



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Autor: Carlos Alberto Gomes Júnior

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE INJEÇÃO, CONTRAPRESSÃO  
AMBIENTE E TIPO DE COMBUSTÍVEL NOS PARÂMETROS DA ATOMIZAÇÃO  
DE UM INJETOR DE INJEÇÃO DIRETA DE COMBUSTÍVEL *HIGH - PRESSURE*  
*SWIRL*.**

Belo Horizonte  
junho de 2017

Carlos Alberto Gomes Júnior

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE INJEÇÃO, CONTRAPRESSÃO  
AMBIENTE E TIPO DE COMBUSTÍVEL NOS PARÂMETROS DA ATOMIZAÇÃO  
DE UM INJETOR DE INJEÇÃO DIRETA DE COMBUSTÍVEL *HIGH - PRESSURE  
SWIRL*.**

Dissertação apresentada ao programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal de Minas Gerais, como  
requisito parcial para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Rudolf Huebner

Belo Horizonte

junho de 2017

Carlos Alberto Gomes Júnior

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE INJEÇÃO, CONTRAPRESSÃO  
AMBIENTE E TIPO DE COMBUSTÍVEL NOS PARÂMETROS DA ATOMIZAÇÃO  
DE UM INJETOR DE INJEÇÃO DIRETA DE COMBUSTÍVEL *HIGH - PRESSURE  
SWIRL*.**

Dissertação apresentada ao programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal de Minas Gerais, como  
requisito parcial para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Mecânica.

---

Prof. Dr. Rudolf Huebner (Orientador)  
Universidade Federal de Minas Gerais

---

Carlos Alberto Gomes Júnior  
Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte, 21 de junho de 2017

*Dedico este trabalho à minha família e amigos.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus por ter me dado condições, força e oportunidade para a realização desta dissertação. Aos meus pais, Leni e Carlos, e minha irmã, Dedé, pelo apoio e pela compreensão da importância dessa conquista. Agradeço à minha namorada Aline, pelo carinho, pelo apoio incondicional, compreensão, incentivo e motivação. A família é meu alicerce.

Ao Professor orientador deste trabalho, Doutor Rudolf Huebner, pelos desafios propostos.

Ao Professor Doutor Ramón Molina Valle, coordenador do Centro de Tecnologia da Mobilidade (CTM-UFMG).

Aos Professores José Guilherme Baêta e Fabrício Pujatti, pelos conhecimentos transmitidos.

Ao Professor Marcos Pinotti Barbosa (*In memorian*), por despertar, em mim, o interesse e curiosidade pela pesquisa.

Ao Professor Doutor José Eduardo Mautone Barros, pelos conhecimentos transmitidos.

A todos colegas e professores do Centro de Tecnologia da Mobilidade (CTM-UFMG).

Aos amigos e engenheiros, Alysson Fernandes Teixeira, Roberto Berlini, Rafael Lara, Márcio Guzzo e Nilton Diniz, e ao amigo e estudante de engenharia, Sérgio Augusto. A todos, obrigado pela gigantesca ajuda e participação neste trabalho.

Aos amigos, Matheus Henrique, Plínio Ferraz, Paulo César e Edimar Cardoso que, de alguma maneira, contribuíram para minha formação pessoal e profissional.

E ao amigo Cleris Batista Almeida (*In memorian*)!

Por fim, agradeço à CLASSIFICAR RETÍFICA DIESEL Ltda, pela compreensão e pelo apoio recebido dos colegas de trabalho, fundamental para realização desta pesquisa.

*“Nunca desista de um sonho por causa do tempo que isso levará para se concretizar. O tempo passará de qualquer forma!”*

**Earl Nightingale**

*“The master has failed more times than the beginner has even tried.”*

**Rickson Gracie.**

## RESUMO

Os fenômenos físicos que ocorrem nos sprays formados por injetores de combustível empregados em motores de combustão interna, têm sido amplamente estudados por pesquisadores de todo o mundo. O interesse em estudar tais fenômenos vem da necessidade de se reduzir o consumo de combustível e a emissão de poluentes, melhorar a eficiência de combustão do motor e analisar o comportamento dos diferentes combustíveis que estão sendo inseridos no mercado. No presente trabalho, foram realizados experimentos com o objetivo de analisar a influência da pressão de injeção, contrapressão ambiente e o tipo de fluido de teste nos parâmetros de atomização (macroscópicos e microscópicos) do spray de injeção direta *high-pressure swirl*. Como fluidos de teste foram utilizados: água, etanol anidro (EA), etanol combustível (E100), gasolina (E0), gasolina (E22), Exxsol D40 e Exxsol D60. Um aparato experimental composto por dois cilindros de nitrogênio, um sistema de controle de injeção (Motec-M84 juntamente com um driver de injeção peak and hold), um reservatório de combustível como vaso de pressão e uma câmera de alta velocidade (CCD) e LEDs para iluminação. As características macroscópicas (ângulo de cone e penetração) do spray foram determinadas, utilizando filmagens a 8000 quadros por segundo, e aplicou-se técnica *shadowgraphy* com auxílio do MatLab para tratamento das imagens e as microscópicas foram medidas com o PDA (*Phase Doppler Anemometry*), para determinar a velocidade média das gotas, diâmetro das gotas e os diâmetros médios característicos, com ênfase no Diâmetro Médio e Diâmetro Médio de Sauter (SMD) do spray de Exxsol D40 com as pressões de injeção de 80, 100 e 120 bar. Os resultados mostraram um comportamento análogo entre os combustíveis e o Exxsol D40, para as características macroscópicas e as microscópicas mostram que a qualidade da atomização melhora com o aumento da pressão de injeção, ou seja, menores diâmetros e maiores velocidades das gotas.

Palavras-chave: Atomização, Spray, Injeção Direta, *Shadowgraphy*, PDA.

## ABSTRACT

The physical phenomena that occur in the spray formed by the fuel injectors used in internal combustion engines have been widely studied by researchers worldwide. The interest in studying these phenomena arises from the need to reduce fuel consumption and pollutant emissions, to increase the engine combustion efficiency and analyze the behavior of different of fuel being placed on the market. In the present work, experiments were carried out to analyze the influence of injection pressure, ambient backpressure and test fluid type on the atomization parameters (macroscopic and microscopic) of the high-pressure swirl injector's spray. As test fluids were used: water, anhydrous ethanol (EA), ethanol fuel (E100), gasoline (E0), gasoline (E22), Exxsol D40 and Exxsol D60. An experimental device consisting of two nitrogen cylinders, an injection system control (Motec-M84 along with a peak and hold injection driver), a fuel tank as pressure vessel and a high-speed camera (CCD) and LEDs for back-light illumination. The macroscopic characteristics (cone angle and penetration) of the spray were determined using footage at 8000 frames per second, And a shadowgraph technique was applied with the aid of MatLab for the treatment of the images and the microscopic ones were measured with the PDA (Phase Doppler Anemometry), to determine mean droplet velocity, droplet diameter and characteristic mean diameters, with emphasis on the Mean Diameter and Sauter Mean Diameter (SMD) of the Exxsol D40 spray with the injection pressures of 80, 100 and 120 bar. The results showed a similar behavior between the fuels and the Exxsol D40, for the macroscopic and for microscopic characteristics show that the quality of the atomization improves with the increase of the injection pressure, that is, smaller droplet diameters and higher droplet velocities.

Keywords: Atomization, Spray, Direct Injection, Shadowgraphy, PDA.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Motor Junkers FO.2.....	25
Figura 2 – Sistema de combustão GDI Daimler-Benz 300 SL.....	26
Figura 3 – Sistemas de injeção de combustível: (a) Sistema de injeção indireta e (b) Sistema de injeção direta.....	27
Figura 4 – Mecanismos de formação de mistura homogênea.....	29
Figura 5 – Diferentes configurações na injeção direta .....	29
Figura 6 – Configuração de injeção direta Spray-Guided.....	31
Figura 7 – Desintegração de filme líquido.....	34
Figura 8 – Limites dos regimes de break-up primário .....	35
Figura 9 – Ilustração dos regimes de break-up .....	36
Figura 10 – Regime de break-up secundário de gotas .....	37
Figura 11 – Diagrama esquemático do spray de injetores de combustível. ....	38
Figura 12 – Conceito de três tipos de injetores de injeção direta típicos .....	43
Figura 13 – Injetor do tipo high-pressure swirl em corte.....	44
Figura 14– Spray produzido por um injetor do tipo high-pressure swirl. ....	44
Figura 15 – Injetor outward-opening em corte.....	46
Figura 16 – Injetor multi-hole em corte.....	47
Figura 17 – Esquema de montagem do sistema de Shadowgraphy .....	48
Figura 18 – Esquema do sistema óptico do PDA. ....	50
Figura 19 – Anatomia de um típico sinal busrt de LDA gerado quando uma partícula passa através do volume de medição. ....	51
Figura 20 – Sinal Doppler do detector 1 e 2.....	53
Figura 21 – Curva de calibração do PDA.....	53
Figura 22 – Ilustração de três diferentes modos de espalhamento.....	54
Figura 23 – Dependência angular da luz difusa para um plano de polarização paralelo e perpendicular.....	55
Figura 24 – Injetor high-pressure swirl Magneti Marelli IWD3+ 193.....	56
Figura 25 – Injetor Multi-hole Bosh (HDEV 5.1). ....	58
Figura 26 – Diagrama esquemático do sistema de abastecimento de combustível de alta pressão. ....	59

Figura 27 – Diagrama esquemático do sistema de controle do injetor de injeção direta. ....	60
Figura 28 – Esquema do aparato experimental do sistema de injeção direta ...	60
Figura 29 – Montagem do aparato experimental .....	62
Figura 30 – Procedimento para determinação da densidade de resolução.....	63
Figura 31 – Subtração de imagens para evidenciar o spray. ....	64
Figura 32 – Imagem subtraída e com ajuste de histograma.....	64
Figura 33 – Procedimento para escolha do ponto de referência das imagens..	65
Figura 34 – Arco de pixels situado a 0,5cm do injetor em uma imagem de injeção de Exxsol D60.....	66
Figura 35 – Valores em pixels do arco da Figura 34 em função do posicionamento angular.....	67
Figura 36 – Ângulo de cone situado a 5 mm do injetor em uma imagem de injeção de Exxsol D60.....	67
Figura 37 – Origem do sistema de coordenadas para as imagens da Injeção de EXXSOL D60.....	68
Figura 38 – Perfil horizontal de pixel para uma imagem da injeção de EXXSOL D60.....	69
Figura 39 – Imagem da injeção de EXXSOL D60 e a identificação das bordas em um gráfico posição por posição. ....	69
Figura 40 – Imagem da injeção de EXXSOL D60 e a identificação das bordas em um gráfico posição por posição para a medição da penetração.....	70
Figura 41 – Desenho esquemático aparato experimental.....	72
Figura 42 – Distancia da ponta do injetor ao volume de medição do PDA. ....	72
Figura 43 – Esquema da sonda receptora.....	75
Figura 44 – processo de subtração de imagens.....	77
Figura 45 – Desenvolvimento dos sprays dos fluidos de teste no tempo à PI=80 bar e CP=0 bar. ....	78
Figura 46 – Desenvolvimento dos sprays dos fluidos de teste no tempo à PI=100 bar e CP=0 bar. ....	79
Figura 47 – Formação de vórtices no spray.....	80
Figura 48 – Desenvolvimento dos sprays dos fluidos de teste no tempo à PI=80 bar e CP=10 bar. ....	80

Figura 49 – Desenvolvimento dos sprays dos fluidos de teste no tempo à PI=100 bar e CP=10 bar. ....	81
Figura 50 – Comparação entre os sprays de Exxsol D40; PI=80 bar. ....	82
Figura 51 – Sprays dos injetores high-pressure swirl e multi-hole. ....	84
Figura 52 – Ângulo de cone em função da distância do injetor; PI =80 bar. ....	86
Figura 53 – Ângulo de cone em função da distância do injetor; PI =100 bar.....	87
Figura 54 – Ângulo de cone a 10 mm do ponto de referência do injetor.....	87
Figura 55 – Ângulo de cone em função da distância do injetor; CP =0 bar. ....	88
Figura 56 – Ângulo de cone em função da distância do injetor; CP =10 bar. ....	89
Figura 58 – Penetração do spray principal em função do tempo; PI =80 bar. ...	90
Figura 59 – Penetração do spray principal em função do tempo; PI =100 bar. .	91
Figura 60 – Penetração do spray principal em função do tempo; CP =0 bar.....	92
Figura 61 – Penetração do spray principal em função do tempo; CP =10 bar...	92
Figura 62 – Pré-spray em CP =0 bar; (a) PI= 80 bar e (b) PI= 100 bar. ....	93
Figura 63 – Penetração do pré-spray em função do tempo CP =0 bar; PI= 80 bar. ....	94
Figura 64 – Penetração do pré-spray em função do tempo CP =0 bar; PI= 100	94
Figura 65 – Penetração do spray em função do tempo CP =0 bar; PI= 80 bar...	95
Figura 66 – Penetração do spray em função do tempo CP =0 bar; PI= 100 bar.	95
Figura 67 – Velocidade das gotas em função do tempo; PI=80 bar.....	97
Figura 68 – Velocidade das gotas em função do tempo; PI=100 bar.....	98
Figura 69 – Distribuição de velocidades vertical das gotas. ....	99
Figura 70 – Distribuição de velocidades horizontal das gotas. ....	100
Figura 71 – Diâmetro das gotas em função do tempo; PI=80 bar. ....	101
Figura 72 – Diâmetro das gotas em função do tempo; PI=100 bar ....	101
Figura 73 – Distribuição de diâmetros de gotas.....	102
Figura 74 – Distribuição R-R de diâmetros de gotas. ....	103
Figura 75 – Velocidade resultante das gotas em função de seus diâmetros. .	104
Figura 76 – Velocidade média resultante das gotas em função da pressão de injeção.....	105
Figura 77 – Diâmetro médio das gotas em função da pressão de injeção.....	106
Figura 78 – Diâmetro médio de Sauter das gotas em função da pressão de injeção.....	107



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 – Diâmetros médios das gotas e suas aplicações.....</b>	<b>41</b>
<b>Tabela 2 – Características do injetor Magneti Marelli (IWD3+ 193) .....</b>	<b>57</b>
<b>Tabela 3 – Propriedades dos combustíveis .....</b>	<b>58</b>
<b>Tabela 4 – Detalhes das configurações do sistema PDA .....</b>	<b>73</b>
<b>Tabela 5 – condições de teste.....</b>	<b>78</b>
<b>Tabela 6 – Condições de teste de comparação entre os injetores. ....</b>	<b>83</b>
<b>Tabela 7 – Condições de teste para as medições com o PDA. ....</b>	<b>96</b>
<b>Tabela 8 – Valores da velocidade resultante, do D10 e SMD das gotas.....</b>	<b>119</b>

## LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
CCD – *Charge Coupled Device*  
CETEC – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais  
CFD – Fluidodinâmica Computacional (*Computational Fluid Dynamics*)  
CO – Monóxido de Carbono  
CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono  
CPU – Unidade Central de Processamento (*Central Processing Unit*)  
CTM – Centro de Tecnologia da Mobilidade  
DI – Injeção Direta (*Direct Injection*)  
DISI – Injeção Direta e Ignição por Centelha (*Direct Injection Spark Ignition*)  
DR – Densidade de Resolução  
E0 – Gasolina A  
E100 – Etanol Combustível  
E22 – Gasolina Padrão Emissões  
EA – Etanol Anidro  
ECU – Unidade de Controle de Motor (*Engine Control Unit*)  
EDI – Injeção Direta de Etanol  
GDI – Injeção Direta de Gasolina  
HC – Hidrocarbonetos  
LDA – Anemometria Laser Doppler (*Laser Doppler Anemometry*)  
LED – Diodo Emissor de Luz (*Light Emitting Diode*)  
MATLAB – *Matrix Laboratory*.  
MCI – Motor de Combustão Interna  
MP – Material Particulado  
N<sub>2</sub> – Nitrogênio gasoso  
NBR – Norma Brasileira  
NO<sub>x</sub> – Óxido de nitrogênio  
Oh – Número de Ohnesorge  
PDA – *Phase Doppler Anemometry*  
PFI – Injeção Indireta (*Port Fuel Injection*)

PIV – Velocimetria por Imagem de Partículas (*Particle Image Velocimetry*)

Re – Número de Reynolds

R-R – Distribuição Rosin-Rammler

SNR – Taxa de Sinal-Ruído (*Sinal-Noise Ratio*)

SOI – Início de Injeção (*Start of Injection*)

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

We – Número de Weber

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\lambda$  – Razão entre a mistura ar-combustível real e a mistura ar-combustível estequiométrica.

$u$  – Velocidade Relativa [m/s]

$\nu$  – Viscosidade Cinemática do Fluido [cP]

$d$  – Diâmetro de Gota [ $\mu\text{m}$ ]

$\sigma$  – Tensão Superficial do Fluido [N/m]

$\rho_L$  – Massa Específica do Fluido [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\alpha$  – Ângulo Próximo ao Injetor [ $^\circ$ ]

$\beta$  – Ângulo Mais Afastado do Injetor [ $^\circ$ ]

S – Penetração do *Spray* [cm]

D – Diâmetro Representativo da Gota [ $\mu\text{m}$ ]

a e b – Índices do Diâmetro Representativo da Gota

i – A i-ésima coluna de uma matriz numérica.

