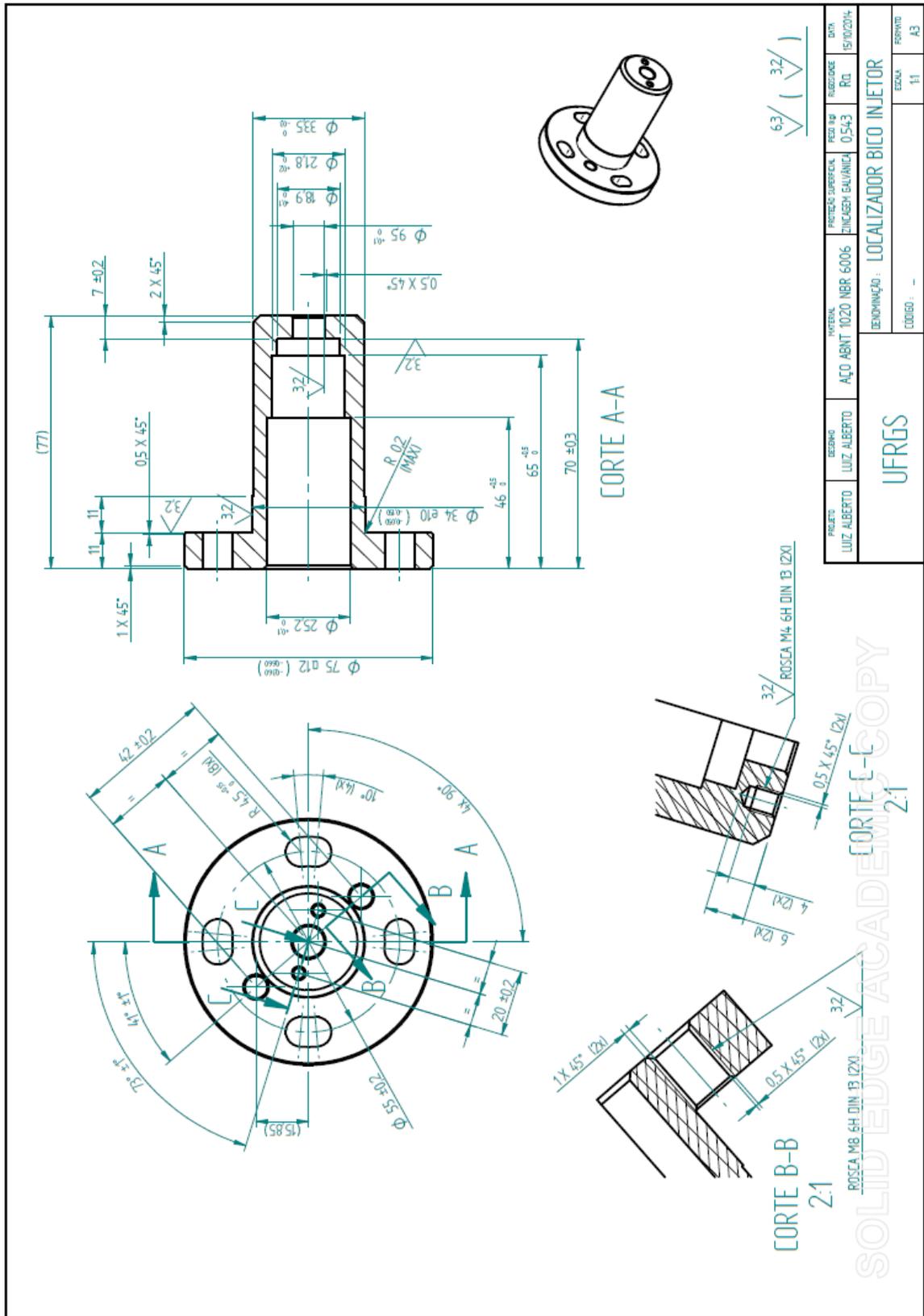
ANEXO II – Câmara pressurizada



ANEXO III – Janela de visualização



ANEXO IV – Localizador do bico injetor





## ANEXO VI – Regulador de pressão

### Modelo 987 Regulador de cilindro para alta pressão

#### Aplicações:

- ▶ Projetado para operar com cilindro de alta pressão
- ▶ Testes de alta pressão, carregamento de acumuladores, pressurização de pneus de aeronave, refinarias de petróleo, usinas químicas, laboratórios de pesquisas e indústria em geral
- ▶ Ideal também para manifolds de alta pressão