J – A j-ésima coluna de uma matriz numérica.

X – Posição do Ponto de Referência

Y – Posição do Ponto de Referência



## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	20
1.1.	MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS.....	22
1.2.	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	23
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	25
2.1.	HISTÓRIA DO MOTOR DE CICLO OTTO E DA INJEÇÃO DIRETA .....	25
2.2.	SISTEMAS DE INJEÇÃO E TIPOS DE INJEÇÃO DIRETA .....	27
2.2.1.	<i>Injeção direta com carga homogênea .....</i>	28
2.2.2.	<i>Injeção direta com carga estratificada .....</i>	29
<u>2.2.2.1.</u>	<u>Wall-Guided.....</u>	<u>30</u>
<u>2.2.2.2.</u>	<u>Air-Guided .....</u>	<u>30</u>
<u>2.2.2.3.</u>	<u>Spray-Guided .....</u>	<u>31</u>
2.3.	SPRAY E ATOMIZAÇÃO .....	32
2.3.1.	<i>Processo de atomização .....</i>	33
<u>2.3.1.1.</u>	<u>Break-up primário.....</u>	<u>35</u>
<u>2.3.1.2.</u>	<u>Break-up secundário.....</u>	<u>37</u>
2.3.2.	<i>Parâmetros da atomização.....</i>	38
<u>2.3.2.1.</u>	<u>Parâmetros macroscópicos do spray.....</u>	<u>39</u>
2.3.2.1.1.	Ângulo de cone do spray .....	39
2.3.2.1.2.	Penetração do spray .....	39
<u>2.3.2.2.</u>	<u>Parâmetros microscópicos do spray.....</u>	<u>40</u>
2.3.2.2.1.	Diâmetros médios representativos das gotas .....	40
2.3.2.2.2.	Distribuição dos diâmetros das gotas .....	41
<u>2.3.2.3.</u>	<u>Propriedade dos líquidos que influenciam na atomização.....</u>	<u>42</u>
<u>2.3.2.4.</u>	<u>Injetores de injeção direta de motores de ignição por centelha .....</u>	<u>42</u>
2.4.	TÉCNICAS ÓPTICAS APLICADAS NA CARACTERIZAÇÃO DO SPRAY .....	47
2.4.1.	<i>Filmagem em alta velocidade .....</i>	47
2.4.2.	<i>Shadowgraphy.....</i>	48
2.4.3.	<i>Princípios básicos de medição do LDA (laser Doppler Anemometry) e PDA (Phase Doppler Anemometry).....</i>	49

<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>56</b>
<b>3.1.</b>	<b>OS INJETORES.....</b>	<b>56</b>
3.1.1.	<i>Injetor high-pressure swirl.....</i>	<i>56</i>
3.1.2.	<i>Injetor multi-hole.....</i>	<i>57</i>
<b>3.2.</b>	<b>FLUIDOS DE TESTE.....</b>	<b>58</b>
<b>3.3.</b>	<b>SISTEMA DE INJEÇÃO DI.....</b>	<b>59</b>
<b>3.4.</b>	<b>VISUALIZAÇÃO DO SPRAY.....</b>	<b>61</b>
<b>3.5.</b>	<b>TRATAMENTO DAS IMAGENS.....</b>	<b>62</b>
3.5.1.	<i>Ângulo de cone.....</i>	<i>65</i>
3.5.2.	<i>Penetração do spray.....</i>	<i>68</i>
<b>3.6.</b>	<b>PDA CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>70</b>
3.6.1.	<i>Sistema PDA.....</i>	<i>73</i>
<b><u>3.6.1.1.</u></b>	<b><u>Laser.....</u></b>	<b><u>73</u></b>
<b><u>3.6.1.2.</u></b>	<b><u>Transmissor.....</u></b>	<b><u>74</u></b>
<b><u>3.6.1.3.</u></b>	<b><u>Analizador Burst Spectrum (BSA).....</u></b>	<b><u>75</u></b>
<b><u>3.6.1.4.</u></b>	<b><u>Programa de aquisição de dados.....</u></b>	<b><u>76</u></b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>77</b>
<b>4.1.</b>	<b>VISUALIZAÇÃO DO SPRAY.....</b>	<b>77</b>
4.1.1.	<i>Comparação dos injetores high-pressure swirl e multi-hole.....</i>	<i>83</i>
<b>4.2.</b>	<b>ÂNGULO DE CONE DO SPRAY.....</b>	<b>85</b>
<b>4.3.</b>	<b>PENETRAÇÃO DO SPRAY.....</b>	<b>90</b>
<b>4.4.</b>	<b>MEDIÇÕES COM O PDA.....</b>	<b>96</b>
4.4.1.	<i>Velocidade e distribuição de velocidades das gotas.....</i>	<i>96</i>
4.4.2.	<i>Díâmetro e distribuição de diâmetro das gotas.....</i>	<i>100</i>
4.4.3.	<i>Velocidade média resultante em função da pressão de injeção.....</i>	<i>105</i>
4.4.4.	<i>Díâmetros médios representativos em função da pressão de injeção... </i>	<i>106</i>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>108</b>
<b>5.1.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>108</b>
<b>5.2.</b>	<b>SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>110</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>112</b>

<b>7.</b>	<b>APÊNDICE .....</b>	<b>118</b>
<b>7.1.</b>	<b>ERROS ALEATÓRIOS ASSOCIADOS AOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>118</b>
<b>7.2.</b>	<b>ANÁLISE DE INCERTEZA DAS MEDIÇÕES COM O PDA. ....</b>	<b>119</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a crise energética e a poluição ambiental levam a uma demanda crescente por motores de combustão interna mais eficientes e limpos. A tendência à diminuição do tamanho dos motores, seguindo a técnica de Downsizing<sup>1</sup> e a utilização de combustíveis alternativos nos motores de ignição por centelha são de interesse atual e inúmeras tentativas têm sido feitas por pesquisadores, pelas montadoras e pelo governo federal – através de leis de incentivos como o Inovar-auto – (Galloni E; Fontana G; Palmaccio R, 2013). Recentemente, os motores produzidos pela técnica *Downsizing* podem alcançar maior eficiência térmica e menores níveis de emissões de poluentes (Leduc P e outros, 2003). A tecnologia de injeção direta de combustível, através de uma maior precisão da quantidade de combustível injetado, permite o alcance de maiores razões volumétricas de compressão, múltiplas injeções, estratificação da carga e isso é um potencial significativo na economia de combustível, e é amplamente utilizada nos motores que seguem a técnica *Downsizing*.

A injeção direta de combustíveis é essencial para a otimização do rendimento do motor. Diferentemente da injeção indireta, ela é feita dentro dos cilindros, e não no pósito de admissão antes das respectivas válvulas. Um maior controle da formação da mistura ar/combustível dentro das câmaras de combustão é viável pela injeção direta, por meio da precisão da quantidade injetada, direção e forma do jato na saída do injetor. Essa forma é caracterizada pelo ângulo de cone e penetração do jato de combustível injetado (Zhao; Lai; Harrington, 1997) e (Arcoumanis C, Schindler KP, 1997).

O *spray* possui formato aproximadamente cônico e o ângulo de cone é delimitado pelo limite exterior do cone de combustível atomizado, formado a partir do orifício de saída do injetor até algum local sobre o eixo de atomização. De acordo com Bae (2002) essa localização pode ser definida de várias maneiras dependendo da estrutura macroscópica do cone a ser analisado. Outras variáveis que influenciam o ângulo de cone de atomização são o comprimento e diâmetro do orifício do injetor, tensão superficial e viscosidade do combustível, conforme relatam vários autores, tais como Laonual (2001), Chaves (1995) e Schmidt (1999).

---

<sup>1</sup> Redução do volume deslocado associado à tecnologias para manter ou melhorar o desempenho e emissões dos MCI.

Lefebvre (1989) mostra que o ângulo de cone está relacionado com a capacidade de penetração do *spray* no ambiente da câmara de combustão, sendo que ângulos de cone menores permitem uma maior penetração. As gotas na ponta do *spray* são continuamente substituídas por novas, o que faz com que a penetração aumente e gotículas com baixa energia cinética formem a região de atomização externa do cone, nas quais o combustível se encontra vaporizado, promovendo o processo de formação da mistura.

Em geral, a formação da mistura é afetada pelas características do *spray* e pela a estrutura do escoamento dentro do cilindro (tumble, swirl e squish), juntamente com a distribuição espacial do combustível, Khalid et al (2009) e Stan et al (2002). A diminuição do tamanho da gota de combustível, associada a uma dinâmica de *spray* bem construída é conhecida por ter efeitos positivos na melhoria do processo de mistura através de uma melhor atomização e evaporação Honda T et al (2004). É necessário um bom entendimento da estrutura (interna e externa) do *spray* e de seu processo de atomização para a otimização da formação de mistura nos motores de injeção direta de gasolina (GDI). Por outro lado, o etanol é um combustível alternativo amplamente utilizado quando se deseja considerar questão da sustentabilidade. Motores de injeção direta de etanol (EDI) tem atraído atenção devido ao seu grande potencial em extrair as vantagens que o etanol combustível possui.

Dessa maneira, é importante uma melhor compreensão das características de atomização do etanol e da gasolina para avaliar o desempenho destes combustíveis em relação a variações nas pressões de injeção e ambiente Huang et al (2013). Para avaliar algumas características, macroscópicas e microscópicas, da atomização do combustível são utilizados muitos procedimentos de medições, com uma variedade de técnicas, incluindo ópticas, elétricas e mecânicas. As técnicas ópticas são mais comuns, porque não são intrusivas, este é o caso de métodos como: filmagens em alta velocidade, *Shadowgraphy*, PIV (Velocimetria por imagens de partículas), LDA (*Laser Doppler Anemometry*) e PDA (*Phase Doppler Anemometry*).

As características geométricas ou macroscópicas da atomização podem ser estudadas com técnicas experimentais baseadas na análise direta de fotogramas, obtidas através de fotografia ou filmagem de alta velocidade. A qualidade dos resultados obtidos dessa maneira é dependente do método de análise utilizado.

Já os outros métodos ópticos, fornecem informações de microscópicas, como o diâmetro, velocidade e campos de velocidades do *spray* em análise.

Assim, neste trabalho, foi investigada a estrutura externa e interna do *spray* obtido a partir de um injetor de injeção direta, *high-pressure swirl*, usando sete diferentes fluidos de teste. Foram avaliados ainda o ângulo de cone, a penetração do *spray*, o diâmetro e velocidade de gotas, sob pressão de injeção até 120 bar e contrapressão ambiente de até 10bar. O objetivo principal foi analisar a influência da pressão de injeção e contrapressão ambiente sobre tais variáveis e comparar o comportamento dos fluidos de teste.

### **1.1. Motivação e objetivos**

Investigar o fenômeno da atomização em injetores de injeção direta de combustível utilizado em motores de combustão interna e ignição por centelha, avaliando os parâmetros envolvidos no processo, permite buscar correlações entre estes parâmetros e condições previamente estabelecidas.

Para o presente trabalho, as condições previamente estabelecidas que se almeja estudar são a influência da pressão de injeção, da contrapressão ambiente e do combustível utilizado nos parâmetros de atomização. Para tanto, as pressões e contrapressões foram variadas para os fluidos de trabalho: água, etanol anidro (EA), etanol combustível (E100), gasolina (E0), gasolina (E22), Exxsol D40 e Exxsol D60 e para cada valor estabelecido de pressão e contrapressão, um conjunto de parâmetros de atomização foi avaliado.

Os parâmetros a serem avaliados são: aspectos macroscópicos do *spray* como ângulo de cone e penetração do *spray*. Aspectos microscópicos do *spray* como diâmetros representativos das gotas (com ênfase no diâmetro médio e diâmetro médio de Sauter), velocidade das gotas, distribuição do diâmetro de gotas e velocidade em um ponto específico a partir do orifício de descarga do injetor.

Conhecendo-se a relação entre os parâmetros de atomização, os aspectos geométricos do injetor e diferentes condições de ensaio, é possível modificar características físicas do injetor, prever e otimizar seu funcionamento.

Portanto, o presente trabalho tem como objetivo principal analisar a influência das pressões de injeção, contrapressões ambiente e dos tipos de combustíveis no comportamento das características macroscópicas e microscópicas do *spray* do

injetor de injeção direta, *High-pressure swirl*. Para isto, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma investigação experimental sobre o processo de atomização de líquidos em um injetor de injeção direta, *High-pressure swirl*, de motores de combustão interna e ignição por centelha de injeção direta;
- Caracterizar experimentalmente os aspectos macroscópicos denominados de ângulo de cone, penetração do *spray* de sete diferentes fluidos de testes, duas pressões de injeção e duas contrapressões ambiente.
- Medir as características microscópicas denominadas diâmetros, diâmetros médios representativos e velocidade das gotas do *spray* de Exxsol D40 para duas pressões de injeção diferentes e em contrapressão ambiente atmosférica.
- A partir dos dados experimentais, determinar as distribuições dos diâmetros e velocidades das gotas do *spray* Exxsol D40 para um ponto de medição e duas pressões de injeção diferentes;
- Comparar as características macroscópicas da atomização do injetor *High-pressure swirl* com o injetor *Multi-Hole* a título de morfologia e diferenciação do tipo de injetor de injeção direta para o Exxsol D40, em uma pressão de injeção e duas contrapressões ambiente.

Tais objetivos se justificam porque um melhor entendimento do processo de atomização para diferentes combustíveis e condições de operação constituem uma importante ferramenta para melhoramento dos injetores e, indiretamente, a melhoria do desempenho global do motor, tanto em consumo de combustível como em emissões de poluentes.

## **1.2. Organização da dissertação**

A dissertação está dividida em seis capítulos, descritos a seguir.

No Capítulo 1 é apresentada a introdução, descrevendo as principais considerações e contextualizando o leitor sobre o assunto. Em seguida, são os objetivos do trabalho, bem como as motivações que levaram a escrevê-lo.

No Capítulo 2 uma revisão da literatura é realizada, com intuito de melhor desenvolver o assunto e suas implicações, assim como apresentar o conceito da tecnologia de atomização e os tipos de injetores utilizados na injeção direta. Ainda

neste capítulo, considerações de propriedades que influenciam o processo de atomização são ressaltadas e técnicas ópticas de medição de características do *spray*, a fim de se adquirir embasamento para justificar a execução deste trabalho.

O Capítulo 3, nomeado de Materiais e Métodos, tem por finalidade apresentar o aparato experimental, os equipamentos envolvidos, o procedimento experimental e as técnicas de medição utilizadas na aquisição dos dados que são posteriormente analisados.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados das características macroscópicas e microscópicas do *spray* obtidas por meio dos diferentes aparatos experimentais.

No Capítulo 5 é apresentada uma conclusão sobre o que foi realizado durante o trabalho, em que os principais resultados são destacados e são destacadas sugestões para trabalhos futuros.



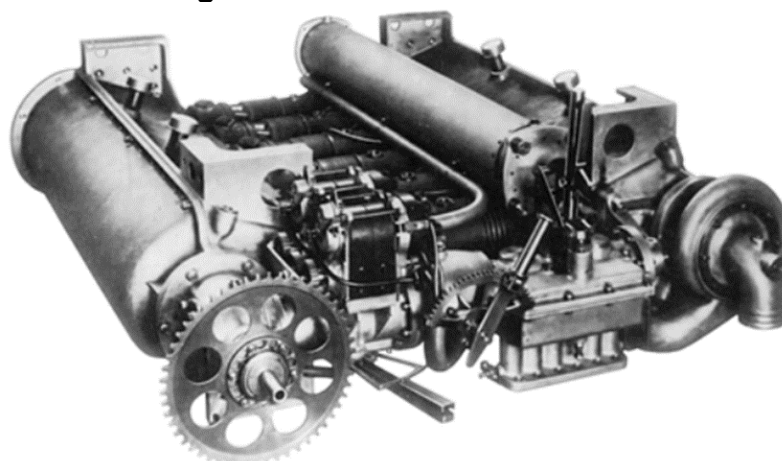
## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é realizada uma breve revisão da literatura, apresentando os detalhes principais da atomização e da injeção direta de combustível, descrevendo as características macroscópicas e microscópicas do spray, inclusive dos parâmetros que afetam essas características e por último é mostrado os fundamentos das técnicas ópticas de medição.

### 2.1. História do motor de ciclo Otto e da injeção direta

A primeira descrição de um motor alternativo de quatro tempos encontrada é de 1862 por Beau de Rochas, Meinig, U. (2008). Em 1867, Nikolaus August Otto solicitou a primeira patente de um motor de quatro tempos a gás, que ele apresentou anos mais tarde em 1876 no "Gasmotoren-Fabrik Deutz" em Deutz, Alemanha e o patenteou em 1877, (Bosch, 2015) apud (Otto, N. A, 1877). Em 1877 Otto também patenteou a ideia de trazer o combustível diretamente para dentro do cilindro, (Meinig, 2008), ou seja, um dos primeiros conceitos de injeção direta de combustível em MCIs. Já em 1886, Gottlieb Daimler, Carl Benz e Wilhelm Maybach desenvolveram um dos primeiros motores a gasolina e o utilizaram na primeira aplicação automotiva conhecida. A primeira aplicação prática de um motor Otto com injeção direta de gasolina (Injeção Direta Ignição por Centelha, DISI) foi feita por Junkers em 1914, (Meinig, 2008) e os primeiros motores em série equipados com injeção direta de gasolina foram os motores Junkers Fo.2 (Figura 1) nas lanchas da marinha alemã em 1917.