#### Características:

- ▶ Pressão máxima de entrada 300 bar
- ▶ Diafragma de aço inoxidável no primeiro estágio - sem contaminação interna
- ▶ Sede da cápsula de alta pressão com superfície de vedação de Kel-F (CTFE).
- ▶ Corpo e tampa de latão forjado resistente à corrosão
- ▶ Bucha da tampa em bronze e parafuso T em aço inoxidável
- ▶ Conexão de entrada de alta resistência - rosca de 15 mm com vedação metal com metal.
- ▶ A saída é uma conexão para tubo de cobre com diâmetro externo de 1/4".
- ▶ Modelos disponíveis para todos os gases comprimíveis não-corrosivos
- ▶ Mesmo regulador usado para gases leves sem vibração



987S-170M

MODELO Nº	GÁS	PRESSÃO DE ENTRADA MAX (bar)	PRESSÃO DE SAÍDA (bar)	VAZÃO MAX DE AR (m <sup>3</sup> /h)	MANÔMETRO DE PRESSÃO DE SAÍDA (bar)	MANÔMETRO DA PRESSÃO DE ENTRADA (bar)
987S-100M *	Argônio, CO <sub>2</sub> , Nitrogênio, O <sub>2</sub> , Ar, Hélio, Hidrogênio, Metano	300	0-100	400	0-315	0-400
987AS-170M *	Argônio, CO <sub>2</sub> , Nitrogênio, O <sub>2</sub> , Ar, Hélio, Hidrogênio, Metano	300	0-170	500	0-315	0-400
CLIMATESTER	Nitrogênio	300	0-55	120	0-70	0-400

\*O regulador está disponível para todos os gases listados. Ao requisitar, sempre especifique o gás da aplicação.

## ANEXO VII – Mangueira termoplástica

### Balflex® EN 855 R7 / SAE 100R7



Mangueira hidráulica termoplástica de alta pressão de 1 trama de poliéster



#### 10.1030. – Balflex® EN 855 R7 / SAE 100R7

Conforme Norma ISO 3949 / Norma EN 855 tipo R7 / Norma SAE J517 tipo SAE 100R7

- Tubo Interno** : tubo sem costura de poliéster termoplástico resistente a óleo  
**Reforço** : 1 trama de poliéster de alta resistência  
**Cobertura** : termoplástico negro resistente ao óleo e intempérie  
**Fator de Segurança** : 4 : 1  
**Aplicação** : fluidos hidráulicos à base de petróleo  
**Temperatura de Utilização** : - 40°C + 100°C (temperatura máxima recomendada para fluidos à base de água + 65°C)  
**Terminais** : terminais prensados Balflex® série 23 com capas série 20.107.

Código	Ø nom	bitola	Ø interior		Ø exterior		pressão de trabalho		pressão min. de ruptura		raio min. de curvatura		peso
			mm	poleg.	mm	poleg.	bar	PSI	bar	PSI	mm	poleg.	
10.1030.03	3/16"	- 3	4,8	0.19	10,3	0.41	207	3000	828	12000	75	2.95	0,07
10.1030.04	1/4"	- 4	6,3	0.25	12,4	0.49	190	2750	760	11000	100	3.94	0,09
10.1030.05	5/16"	- 5	8,0	0.31	14,2	0.56	172	2500	688	10000	114	4.49	0,13
10.1030.06	3/8"	- 6	9,5	0.38	15,7	0.62	155	2250	620	9000	127	5.00	0,16
10.1030.08	1/2"	- 8	12,7	0.50	19,3	0.76	138	2000	552	8000	178	7.00	0,22
10.1030.10	5/8"	- 10	16,0	0.63	23,1	0.91	103	1500	412	6000	203	7.99	0,28
10.1030.12	3/4"	- 12	19,0	0.75	26,4	1.04	86	1250	345	5000	254	10.0	0,33
10.1030.16	1"	- 16	25,4	1.00	33,3	1.31	69	1000	276	4000	305	12.0	0,40