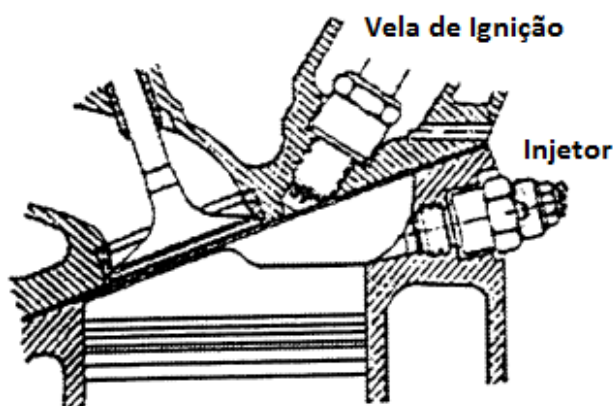
**Figura 1 – Motor Junkers FO.2**



Fonte: Junkers 2017.

Em 1934 a Daimler-Benz começou com o desenvolvimento do motor DB 600, em cooperação com a Orange e, posteriormente, com a Bosch, foram desenvolvidos os primeiros injetores *multi-hole*. Em 1954 a Daimler-Benz apresentou o carro esportivo 300 SL com um DISI (Figura 2) em série de produção. Depois de várias aplicações bem-sucedidas em carros de corrida (Bosch, 2015 apud Scherenberg, 1955 e Hütten 1994). Durante os anos 1960 e 1970 a pesquisa em injeção direta foi quase completamente abandonada, isso se deve principalmente aos baixos preços dos combustíveis e ao desenvolvimento de um sistema de injeção de menor custo, que foi a injeção no coletor de admissão (PFI). Em relação à combustão com carga estratificada os motores DISI tiveram de volta a aplicação automotiva no ano de 1995. Primeiro as montadoras japonesas (Mitsubishi e Toyota) e depois as europeias e norte-americanas (Audi, VW, GM) introduziram seus motores Otto de quatro tempos com injeção direta de gasolina. No início, a injeção direta com a carga estratificada foi aplicada, mas devido a seus benefícios limitados na economia de combustível, o elevado custo de tratamento de gases de escape (emissão de NOx) como resultado de regimes de operação pobres do motor e de índices mais altos de emissões de material particulado (MP), a aplicação da injeção direta com carga estratificada não pôde ser estabelecida. Assim, ultimamente, quase todos os fabricantes empregam MCIs e ignição por centelha equipados com injeção direta de combustível com carga homogênea e estequiométrica ( $\lambda = 1$ ), Spicher U et al (2008).

**Figura 2 – Sistema de combustão GDI Daimler-Benz 300 SL**



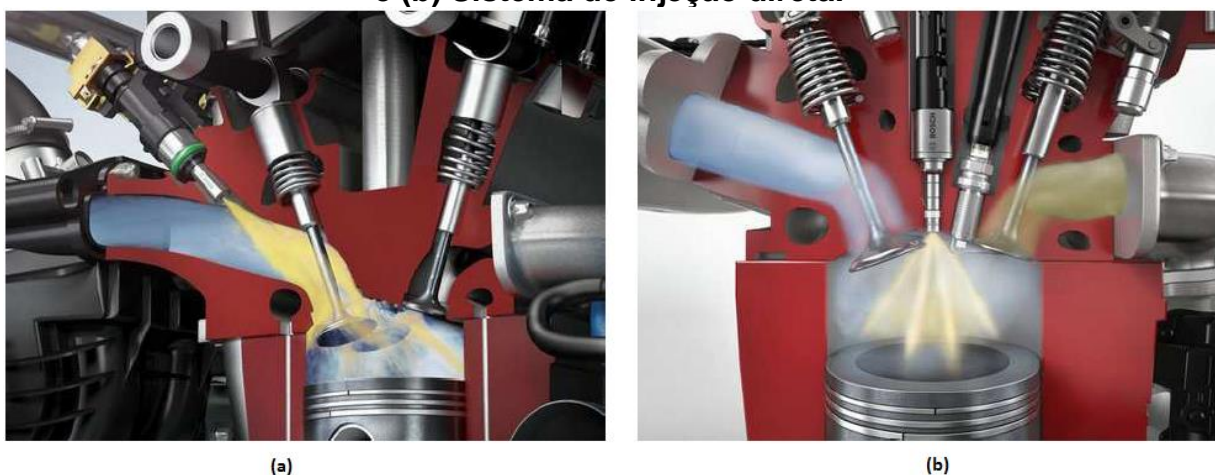
Fonte: Bosch. (2015) apud Scherenberg, H. (1955)

## 2.2. Sistemas de injeção e tipos de injeção direta

O atual cenário automotivo brasileiro, emprega em seus motores de combustão interna e ignição por centelha, dois tipos de sistemas de injeção de combustível: injeção indireta e injeção direta.

A injeção indireta de combustível ou *port fuel injection* (PFI) Figura 3a, como é conhecido este tipo de injeção, de motores de ignição por centelha difere da injeção direta, GDI (*Gasoline Direct Injection*) Figura 3b, destes mesmos motores, especialmente pelas pressões de injeção de combustível. Sistemas PFI comumente operam com pressões de 3 a 6 bar enquanto sistemas GDI utilizam pressões na ordem de 100 bar (SOUZA, 2009).

**Figura 3 – Sistemas de injeção de combustível: (a) Sistema de injeção indireta e (b) Sistema de injeção direta.**



Fonte: Bosch (2016).

No caso da injeção direta de combustível, o processo de combustão se define pela maneira com que a formação da mistura e a conversão de energia ocorrem dentro da câmara de combustão. Os mecanismos que influenciam nessa formação de mistura são determinados pela geometria da câmara de combustão, do coletor de admissão, pelo início da injeção (SOI) e pelo momento da ignição.

A relação entre o combustível injetado e o escoamento de ar é extremamente importante, sobretudo em relação aos processos de combustão que trabalham com estratificação de carga. De modo a obter a estratificação desejada, o combustível é injetado no escoamento de ar de tal modo que o mesmo evapora numa determinada

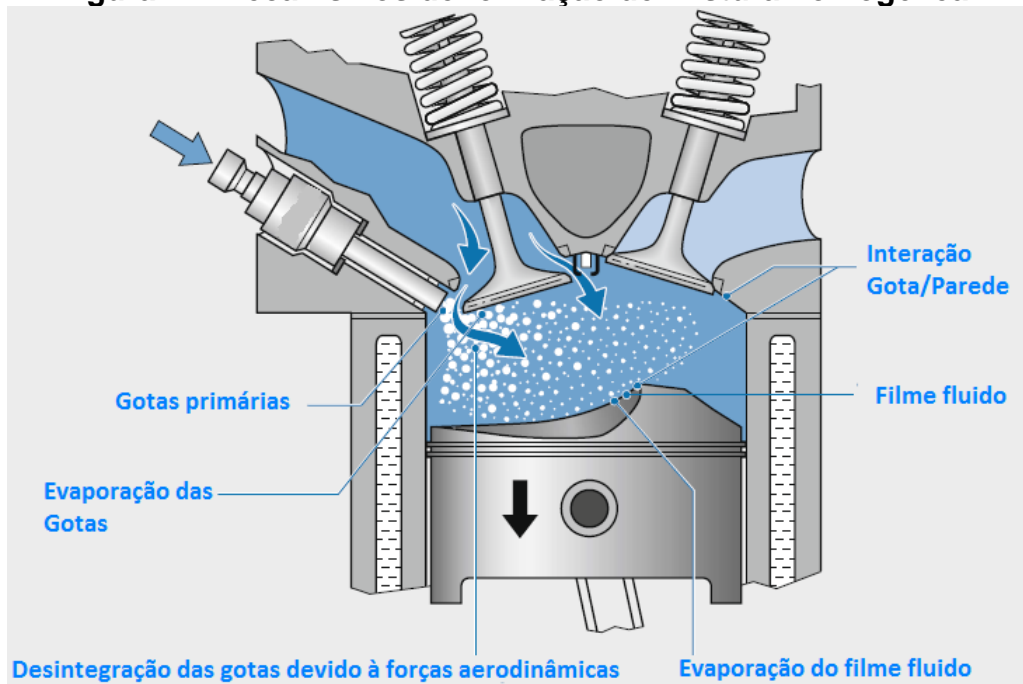
área, assim o escoamento de ar transporta a nuvem de mistura na direção da vela de ignição de modo que ela a alcance no momento da ignição.

Um processo de combustão é muitas vezes composto de vários modos de operação diferentes, entre os quais muda em função do ponto de operação do motor. Basicamente, os processos de combustão para injeção direta são divididos em duas categorias: carga homogênea e estratificada, Duclos, J et al (1998).

### **2.2.1. Injeção direta com carga homogênea**

Para o motor operar com mistura homogênea, o combustível deve ser injetado, de modo que haja tempo suficiente para a formação da mistura e é por isso que o combustível é injetado durante o tempo de admissão (MAHLE, 2010). O ar de admitido durante esse tempo, ajuda o combustível a evaporar rapidamente e garante que a mistura ar-combustível global seja bem homogeneizada no interior do cilindro. A preparação da mistura é assistida sobretudo por altas velocidades de escoamento e forças aerodinâmicas na área de abertura e fechamento das válvulas de admissão (área de cortina), Figura 4. Além disso, o combustível injetado gera o efeito de arrefecimento na carga do cilindro devido à sua vaporização, aumentando a eficiência volumétrica devido à maior densidade da carga e melhorando a resistência à detonação (*knock*), G. Wigley et al (2005). As melhorias na resistência ao *Knock* permitem a aplicação de uma razão volumétrica de compressão mais elevada o que conseqüentemente leva a um maior desempenho do motor. Alternativamente, a razão volumétrica de compressão pode ser mantida quase constante mesmo com sobrealimentação do motor, isso permite reduzir o tamanho do motor enquanto mantém a potência de saída (*downsizing*) (Basshuysen, 2008).

**Figura 4 – Mecanismos de formação de mistura homogênea.**



Fonte: adaptado de Bosch (2015)

### **2.2.2. Injeção direta com carga estratificada**

Na operação do motor de injeção direta com carga estratificada, foram concebidas três formas de injeção para formação da mistura perto da vela de ignição no instante da ignição, são elas: *wall-guided*, *air-guided* e *spray guided* Figura 5. A distinção entre os diferentes conceitos é o método utilizado com o qual o *spray* de combustível é transportado para região da vela de ignição (MAHLE, 2010).

**Figura 5 – Diferentes configurações na injeção direta**



Fonte: Leonhard R. Bosch (2017)

### **2.2.2.1. Wall-Guided**

O sistema de injeção *Wall-Guided* é baseado principalmente na interação entre o *spray* de combustível e uma superfície especialmente moldada na cabeça do pistão. A vela de ignição é colocada no centro câmara de combustão enquanto o injetor está localizado ao lado e o combustível é transportado para a direção da vela de ignição por meio da superfície do pistão. Esta configuração induz um aumento nas emissões de HC e CO não queimados, já que o combustível é injetado na superfície do pistão e não evapora completamente, (Kashdan, et al, 2007). A formação da mistura é influenciada pelo *swirl* (movimento de rotação da carga em torno do eixo do cilindro) e pelo *tumble* (movimento de rotação no plano paralelo ao eixo do cilindro) (Kubach, 2001). Algumas questões relacionadas ao sistema *Wall-Guided* GDI são devidas às dificuldades na sincronização de injeção com ângulo de avanço de ignição em uma ampla faixa operacional do motor. Além disso, o toque do *spray* na superfície do pistão induz a formação de filmes de combustível líquidos nas paredes do cilindro e na superfície do pistão, que causam o aumento na emissão de HC e MP no escapamento.

### **2.2.2.2. Air-Guided**

O sistema de injeção *Air-Guided* aproveita o escoamento dentro do cilindro para se obter a mistura de ar e combustível (Ortmann, et al 2001). O injetor é montado na lateral da câmara de combustão do motor. O movimento de ar no cilindro é usado para misturar ar e combustível, levando o *spray* para a vela de ignição. Idealmente, o escoamento de ar impede que o toque do combustível na coroa do pistão aconteça, com isso reduz-se a emissão de hidrocarbonetos não queimados, quando comparado com a configuração *Wall-Guided*. Formas especiais do pórtico de admissão e da superfície do pistão são projetadas para induzir o escoamento de ar dentro do cilindro e favorecendo o movimento da mistura em direção à vela no momento da ignição (Preussner, C et al. 1998), Fu, L et al. 2009). No entanto, a geometria da câmara de combustão aumenta a tendência à detonação, impondo uma diminuição da razão volumétrica de compressão.

### 2.2.2.3. Spray-Guided

A opinião de especialistas sugere que o método *Spray-Guided* é a única técnica que pode explorar todo o potencial da combustão com carga estratificada (Esmail et al 2010, Karlsson e Heywood. (2001), Li et al 2001 e Montanaro, Malaguti e Alfuso 2012). O injetor está localizado no centro da câmara de combustão, enquanto a vela de ignição é colocada lateralmente, próximo da saída do bico injetor, conforme mostra a Figura 6.

**Figura 6 – Configuração de injeção direta *Spray-Guided*.**



Fonte: Adaptado de Bosch (2016).

O *spray* é transportado para a vela de ignição e não é necessária uma geometria especial da câmara de combustão ou do pistão para essa configuração.

Os motores de injeção direta *Spray-Guided* apresentam algumas vantagens específicas em relação aos motores de injeção direta *Wall-Guided* e *Air-Guided*, que são:

- Redução do molhamento de parede e conseqüentemente das emissões de HC;
- Menor sensibilidade a variações cíclicas do escoamento de ar;

- Menor sensibilidade à variação cilindro-cilindro;
- Maior economia de combustível.

Contudo, existem também algumas desvantagens, especialmente no que se refere à reprodutibilidade do perfil do *spray* para todos os pontos de operação. Um pequeno deslocamento da forma do *spray* pode causar falhas de combustão (*Misfire*) ou depósitos de combustível líquido na vela de ignição. Como consequência, o sistema de ignição sofre um choque térmico e HC não queimado e fuligem podem ser produzidos e ainda, as características do *spray* de combustível (forma, penetração, ângulo do cone) são influenciadas por mudanças na pressão no cilindro, causando problemas relacionados à estabilidade da ignição em diferentes pontos de carga Baumgarten, C. (2006).

### 2.3. *Spray* e Atomização

O *spray* é uma nuvem de gotículas líquidas dispersas, produzidas mecanicamente, com quantidade de movimento suficiente para penetrar no meio gasoso. *Sprays* são utilizados em uma ampla gama de aplicações, tais como, agricultura, medicina, campo industrial etc.

A atomização e a evaporação do *spray* desempenham um papel importante no processo de formação da mistura ar-combustível e, portanto, no desenvolvimento da combustão, especialmente para motores de ignição por centelha de injeção direta (DISI). De fato, é possível melhorar a eficiência da combustão otimizando a formação da mistura, o que resulta numa redução do consumo de combustível e das emissões de poluentes. Conforme (Cameretti e Tuccillo, 2007) o desenvolvimento do *spray* de combustível é influenciado por vários fenômenos, devido à interação entre o combustível injetado a atmosfera circundante. Os principais fatores que afetam o comportamento do *spray* são:

- As condições dinâmicas do fluido de injeção, principalmente os níveis de turbulência e cavitação do fluido, bem como a distribuição de tamanho das gotas injetadas;
- Primeira e segunda quebra do jato de líquido (*break-up*);
- Colisão e coalescência entre as gotas.



### **2.3.1. Processo de atomização**

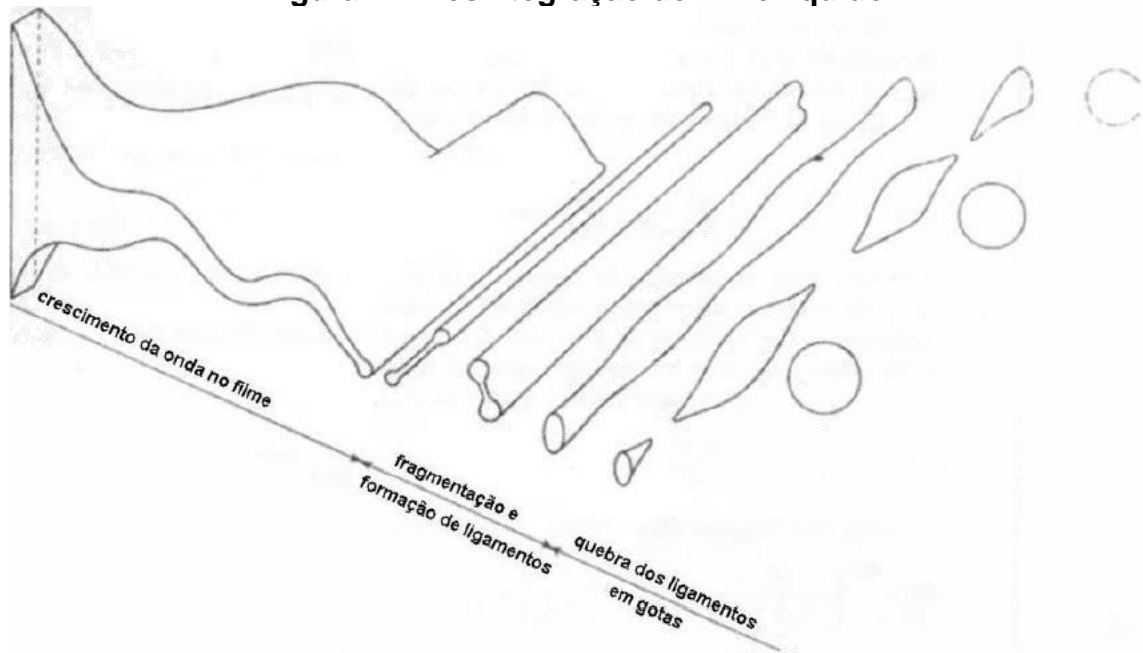
O processo de atomização, ou quebra (*Break-up*), é o fenômeno que ocorre quando um jato ou uma folha de líquido é separado em pequenas gotas. Esse processo é governado por interações entre forças viscosas e de tensão superficial do líquido e de forças aerodinâmicas provenientes do meio gasoso circundante (Cameretti e Tuccillo, 2007).

O *Break-up* ocorre quando a magnitude das forças aerodinâmicas excede as forças de tensão superficial (Lefebvre, 1989).

O fenômeno de desintegração do jato líquido vem sendo estudado, de forma teórica e experimental, há mais de um século.

Rayleigh estudou a dinâmica de atomização, sem considerar o efeito da viscosidade do jato, densidade do ar circundante e força de gravidade. Uma teoria mais geral foi desenvolvida por Weber que em sua análise levou em consideração os efeitos da viscosidade do líquido e da densidade do gás. Ele supôs que um efeito estabilizador da viscosidade do jato e densidade da atmosfera leva à redução da área de *break-up* e ao aumento do tamanho das gotas. A teoria mais aceita considera o efeito conjunto de forças coesivas sobre as oscilações da superfície do jato em sua borda, tais perturbações, amplificadas pelas forças aerodinâmicas, influenciam no processo de atomização, Fraser et al, 1962. O jato se desintegra em ligamentos líquidos e gotas quando o comprimento de onda da perturbação inicial é maior do que um valor crítico. Este processo é chamado atomização primária (*break-up* primário), a Figura 7 mostra esse fenômeno.

**Figura 7 – Desintegração de filme líquido.**



Fonte: Adaptado de Baumgarten (2006).

As gotas formadas após o *break-up* primário são alvo da ação combinada da inércia, viscosidade, tensão superficial e forças aerodinâmicas as quais, causam distribuição de pressão não uniforme na superfície das gotas, induzindo a deformação e quebra dessas gotas em outras pequenas gotas (atomização secundária).

Números dimensionais, que caracterizam a atomização, são obtidos em função das forças que dominam o processo físico. São eles o número de Reynolds e o número de Weber, definidos conforme mostram as Equações (1) e (2):

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu} \quad (1)$$

$$We = \frac{\rho_l \cdot u^2 \cdot d}{\sigma} \quad (2)$$

Onde  $u$  é a velocidade relativa,  $\nu$  é viscosidade cinemática,  $d$  é o diâmetro,  $\rho_l$  e  $\sigma$  são a massa específica e tensão superficial da gota, respectivamente. O número de Weber representa a relação das forças aerodinâmicas (pressão dinâmica) e de tensão superficial e é frequentemente usado para classificar os processos da atomização secundária. O número de Reynolds relaciona as forças inerciais com as

viscosas e O número adimensional de Ohnesorge (3) é obtido combinando números de Reynolds e Weber (Baumgarten, 2006):

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} \quad (3)$$

Ele relaciona as forças viscosas com as de tensão superficial. Em geral, os três grupos adimensionais são usados em conjunto para prever o regime de formação de gotas.

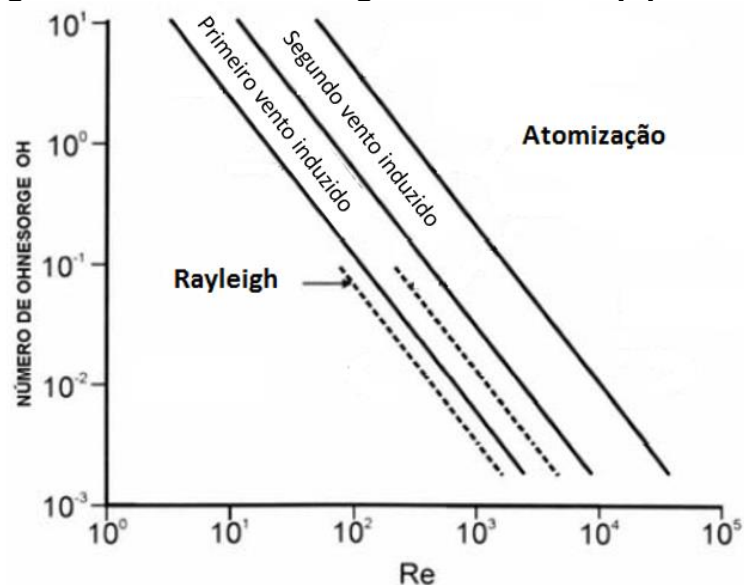
### 2.3.1.1. Break-up primário

De acordo com Reitz, (1978), dependendo das causas que geram o *break-up* primário, podem ser distinguidos por diferentes regimes de atomização: *break-up* induzido por aerodinâmica, *break-up* induzido por turbulência e *break-up* induzido por cavitação.

Estes três fenômenos estão geralmente presentes ao mesmo tempo, com diferentes intensidades dependendo da configuração do injetor, condições de operação e estrutura do *spray*.

Na quebra primária é possível individualizar quatro regimes, dependendo de diferentes combinações de forças inerciais no jato de líquido, tensão superficial, forças viscosas e aerodinâmicas, como pode ser visto nas Figura 8 e Figura 9.

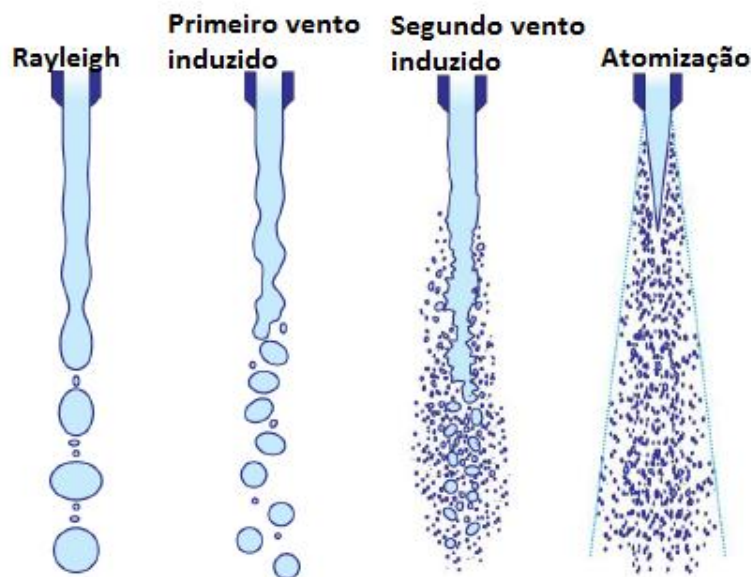
**Figura 8 – Limites dos regimes de *break-up* primário**



Fonte: Adaptado de Baumgarten, (2006).

- 1) Regime de *break-up* Rayleigh: Em baixos valores de Reynolds, a velocidade do jato de líquido é baixa e as forças aerodinâmicas são desprezíveis. A atomização é causada pelo crescimento de oscilações simétrica e axiais na superfície. A quebra ocorre quando o comprimento de onda de perturbação é maior do que o diâmetro do jato líquido. O diâmetro da gota é maior do que o diâmetro do jato na saída do injetor. As forças de tensão superficial são fracas, o *break-up* é lento e ocorre distante do injetor.
- 2) Regime de primeiro vento induzido: A velocidade relativa entre o jato, o gás circundante e a tensão superficial aumentam, acelerando o processo de atomização. O diâmetro da gota é aproximadamente o mesmo diâmetro do jato na saída do injetor.
- 3) Regime de segundo vento induzido: Aumentando o número de Reynolds e o número de Weber, o crescimento de oscilação de comprimento de onda pequeno na superfície torna-se instável. O diâmetro da gota é menor do que o diâmetro do jato na saída do injetor.
- 4) Regime de Atomização: O *break-up* ocorre a jusante do injetor e envolve a desintegração completa do jato. As gotas são formadas aleatoriamente e com diâmetros muito menores do que o diâmetro do jato.

**Figura 9 – Ilustração dos regimes de *break-up***



Fonte: Adaptado de Baumgarten, (2006).

### 2.3.1.2. Break-up secundário

O *break-up* secundário é um fenômeno mais complexo, se comparado com o *break-up* primário e ele depende do equilíbrio entre forças de tensão superficial, inerciais e viscosas. A partir de investigações experimentais sabe-se que, dependendo do número de Weber, existem diferentes modos de *break-up* de gotículas. Uma descrição detalhada é dada em Hwang et al (1996) e Krzeczkowski (1980), por exemplo. A Figura 10 resume os mecanismos relevantes do *break-up* das gotas.

Figura 10 – Regime de *break-up* secundário de gotas



Fonte: Adaptado de Baumgarten, (2006).

Assim, é possível individualizar quatro modos básicos de atomização em função do número de Weber, que são:

- 1) Regime vibracional ( $12 < We < 16$ ): Sob a ação da pressão aerodinâmica, a gota distorce da sua forma esférica e torna-se em forma de disco. O filme externo se desintegra em uma multiplicidade de pequenas gotas, enquanto o núcleo líquido quebra em gotas maiores.
- 2) Ruptura tipo bolsa ( $16 < We < 45$ ): Esse fenômeno ocorre para valores de velocidade do ar relativamente baixos. A gota torna-se achatada e apresenta uma superfície côncava perto de seu polo. Sob a ação da pressão aerodinâmica, pequenos orifícios aparecem na folha da bolsa e formam-se filamentos entre estas aberturas. Após o *break-up*, os filamentos produzem

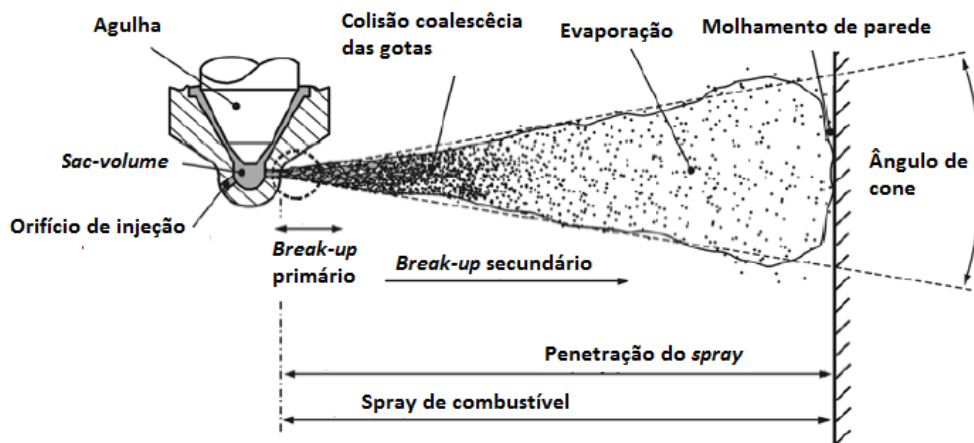
gotas finas, enquanto a bolsa se desintegra em gotas maiores em um curto espaço de tempo.

- 3) Regime tipo folhas e filetes ( $100 < We < 1000$ ): As gotas deformam-se na direção oposta e apresentam uma superfície convexa na direção do escoamento de ar. As bordas das gotas se dividem em finos filamentos que, mais tarde, se dividem em gotas ainda menores.
- 4) Regime catastrófico ( $We > 1000$ ): Quando o número de Weber aumenta, ocorre este regime de *break-up*. Com alta velocidade relativa, as forças geradas pela tensão superficial desempenham um papel dominante no processo de deformação e desintegração de gotas. Estas forças levam a formação de ondas instáveis na superfície das gotas e estas ondas de superfície, devido ao seu crescimento instável, rasgam as gotas achatadas em fragmentos, que posteriormente, sofrem desagregação adicional (Liu, Z; Reitz, R. D. 1997).

### 2.3.2. Parâmetros da atomização

Ao *spray* de combustível formado atribuem-se alguns parâmetros que tem a finalidade de caracterizar a atomização, em âmbito macro e micro estrutural. Na Figura 11, pode ser observado que as características macroscópicas estão relacionadas com o comprimento de penetração do jato e com o ângulo do cone do *spray*, enquanto que as microscópicas envolvem os fenômenos que ocorrem no *break-up* primário e secundário, evaporação e formação da mistura.

Figura 11 – Diagrama esquemático do *spray* de injetores de combustível.



Fonte: Adaptado de Baumgarten, (2006).

### **2.3.2.1. Parâmetros macroscópicos do *spray***

#### **2.3.2.1.1. Ângulo de cone do *spray***

O ângulo do cone do *spray* é a variável que mede a abertura do jato atomizado e é formado pelo limite exterior do cone desenvolvido, tomada do orifício de saída do injetor, até uma determinada posição no eixo de atomização. (Gomes et al, 2012). De acordo com Bae (2002), esta posição pode ser definida de várias maneiras, dependendo da estrutura macroscópica do cone em estudo o que pode ser observado, também, na Figura 11. No âmbito de bicos injetores de combustível do setor automotivo o atomizador pode conter um ou mais orifícios de saída, fazendo com que o *spray* seja mono-furo (*single-hole*) e multi- orifício (*multi-hole*).

#### **2.3.2.1.2. Penetração do *spray***

A penetração do *spray* é definida como a distância máxima que o mesmo atinge quando injetado em uma atmosfera estagnada (Lefebvre, 1989). É governada pelas intensidades relativas de duas forças opostas: energia cinética inicial do jato de líquido e resistência aerodinâmica da atmosfera. A velocidade inicial do jato é normalmente elevada, mas à medida que a atomização prossegue e a área superficial do *spray* aumenta, a energia cinética líquida é gradualmente dissipada por perdas por atrito com o gás e quando a energia cinética das gotas termina, sua trajetória é principalmente devida à gravidade e ao movimento desse gás circundante.

A penetração do *spray* desempenha um papel fundamental no desempenho dos motores DI. Comprimento de penetração muito grande leva ao choque do combustível com as paredes do cilindro, câmara de combustão e pistão, por outro lado, se o comprimento de penetração for inadequado, a mistura ar-combustível se torna incompleta, prejudicando o funcionamento do motor. Em termos de penetração do *spray*, um bom desempenho do motor é obtido quando essa penetração está bem adaptada ao tamanho e à geometria da câmara de combustão, (Lefebvre, 1989).

### **2.3.2.2. Parâmetros microscópicos do spray**

#### 2.3.2.2.1. Diâmetros médios representativos das gotas

Em um *spray* as gotas formadas pelo processo de atomização nunca possuem o mesmo tamanho, por mais uniforme que a distribuição possa parecer. Ocorre na realidade uma variedade de diâmetros nas diversas gotas e gotículas formadas nesse processo.

Com o intuito de se criar um parâmetro de atomização relacionado com os diâmetros das gotas dos *sprays*, estabeleceu-se uma média de diâmetros que pudesse representar um grupo amostral de gotas. Com isso, Mugele e Evans (1951) propuseram uma relação geral para determinar o diâmetro médio das gotas de *sprays* formados por injetores, como mostrado na Equação (4).

$$D_{ab} = \left( \frac{\sum_{i=1}^{\infty} N_i \cdot D_i^a}{\sum_{i=1}^{\infty} N_i \cdot D_i^b} \right)^{\frac{1}{a-b}} \quad (4)$$

em que D é o diâmetro representativo, a e b são os índices que dependem do tipo de média que se deseja calcular e N é o número de gotas de amostras do diâmetro D.

Segundo Bayvel e Orzechowski (2013), o diâmetro médio não fornece informação sobre a gota em si; não obstante, é uma quantidade que oferece uma avaliação sobre a qualidade da atomização.

As terminologias de diâmetro médios das gotas e suas aplicações são resumidas na tabela 1.



**Tabela 1 – Diâmetros médios das gotas e suas aplicações.**

<b>a</b>	<b>b</b>	<b>Ordem (a+b)</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Diâmetro médio</b>	<b>Expressão</b>	<b>Aplicação</b>
1	0	1	$D_{10}$	Aritmético	$\frac{\sum N_i D_i}{\sum N_i}$	Comparações
2	0	2	$D_{20}$	Superficial	$\left(\frac{\sum N_i D_i^2}{\sum N_i D_i}\right)^{\frac{1}{2}}$	Controle de área superficial.
3	0	3	$D_{30}$	Volumétrico	$\left(\frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i}\right)^{\frac{1}{3}}$	Controle de volume
2	1	3	$D_{21}$	Superfície-aritmético	$\frac{\sum N_i D_i^2}{\sum N_i D_i}$	Absorção
3	1	4	$D_{31}$	Volume-aritmético	$\left(\frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i D_i}\right)^{\frac{1}{2}}$	Evaporação, difusão molecular.
3	2	5	$D_{32}$	Sauter (SMD)	$\frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i D_i^2}$	Transferência de massa, reações.
4	3	7	$D_{43}$	De Brouckere ou Herdan	$\frac{\sum N_i D_i^4}{\sum N_i D_i^3}$	Combustão, Equilíbrio.

Fonte: Lefebvre, (1989).

#### 2.3.2.2.2. Distribuição dos diâmetros das gotas

Conforme visto no item anterior, por mais uniforme que o *spray* seja, o tamanho de todas as gotas geradas nunca é o mesmo, apenas variam em torno de um valor médio representativo. Devido à heterogeneidade do processo, faz-se necessário conhecer como estas gotas de variados diâmetros se distribuem ao longo do *spray*. Dessa forma, a distribuição dos diâmetros das gotas é outro parâmetro importante no estudo das características microscópicas.

Diversos pesquisadores conduziram estudos com o intuito de determinar novas correlações para a distribuição dos diâmetros das gotas através de dados de natureza empírica. Atualmente a função de distribuição de gotas melhor aceita no âmbito de *sprays* é a distribuição Rosin-Rammler.

Também se aplicam expressões matemáticas bem conhecidas para determinação da distribuição dos diâmetros das gotas de *spray*, tais como a distribuição normal e log-normal (Lefebvre, 1989).

### **2.3.2.3. Propriedade dos líquidos que influenciam na atomização**

As características do escoamento e do *spray* da maioria dos atomizadores são influenciadas pelas propriedades do líquidos tais como densidade, viscosidade e tensão superficial.

A importância da densidade para o desempenho da atomização é reduzida pelo fato de a maioria dos líquidos apresentarem pequenas diferenças nesta propriedade.

A tensão superficial, em vez disso, é importante na atomização porque representa a força que resiste à formação de nova área de superfície.

Um dos objetivos da atomização de líquidos está em aumentar a área superficial do mesmo para que, com isso, aconteça mais facilmente a sua evaporação e/ou absorção, segundo Lefebvre, (1989). A tensão superficial é a propriedade que se opõe ao aumento dessa área superficial. Portanto, quanto maior for o valor da tensão superficial mais difícil é a quebra do filme líquido em gotas. Logo, a tensão superficial é um parâmetro muito importante na análise do processo de atomização.

Em geral, a viscosidade é a propriedade do líquido mais relevante no desenvolvimento do *spray*. De fato, ela afeta não somente na distribuição do tamanho das gotas do *spray*, como também na vazão do injetor e na morfologia do *spray*. Um aumento da viscosidade diminui o número de Reynolds e dificulta o desenvolvimento da instabilidade natural no jato. O efeito combinado destes fenômenos atrasa a desintegração e aumenta o tamanho das gotas do *spray*.

De acordo com Bayvel e Orzechowski (1993), cada propriedade do líquido descrita acima, pode ser relacionada com os diâmetros das gotas do *spray* da seguinte maneira:

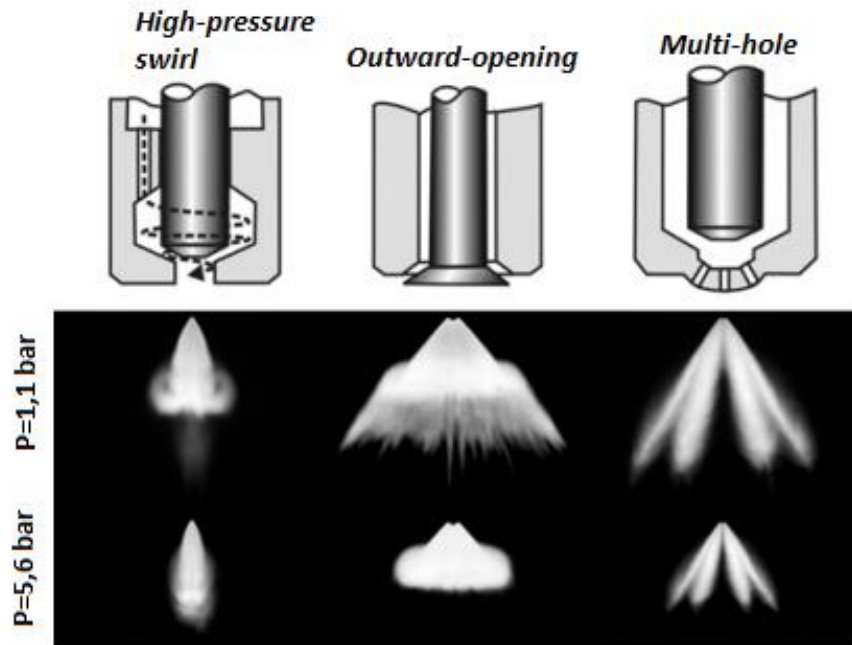
- 1) Líquidos com densidade alta geram gotas com diâmetros pequenos;
- 2) Líquidos com tensão superficial alta se desintegram com diâmetros de gotas maiores;
- 3) Líquidos com viscosidade alta desenvolvem diâmetros de gotas maiores.

### **2.3.2.4. Injetores de injeção direta de motores de ignição por centelha**

Durante a evolução dos motores DISI, a maioria das pesquisas enfatizam esses três tipos de injetores de injeção direta de gasolina e etanol, que são os injetores do tipo: *high-pressure swirl injector*, *outward-opening* e *multi-hole*, representados de

forma esquemática na Figura 12, onde são mostrados ainda os *sprays* produzidos pelos respectivos injetores.

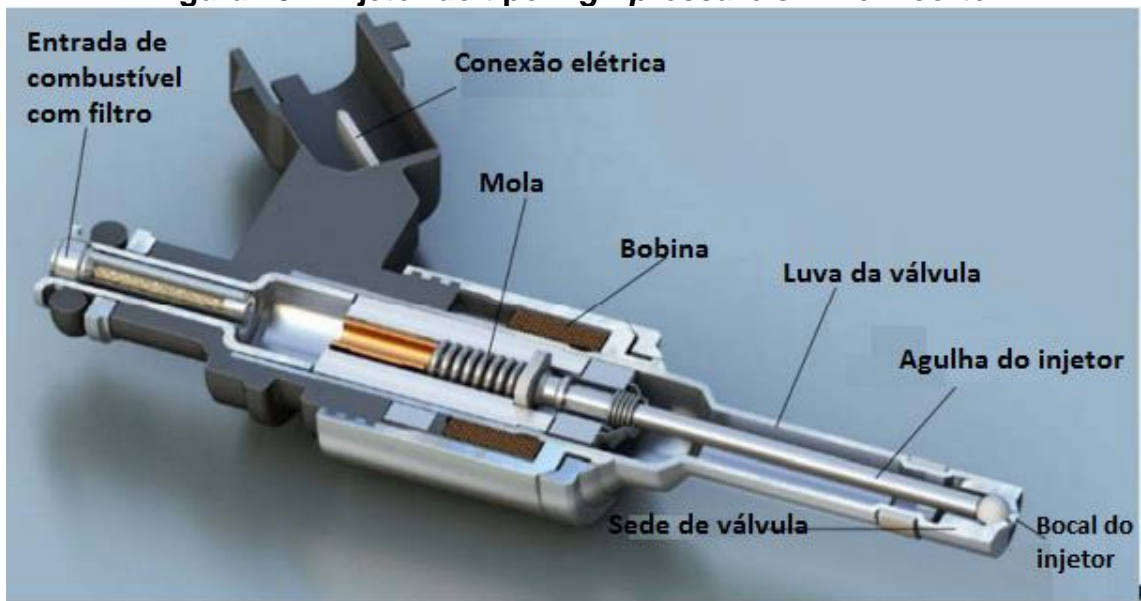
**Figura 12 – Conceito de três tipos de injetores de injeção direta típicos**



Fonte: Adaptado de (Basshuysen, 2008)

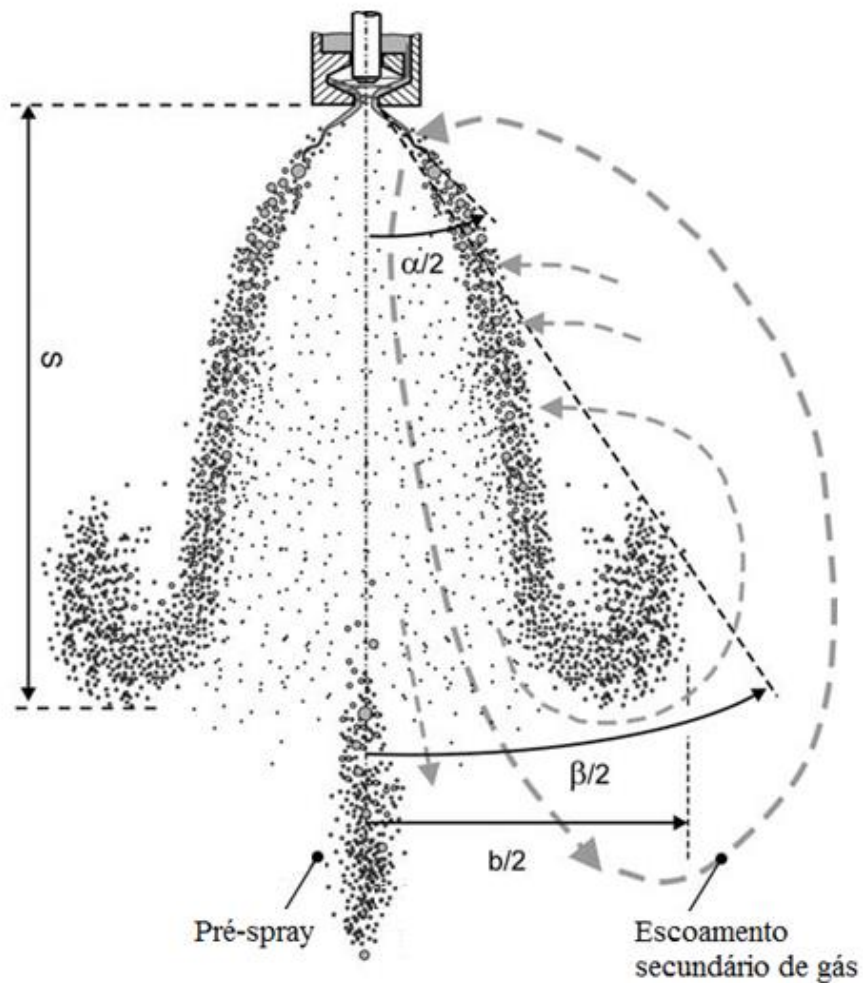
Em um injetor *high-pressure swirl*, o combustível percorre as portas de *swirl* (*swirl ports*) dispostas tangencialmente e obtém um movimento de rotação dentro da câmara de *swirl*. Depois de passar pelo orifício do injetor, é gerado no combustível uma folha líquida em forma de cone. Deste modo, a pressão de injeção no injetor de *swirl* é convertida em momento de rotação para promover a atomização do *spray*. No entanto, a estrutura do *spray* deste tipo de injetor é significativamente influenciada pela pressão de gás circundante. O Injetor *high-pressure swirl*, Figura 13, é o injetor mais utilizado na primeira geração de motores de produção em série DISI. Os motores *Spray-Guided DISI*, exigem *sprays* cuja estrutura geral e ângulos são independentes da contrapressão. A Figura 14 mostra a estrutura típica de um *spray* produzido por este tipo de injetor (Bosch, 2015).

Figura 13 – Injetor do tipo *high-pressure swirl* em corte.



Fonte: Adaptado de (Basshuysen, 2008)

Figura 14– *Spray* produzido por um injetor do tipo *high-pressure swirl*.



Fonte: Adaptado de Baumgarten, (2006).

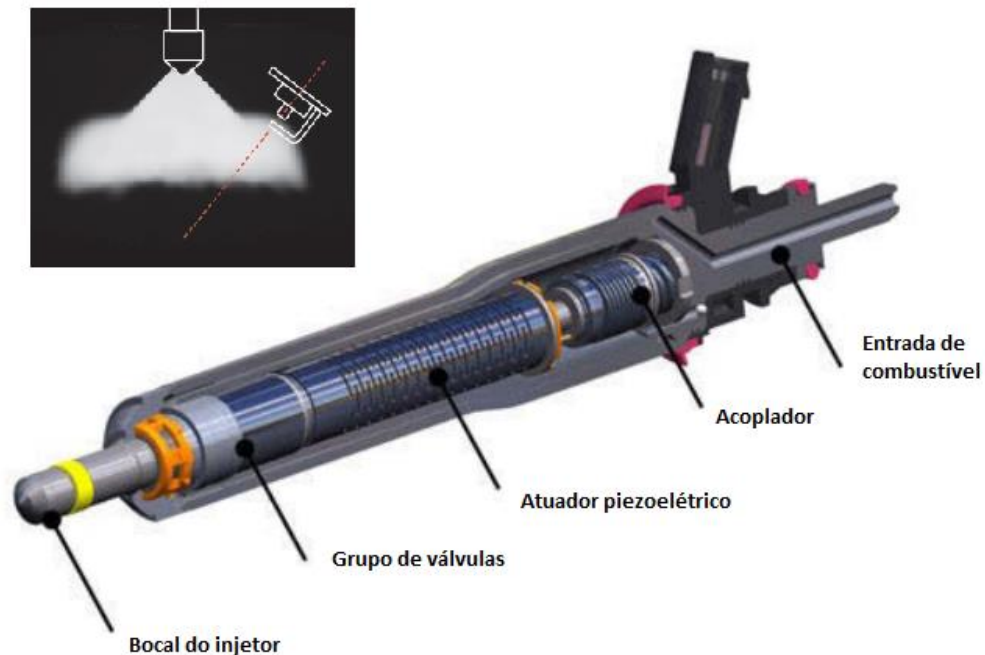
No início da injeção o líquido sai do injetor no formato de um *spray* sólido devido ao baixo movimento rotacional e a pequena velocidade do líquido no interior do injetor, formando a estrutura do pré-*spray* indicado na Figura 14.

Ainda na Figura 14,  $\alpha$  corresponde a um ângulo próximo do injetor,  $\beta$  a um ângulo mais afastado do mesmo, ambos referenciados ao orifício e S é a penetração do *spray* principal. Devido ao arrasto sofrido pelas gotículas na extremidade das bordas e também ao escoamento secundário do gás mostrado nessa mesma figura, uma estrutura em vórtice é formada na extremidade das bordas do *spray*. Algumas gotas também preenchem a parte interna do cone, porém, a maior concentração delas acontece nas bordas do *spray* (Baumgarten, 2006).

Dois tipos de injetores de combustível foram desenvolvidos especificamente para motores a gasolina *Spray-Guided* DISI: injetores piezoelétricos *pintle* de abertura externa (*outward-opening*) e injetores *multi-hole* com atuador solenóide.

No injetor *outward-opening*, Figura 15 o combustível do duto de alta pressão é introduzido na galeria do bocal e guiado para a saída do bico injetor através das passagens de fluxo, então por sua vez formando um *spray* de cone oco quando o combustível é injetado dentro da câmara de combustão. A penetração desta estrutura no cilindro do motor é função das condições termodinâmicas predominantes (pressão, densidade e temperatura). Embora este injetor gere um *spray* de cone oco e possua uma atomização melhorada devido à elevada relação área / volume, o atuador piezoelétrico resulta em custo muito maior e esse valor de fabricação deve ser cuidadosamente considerado para a aplicação em motor *Spray-Guided* DISI, comparando com os outros tipos de injetores, (Bosch, 2015).

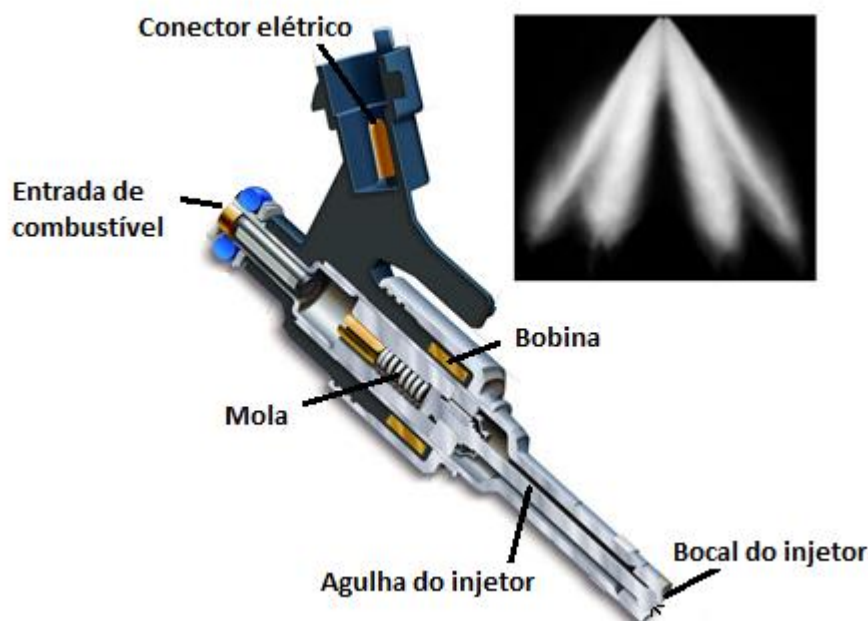
Figura 15 – Injetor *outward-opening* em corte.



Fonte: Adaptado de (Basshuysen, 2008)

O injetor *multi-hole* possui ampla aplicação na indústria automotiva devido à forma e estrutura individual do *spray* serem semelhante ao injetor de alta pressão diesel usado em motores do ciclo Diesel de injeção direta. Um dos grandes benefícios dos injetores *multi-hole* empregados em motores *Spray-Guided* DISI são atribuídos a estrutura de *spray*, que apesar do aumento da contrapressão no cilindro ela não sofre grandes alterações (Mitroglou et al, 2006) , que é um critério importante para a realização do *spray-guided*, e a flexibilidade geométrica aumentada no que se refere ao número e a disposição dos furos do bocal do injetor, proporcionando jatos de *spray* desejáveis a custos potencialmente mais baixos em relação ao injetor *outward-opening*. Este tipo de injetor produz *sprays* com jatos estreitos, de alta velocidade e compactos como mostrado na Figura 16.

Figura 16 – Injetor *multi-hole* em corte.



Fonte: adaptado de (Basshuysen, 2008).

## 2.4. Técnicas ópticas aplicadas na caracterização do *spray*

Nesta seção são mostradas algumas técnicas de medição ópticas usadas para medir e analisar parâmetros e características dos *sprays* de combustível.

### 2.4.1. Filmagem em alta velocidade

A aquisição de imagens em alta velocidade fornece a capacidade de capturar e reproduzir vídeos do processo de *spray*, que pode acontecer tão rápido, que não podem ser avaliados com a filmagem normal ou em tempo real.

Utilizando o vídeo gravado de alta velocidade do processo de injeção do *spray*, as características transientes da injeção podem ser avaliadas com a câmera posicionada corretamente na área de interesse do fenômeno em que se deseja estudar.

A filmagem em alta velocidade fornece uma visão única e instantânea da distribuição do *spray* na imagem, como: concentração, forma, trajetória e permite uma avaliação rápida do desenvolvimento do *spray*. A medição com base em imagens torna os resultados principalmente de natureza qualitativa, mas ao combinar as

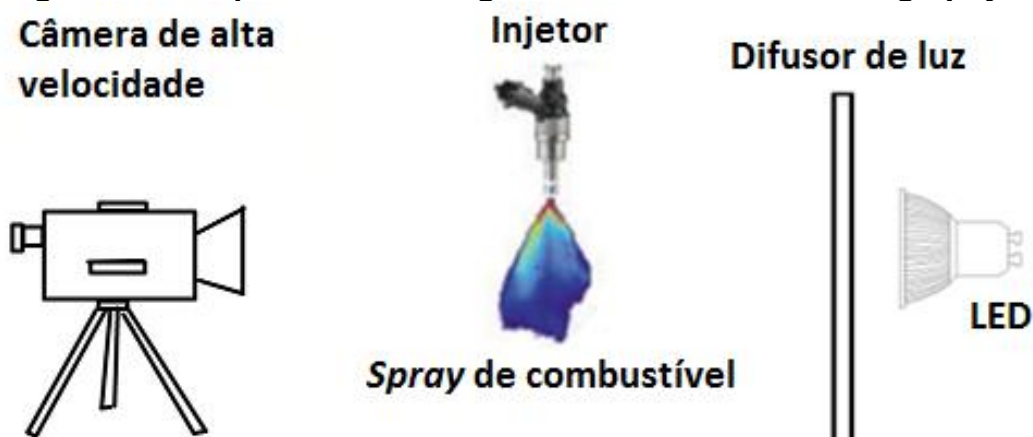
imagens adquiridas a uma outra técnica óptica, pode-se obter valores expressivos, relacionados aos *sprays* e parâmetros da atomização, quantificando tal natureza.

### 2.4.2. *Shadowgraphy*

A técnica *shadowgraph* é frequentemente considerada como sendo um dos métodos mais acessíveis de análise de *sprays*, uma vez que requer poucos recursos para implementação (Guzzo. M, 2016). Tipicamente, a *shadowgraphy* envolve uma fonte de iluminação posicionada atrás de um difusor de luz e uma câmera posicionada opostamente ao plano do difusor, em geral o *spray* situa-se entre o difusor e a câmara, Figura 17. As imagens das sombras dependem do redirecionamento da luz devido à refração. A luz que viaja na direção da câmera, longe do difusor, é perturbada (refratada e refletida), devido à alteração do índice de refração do líquido injetado em relação ao ambiente de injeção do *spray*. Como tal, os raios de luz não refletidos e refratados preenchem o sensor de imagem. Os raios de luz, desviados pelo *spray*, viajam para outro lugar causando uma ausência de luz no sensor de imagem, traduzindo, em uma parte escura da imagem, ilustrando uma "sombra". Assim, a falta de luz indica a presença do *spray*.

Com a evolução em diagnósticos baseados em imagens, existem várias abordagens para obter e analisar resultados da *shadowgraphy*, tais como ângulo de cone, penetração e volume do *spray*, dentre outros.

Figura 17 – Esquema de montagem do sistema de *Shadowgraphy*



Fonte: Autor.



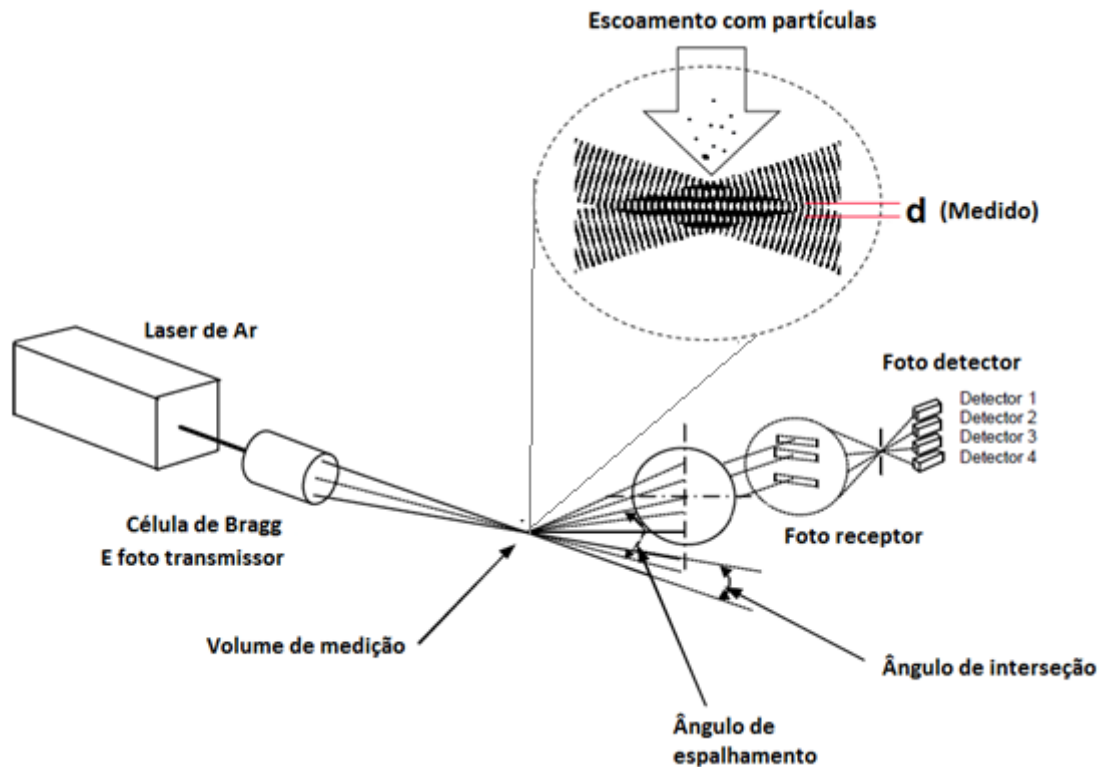
### **2.4.3. Princípios básicos de medição do LDA (laser Doppler Anemometry) e PDA (Phase Doppler Anemometry)**

O deslocamento Doppler foi considerado pela primeira vez por um físico austríaco em 1842, que observou uma mudança de frequência devido ao movimento da fonte em qualquer forma de propagação de onda. No entanto, Yeh e Cummins (1964) descreveram a ideia de usar o deslocamento Doppler de luz laser para medir a velocidade, que observou o deslocamento da luz dispersa de partículas transportadas em um fluxo de água de tubo laminar. O PDA (Phase Doppler Anemometry) é uma técnica óptica não intrusiva, utilizada para determinar simultaneamente o tamanho e a velocidade das partículas em pontos específicos dos sprays. Este método trabalha especificamente em partículas isoladas, permitindo assim obter alta resolução espacial.

PDA pode ser usado para medir o tamanho e a velocidade em um ponto em um fluxo usando uma luz monocromática muito intensa. Ele detecta componentes de velocidade verdadeira (radial e axial) e mede os componentes em uma sequência de amostras quase instantâneas, com alta precisão.

A técnica PDA é uma combinação da técnica de anemômetro Doppler laser usada para definir velocidades de partículas em fluxos, com um método de dimensionamento de partículas. A Figura 18 mostra uma configuração óptica de um sistema PDA.

Figura 18 – Esquema do sistema óptico do PDA.



Fonte: Adaptado de Dantec Dynamics (2017).

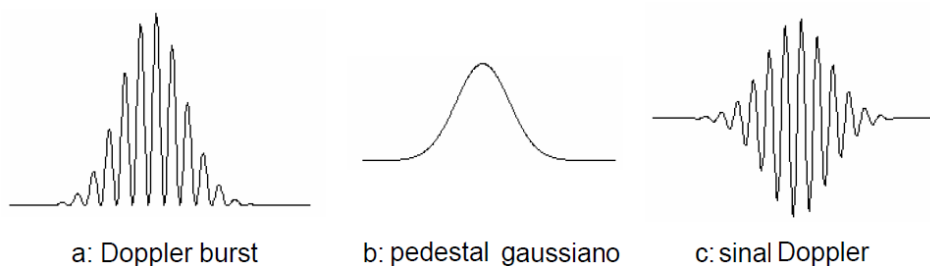
O feixe de saída de um laser é dividido em dois ou mais componentes de igual intensidade. Uma lente é usada para focalizar os feixes em um ponto chamado volume de medição. A interferência dos feixes de luz no volume de medição cria um conjunto de franjas igualmente espaçadas (bandas brilhantes e escuras criadas por uma diferença de fase das ondas de luz interferentes). As medições de velocidade e tamanho são feitas quando uma partícula transportada pelo fluxo passa através destas franjas. Quando uma partícula atravessa o volume de controle, a quantidade de luz recebida flutua com as franjas e é dispersada em todas as direções. Parte da luz é então recolhida por outra lente e focada num fotodetector que converte as flutuações da intensidade da luz em flutuações num sinal de tensão. A frequência dessa flutuação é proporcional à velocidade da partícula. Esta frequência é conhecida como a frequência  $f$  de deslocamento Doppler e pode ser calculada utilizando a Equação (5):

$$f = \frac{2u \cdot \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\delta} \quad (5)$$

Onde  $u$  é a componente de velocidade da partícula normal para as franjas,  $\theta$  é o ângulo de interseção do feixe e  $\delta$  é o comprimento de onda do laser (Durst et al., 1981).

O sinal de saída de um receptor PDA é chamado de "Doppler burst" (sinal bruto) e é mostrado na Figura 19. A forma geral de burst é causada pelo fato de que os feixes de laser que produzem o volume de medição são mais fortes no seu centro do que nas suas bordas (devido ao perfil de intensidade gaussiano do feixe de laser). À medida que a partícula passa pelas bordas do volume de medição onde as franjas estão iluminadas com menos intensidade, as flutuações do sinal são também possuem menor intensidade. À medida que a partícula passa pelo centro do volume de medição, as flutuações do sinal tornam-se maiores e então decaem novamente. O sinal pode ser dividido em duas partes: uma parte de baixa frequência, chamado de "pedestal gaussiano" e uma parte de alta frequência que realmente contém o sinal Doppler. A frequência de Doppler  $f$  pode ser determinada medindo o período do sinal de Doppler e conhecendo o comprimento de onda do laser e o ângulo de interseção dos dois feixes, a velocidade da gota pode então ser calculada de acordo com a Equação (5).

**Figura 19 – Anatomia de um típico sinal burst de LDA gerado quando uma partícula passa através do volume de medição.**



**Fonte: Adaptado de Dantec Dynamics (2017).**

A duração do Doppler burst é inversamente proporcional à velocidade das partículas. As partículas com maiores velocidades gastam menos ao ultrapassarem o volume de medição e produzem sinais de burst curtos e, assim, partículas menos velozes atravessam o volume de medição em um período mais longo, resultando em um burst mais longo.

Considerando que nas medições de velocidade a partícula passa pelo volume de medição de cima para baixo, (Figura 18). No entanto, esta técnica tem algumas limitações, de acordo com a Equação (5), uma gotícula que se desloca na direção positiva ou negativa através das franjas produzirá a mesma frequência de sinal. Assim não existe informação embutida no sinal para distinguir entre as direções positiva e negativa das gotas. Este problema é referido como "ambiguidade direcional" e pode ser eliminado deslocando a frequência de um dos raios laser. O desvio de frequência é normalmente obtido utilizando células de Bragg <sup>2</sup> (dispositivos óptico-acústicos), no entanto podem ser utilizados outros métodos (Durst et al., 1981). Portanto, uma partícula movendo-se para baixo gera um sinal na frequência Doppler mais o deslocamento de frequência, enquanto que umas partículas para cima geram uma frequência da frequência de deslocamento menos a frequência Doppler.

Para determinar o tamanho de uma partícula, é necessário medir a frequência espacial do padrão de franja de interferência produzido pela luz difusa. Bachalo e Houser (1984) mostraram que isso pode ser conseguido utilizando um segundo fotodetector para coletar luz simultaneamente de uma parte diferente do padrão de interferência. Um sinal Doppler burst será produzido por cada detector, porém com um deslocamento de fase entre eles, como ilustrado na Figura 20. Os sinais dos dois detectores têm a mesma frequência de Doppler  $f$  e similar Amplitude, mas são separados por uma mudança de fase  $\emptyset$  dada pela Equação (6):

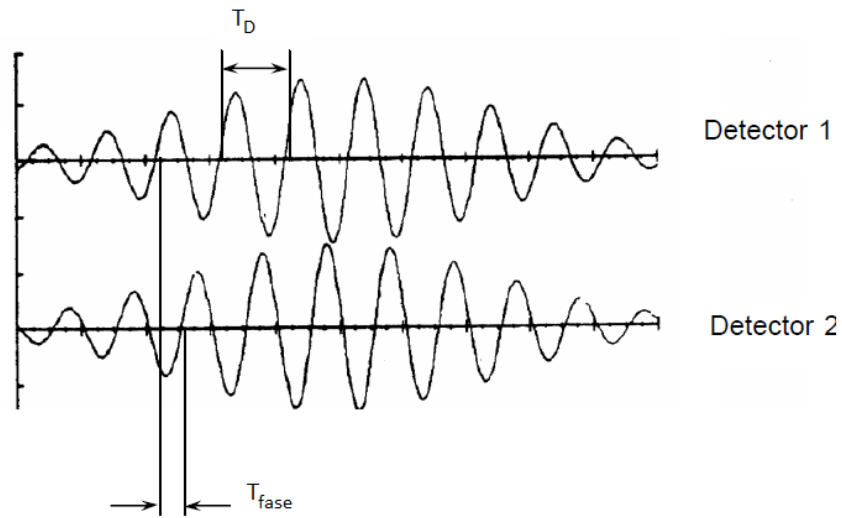
$$f = \frac{T_{fase}}{T_D} \cdot 360 \quad (6)$$

Onde  $T_D$  é o período Doppler e  $T_{fase}$  é o período entre os cruzamentos de zero dos sinais dos detectores 1 e 2.

---

<sup>2</sup> Células de Bragg: é um separador de feixe que gera dois feixes: um na frequência de entrada e um com um desvio de frequência.

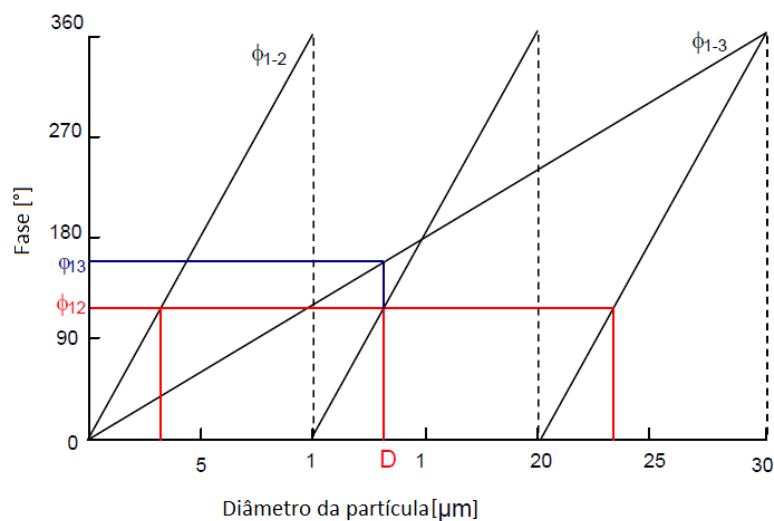
**Figura 20 – Sinal Doppler do detector 1 e 2.**



Fonte: Adaptado de Bachalo e Houser, (1984).

Para uma dada configuração óptica, a diferença de fase está diretamente relacionada com o tamanho de partícula por uma curva de calibração linear mostrada na Figura 21. A inclinação da curva de resposta linear depende dos parâmetros ópticos, que consistem no comprimento de onda do laser, no ângulo de coleta, no ângulo de interseção do feixe de laser e no índice de refração da partícula. As relações teóricas entre a diferença de fase e o diâmetro de partícula são dadas abaixo para os dois modos principais de dispersão (Dantec, 2002).

**Figura 21 – Curva de calibração do PDA.**

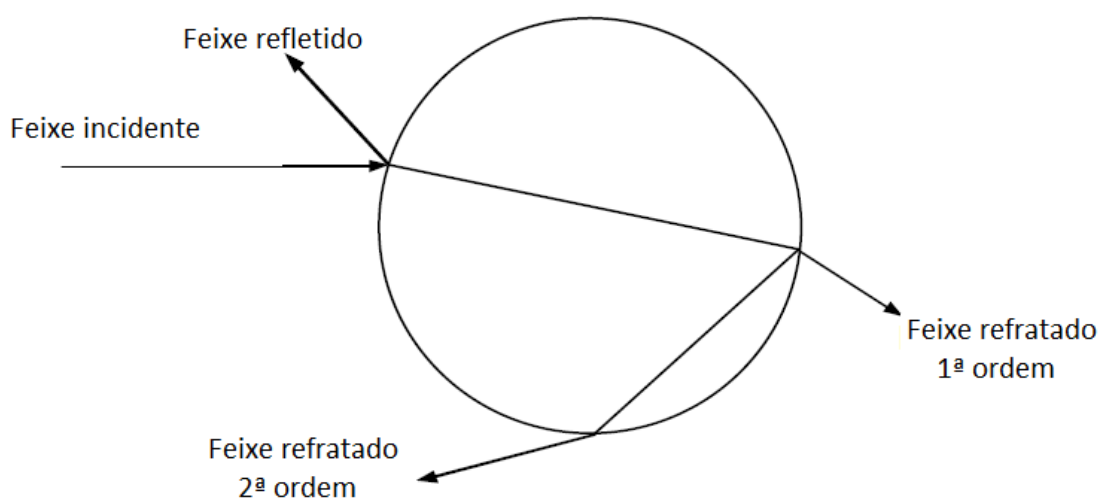


Fonte: Adaptado de Bachalo e Houser, (1984).

O modo de dispersão será selecionado para assegurar que a luz recebida pelo fotodetector seja dominada por um único fenômeno de dispersão e que a relação sinal-ruído seja tão elevada quanto possível. Em alguns casos, pode ocorrer um desvio de fase maior que  $360^\circ$  e a curva de calibração deixará de ser válida e esse fenômeno é conhecido como a ambiguidade  $2p$ . Um terceiro detector é usado para detectar e remover tais incertezas. Por exemplo, de acordo com o diagrama de diâmetro-fase (Figura 21), um desvio de fase de  $120^\circ$  entre o detector 1 e 2 ( $\phi_{12}$ ) corresponde a 3 diâmetros de partícula diferentes. O detector adicional é usado para selecionar qual valor de diâmetro é o correto. O terceiro detector também pode ser usado para eliminar erros de dimensionamento devido a partículas não esféricas.

A curva fase-diâmetro será linear se apenas um modo de dispersão predominar a partir dos dois raios laser. O espalhamento pode ser composto de difração, absorção, reflexão e refração. O raio de luz incidente em uma esfera é ilustrado na Figura 22. A representação inclui três contribuições, reflexão da superfície da partícula, refração através da partícula (refração de 1ª ordem) e refração com uma reflexão interna (refração de 2ª ordem).

**Figura 22 – Ilustração de três diferentes modos de espalhamento.**

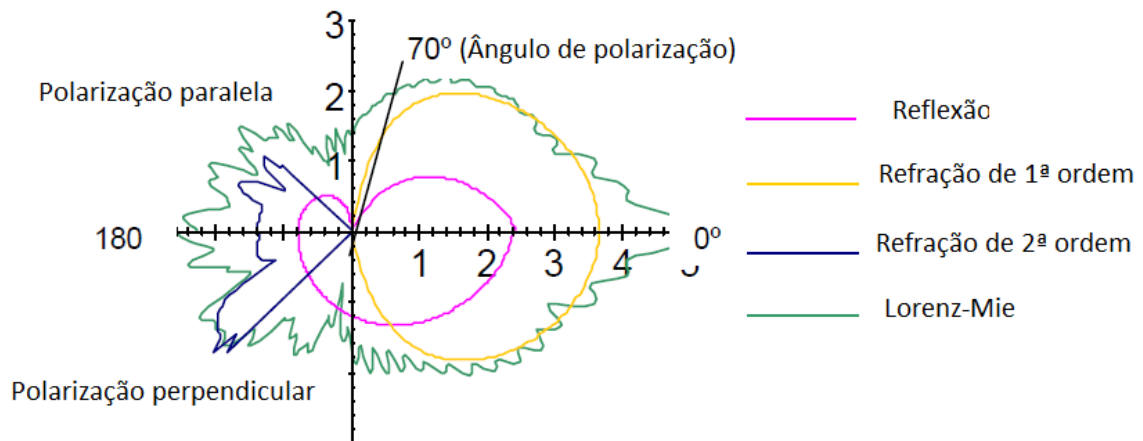


Fonte: Adaptado de Dantec Dynamics (2017).

O componente de dispersão de luz de reflexão e/ou de refração é medido para se obter o tamanho de partícula. Como o sistema estima o tamanho da partícula a partir da relação fase-diâmetro de um dos componentes de espalhamento, o sistema deve

ser configurado de modo que somente um modo do espalhamento domine a luz recebida pelos fotodetectores. Se a luz dispersa pela reflexão e a luz dispersa pela refração tiverem intensidades comparáveis, ocorrerá uma não linearidade na relação fase-diâmetro, resultando em erros de dimensionamento de partículas. A intensidade da luz difusa da reflexão e refração varia com o ângulo de dispersão e a orientação da polarização da luz incidente (Figura 23). Considerando um plano paralelo de polarização, para ângulos próximos ao eixo óptico (ângulos de espalhamento menores que  $30^\circ$ ), a luz difusa é dominada pela difração e não contém informação útil de fase. Para ângulo entre  $30^\circ$  e  $80^\circ$ , a luz difusa é dominada pela refração, enquanto a reflexão é dominante na faixa de  $80^\circ$  a cerca de  $110^\circ$ . O traço verde na Figura 3-6 representa a distribuição angular da intensidade relativa da luz dispersa de acordo com a teoria de Lorenz-Mie.

**Figura 23 – Dependência angular da luz difusa para um plano de polarização paralelo e perpendicular.**



Fonte: Adaptado de Dantec Dynamics (2017).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nas seções a seguir serão apresentados os injetores e os fluidos de teste utilizados, as bancadas experimentais e o procedimento experimental adotado para a realização dos ensaios em cada bancada.

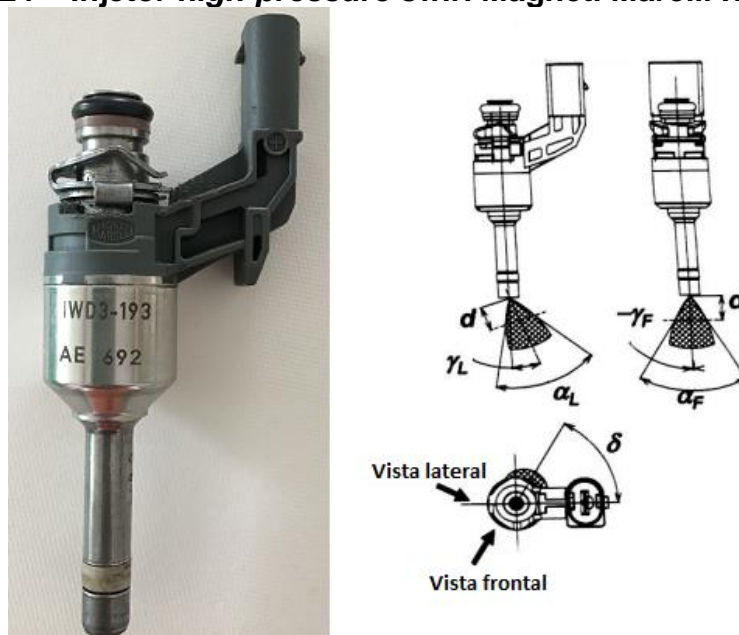
#### 3.1. Os injetores

Nesta seção são apresentados injetores objetos de estudo deste trabalho.

##### 3.1.1. Injetor *high-pressure swirl*

Os ensaios foram feitos, utilizando um injetor *high-pressure swirl* (Magneti Marelli modelo IWD3+ 193), de injeção direta, mostrado na Figura 24. Foram realizados experimentos para medir o ângulo de cone e a penetração, como variáveis macroscópicas e velocidade e diâmetros das gotas, como variáveis microscópicas do *spray* gerado por esse injetor. As características do injetor são apresentadas na Tabela 2.

Figura 24 – Injetor *high-pressure swirl* Magneti Marelli IWD3+ 193



Fonte: Adaptado de Magneti Marelli catálogo.



**Tabela 2 – Características do injetor Magneti Marelli (IWD3+ 193)**

<b>Injetor Magneti Marelli (IWD3+193) – Fluido Exxsol D40</b>	
<b>Tipo de <i>Spray</i></b>	<i>High-presseure swirl</i>
<b>Número de furos do injetor</b>	1 furo
<b>Pressão nominal de operação</b>	40 a 120 [bar]
<b>Para a vazão estática e dinâmica a pressão de referência é:</b>	$100 \pm 0,25$ [bar]
<b>Vazão estática</b>	$12,65 \pm 4,0\%$ [g/min]
<b>Vazão Dinâmica</b>	$7,88 \pm 5,0\%$ [mg/inj]
<b><math>T_i = 0,6 \pm 0.001</math> ms = inj</b>	
<b>Ângulos de cone nominal (a 10mm da ponta do injetor)</b>	
<b>Ângulo de cone <math>\alpha</math></b>	$60^\circ \pm 5^\circ$
<b>Ângulo de desvio <math>\gamma</math></b>	$0^\circ \pm 5^\circ$
<b>Ângulo de orientação <math>\delta</math></b>	$0^\circ \pm 5^\circ$

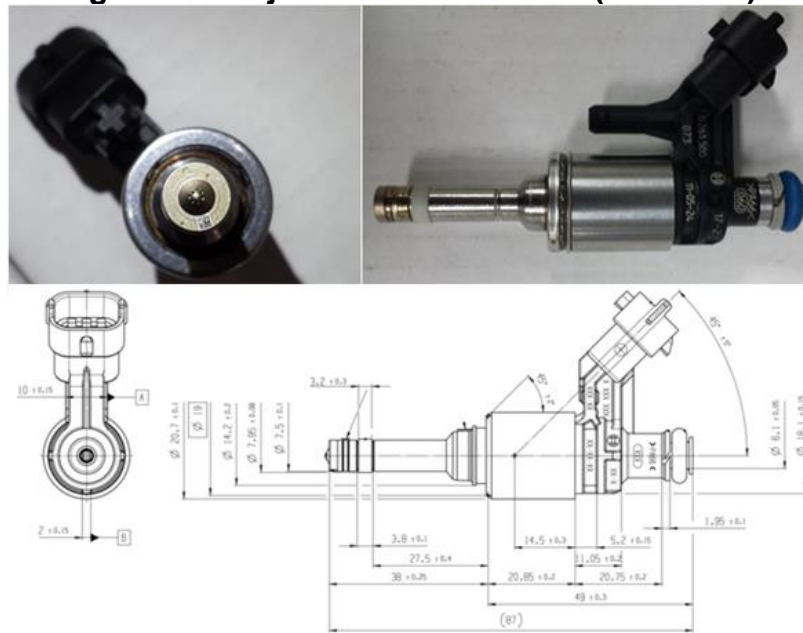
Fonte: Magneti Marelli catálogo.

### 3.1.2. Injetor *multi-hole*

Experimentos com o injetor *multi-hole* foram realizados afim de comparar e avaliar, qualitativamente a morfologia entre o spray gerado por este injetor e pelo injetor *high-pressure swirl*, supracitado.

A Figura 25 mostra o injetor *multi-hole*, um injetor (Bosch – HDEV 5.1) de sete orifícios de descarga.

**Figura 25 – Injetor *Multi-hole* Bosh (HDEV 5.1).**



Fonte: Autor.

### 3.2. Fluidos de teste

Os combustíveis gasolina padrão tipo A (E0), gasolina padrão emissões tipo C (E22), etanol hidratado combustível (E100) e etanol anidro (EA); os simulacros Exxsol D40 e Exxsol D60, fluidos que simulam as propriedades da gasolina e etanol, respectivamente; e água destilada e deionizada, foram utilizados como fluidos de testes no presente trabalho. Na Tabela 3, estão listadas as propriedades dos quatro combustíveis, dos dois simulacros e da água, utilizados e todas elas foram obtidas a partir da folha de especificação dos fabricantes dos mesmos.

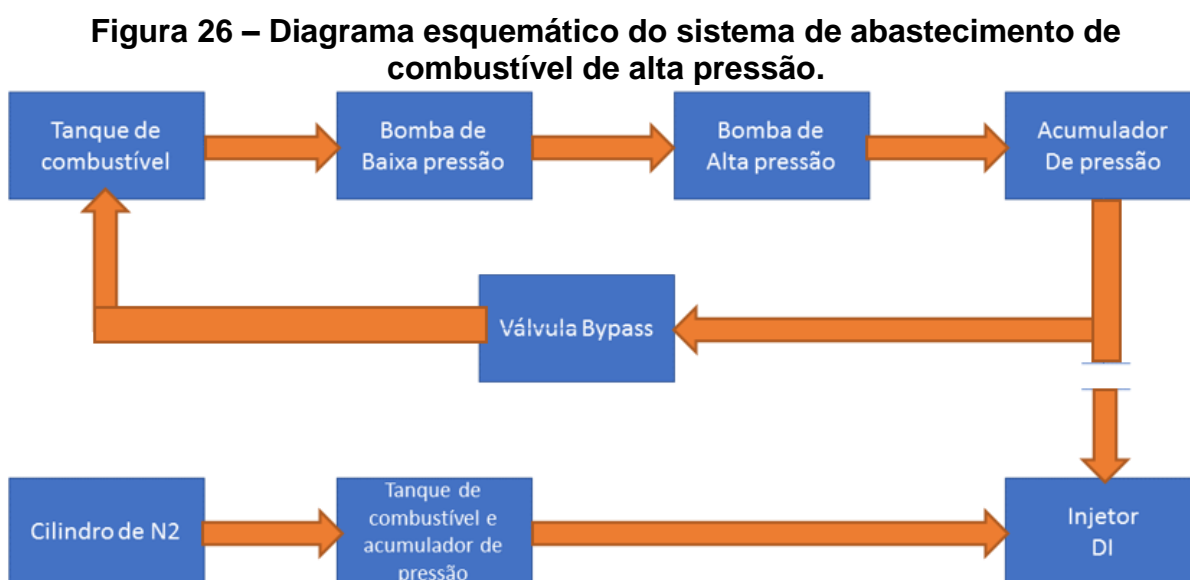
**Tabela 3 – Propriedades dos combustíveis**

Propriedades À 20 °C	Fluidos de teste						
	E0	E22	E100	EA	Exxsol D40	Exxsol D60	Água
Massa específica [Kg/m <sup>3</sup> ]	726,6	743,6	791,5	809,3	775,1	793,6	998,2
Viscosidade [cP]	0,743				1,366	1,627	1,003
Tensão superficial N/m	0,021		0,023	0,022	0,024	0,025	

Fonte: Autor.

### 3.3. Sistema de injeção Di

Com o objetivo de fornecer os fluidos de testes com os parâmetros de injeção desejados ao injetor, um sistema de injeção de combustível foi desenvolvido. O aparato experimental, foi projetado com o propósito de reproduzir um sistema de injeção de combustível DI de alta pressão existente em MCI, visando o controle das variáveis que esse sistema possui e que pudesse ser adaptado a equipamentos que consistem de técnicas ópticas de medição capazes de determinar as características do *spray* de injetores de injeção direta. Assim, como mostrado na Figura 26.



Fonte: Autor

O funcionamento desse sistema ocorre através do conjunto de diversos componentes alocados em uma configuração específica.

O fornecimento do fluido de testes ao injetor é feito como descrito na Figura 26. O fluido de testes é conduzido ao injetor através de uma mangueira flexível (pressão de trabalho – 630bar) conectada na parte inferior do flange de um vaso de pressão, enquanto que uma mangueira conectada na parte superior do flange pressuriza o vaso de pressão com nitrogênio, vindo de um cilindro pressurizado. O controle da pressão do nitrogênio no vaso de pressão é feito por uma válvula reguladora de pressão e um manômetro com escala de 0 a 315 bar e incerteza de medição de 1% do fundo de escala.

O controle dos parâmetros do injetor, foi realizado por uma unidade controladora de motor (*engine control unit* (ECU)) modelo MoTec m84 e para manter a corrente elétrica do injetor foi utilizado um *driver peak and hold*, modelo 30A – 4Ch GDI Driver (Magneti Marelli), já que o injetor deve ser acionado com uma característica de corrente complexa e com isso cumprir os requisitos de um processo de injeção de combustível definido e reproduzível, Figura 27.

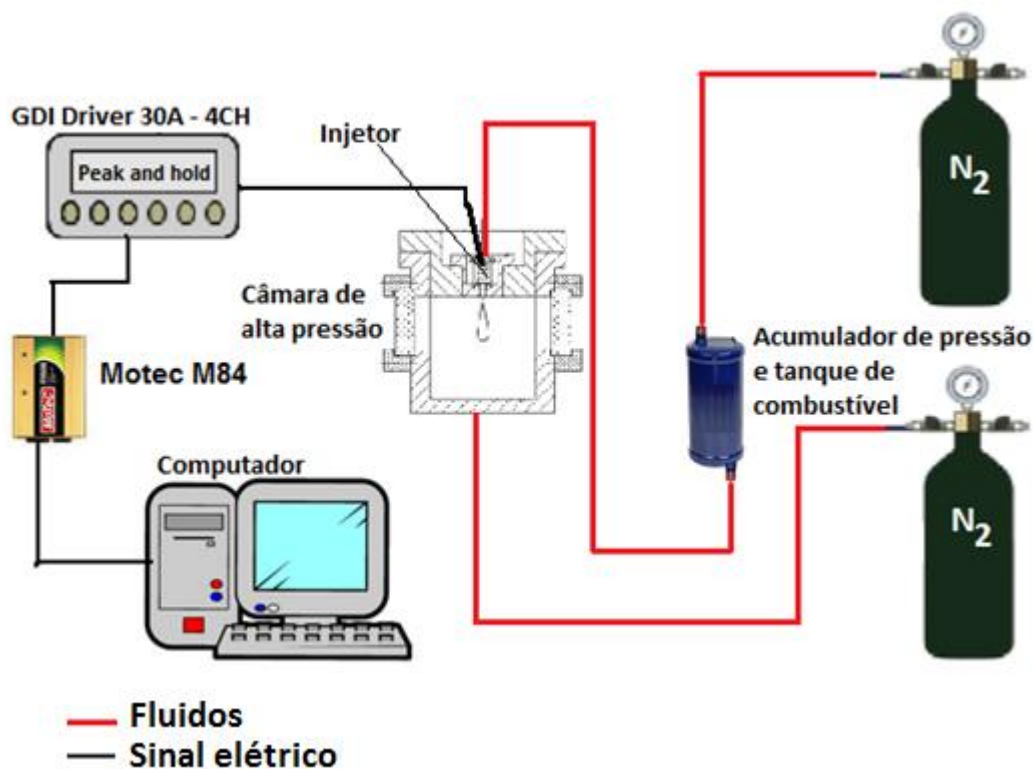
**Figura 27 – Diagrama esquemático do sistema de controle do injetor de injeção direta.**



Fonte: Autor

Assim, combinando o sistema de abastecimento de alta pressão com o sistema de controle do injetor tem-se o sistema de injeção Figura 28, possibilitando a realização dos experimentos e a caracterização dos injetores.

**Figura 28 – Esquema do aparato experimental do sistema de injeção direta**



Fonte: Autor.

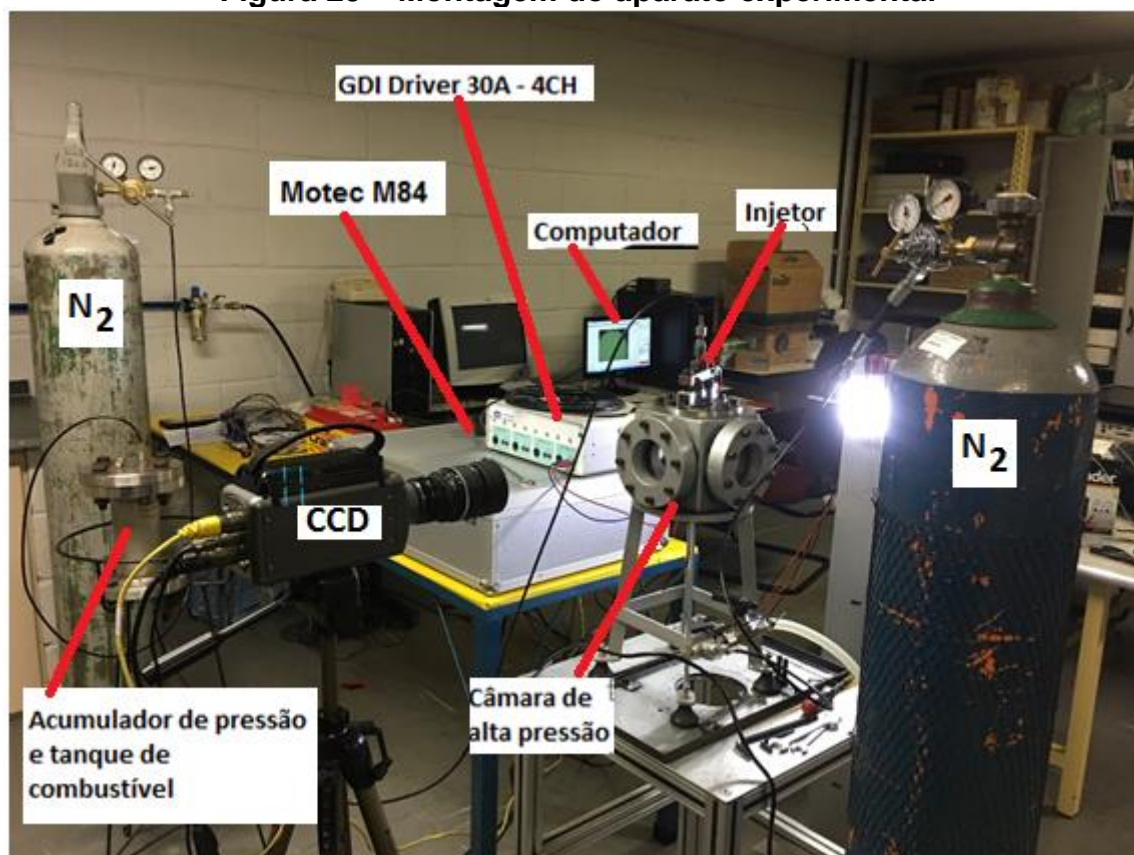
### 3.4. Visualização do *spray*

Um cilindro de nitrogênio pressurizado é ligado a um vaso de pressão, Figura 29, com os fluidos de teste dentro do mesmo para fornecer a pressão de injeção desejada. As pressões de injeção foram de 80 bar e 100 bar de pressão de injeção e as contrapressões na câmara de testes foram de 10 bar e pressão atmosférica, também pressurizada por um cilindro de nitrogênio. O vaso de pressão conecta-se, através da mangueira flexível, ao injetor colocado na parte superior da câmara de testes.

Como parâmetros de injeção, foi usada uma velocidade simulada, de um motor virtual, de rotação de 2400 rpm e um *duty cycle* de 3%, esses parâmetros foram criados na Motec M84. Com esta configuração dentro de um período total de 50 milissegundos (duas rotações), o injetor alterna injeção de combustível durante 1,5 milissegundos e depois permanece fechado durante 48,5 milissegundos.

Para determinar o ângulo de cone e a penetração do *spray* é necessária a obtenção de imagens desde o início até o final da injeção, caracterizando todo o desenvolvimento do mesmo. As injeções foram realizadas com um injetor de injeção direta de gasolina, mostrado na Figura 24. As imagens foram capturadas utilizando uma câmera CCD (Phantom V7.3; lente Nikkor 105mm f/2d). A Figura 30 mostra a montagem utilizada nos experimentos. A obtenção das imagens da injeção dos fluidos de teste se deu através da técnica denominada *shadowgraphy*. Na *shadowgraphy* o fenômeno que se pretende analisar deve estar situado entre uma fonte luminosa e um sistema de captação de imagens para registro da sombra do fenômeno em análise. A fonte luminosa nesse trabalho consistiu de lâmpadas LEDs de iluminação (400 lumens) contínua e alimentadas por uma bateria de 12 V, e a captação das imagens foi realizada através da câmera de alta frequência de filmagem supracitada. A frequência de filmagem estabelecida foi de 8000 Hz ou 8000 quadros por segundo e resolução de 640x480 *pixels*. As filmagens ocorreram em condições de pressão de injeção, contrapressão ambiente e *duty cycle* estabelecidas e explicitadas previamente.

**Figura 29 – Montagem do aparato experimental**

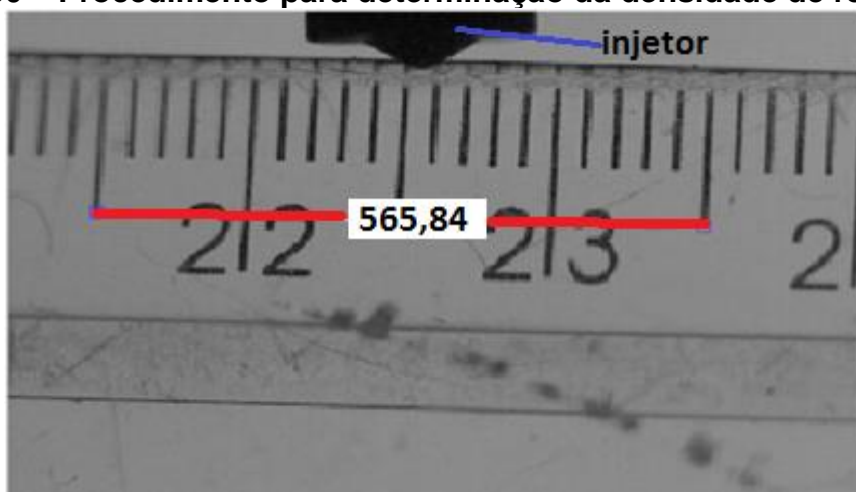


Fonte: Autor

### 3.5. Tratamento das imagens

O primeiro passo, para o tratamento dos dados da filmagem do *spray* é a determinação da densidade de resolução (DR). A densidade de resolução determina a razão da quantidade de pixels pela distância correspondente. O procedimento é realizado por meio da aquisição de uma imagem, de um objeto com dimensão conhecida, na posição do foco da câmera. A Figura 30 mostra o procedimento para a determinação da densidade de resolução, (Guzzo. M, 2016).

**Figura 30 – Procedimento para determinação da densidade de resolução.**



Fonte: Autor

Para uma distância equivalente a 20 milímetros foi medida na imagem da Figura 30 uma distância em pixels igual a 585,84. Dessa forma tem-se:

$$DR = \frac{565,84 \text{ pixels}}{20 \text{ mm}} = 28,29 \frac{\text{pixels}}{\text{mm}}$$

A densidade de resolução (DR), permiti a associação de unidades como centímetros para deslocamentos e posições nas imagens e também, associar um sistema de coordenadas polar e cartesiano nas imagens obtidas da injeção.

O segundo passo constitui na subtração onde uma imagem sem *spray* transformada em escala de cinza é subtraída de uma imagem com *spray* também transformada em escala de cinza.

A subtração das imagens foi realizada com o objetivo de evidenciar somente o *spray* combustível. A Figura 31 mostra o exemplo do procedimento adotado para uma imagem do *spray* de Exxsol D60 realizado no laboratório de Velocimetria a Laser do CTM-UFMG. De uma imagem sem *spray* é utilizada sua matriz numérica e os elementos correspondentes são subtraídos daqueles valores numéricos correspondentes à uma imagem com *spray*. Como a diferença das duas imagens é somente a presença e ausência do *spray*, da imagem resultante destaca-se o *spray*.

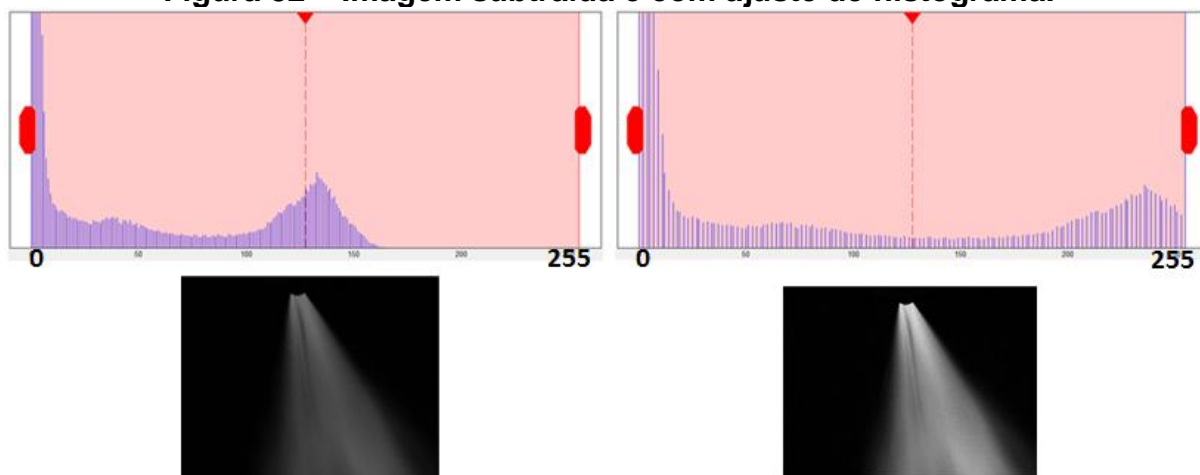
**Figura 31 – Subtração de imagens para evidenciar o *spray*.**



Fonte: Autor

A imagem subtraída da Figura 31 não compreende toda a faixa possível de valores dos pixels entre 0 e 255. Assim o procedimento seguinte foi associar ao valor máximo de pixel observado na imagem (tom mais claro) o máximo valor possível que é igual a 255 e ao valor mínimo de pixel da imagem, o mínimo valor possível igual a 0 e reajustar todos os outros valores para ficarem distribuídos dentro da faixa dos valores possíveis. O resultado é uma sensível melhora no contraste como pode ser observado na Figura 32.

**Figura 32 – Imagem subtraída e com ajuste de histograma.**



Fonte: Autor

Com as imagens subtraídas e com histograma de pixels ajustados, são realizadas todas as análises subsequentes referentes à geometria do *spray*, ângulo de cone e penetração do *spray*.

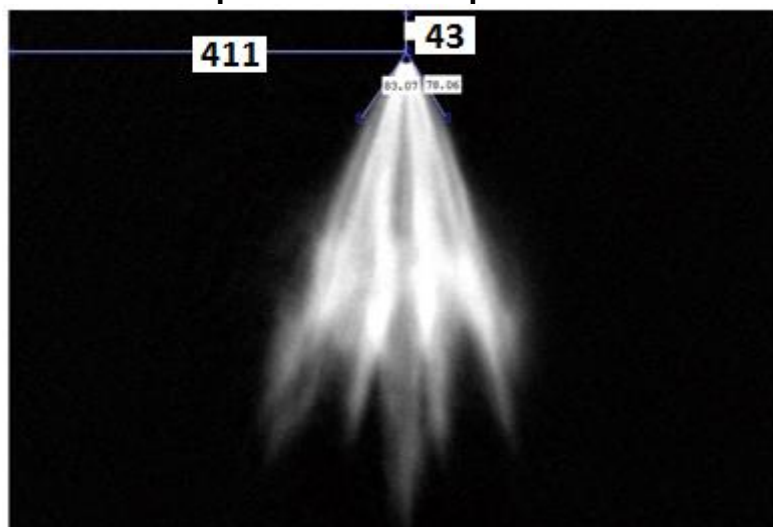


### 3.5.1. Ângulo de cone

O primeiro passo para a medição dos ângulos do spray foi escolher um ponto de referência situado no injetor. A Figura 33 mostra o procedimento adotado. O ponto de referência escolhido situa-se a uma distância aproximada de 43 pixels da extremidade superior da imagem e, portanto, o pixel situado na imagem nesta referência está na linha de número 43 de sua matriz numérica. Para saber a coluna da matriz deste ponto de referência, mediu-se a distância horizontal deste ponto até a extremidade esquerda da imagem. Com a distância medida de aproximadamente 411 pixels foi concluído que o ponto de referência na matriz está situado na linha  $i = 43$  e coluna  $j = 411$ .

Esta posição de referência na matriz ( $i = 43$  e  $j = 411$ ) é tomada como sendo a origem de um sistema de coordenadas polares e dessa forma qualquer ponto na imagem é caracterizado através de um valor de ângulo e uma medida em centímetros.

**Figura 33 – Procedimento para escolha do ponto de referência das imagens.**

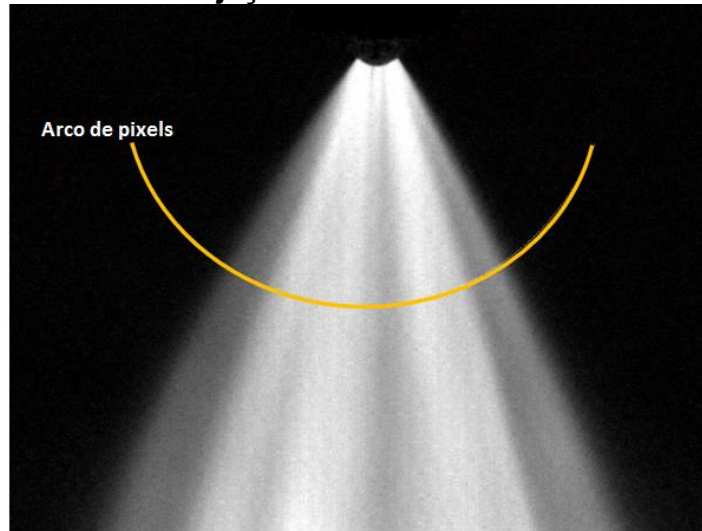


Fonte: Autor

O próximo passo é acessar pixels equidistantes a este ponto de referência (em formatos de arcos de circunferência onde é fixada a distância e varia-se o ângulo) e plotar os seus valores em função do posicionamento angular. A Figura 34 mostra o conjunto de pixels situados a uma distância de 5 mm do ponto de referência escolhido, como ilustração do método, para uma imagem da injeção de Exxsol D60 obtida em

aproximadamente 1,2 milissegundos após o início da injeção com uma variação total de ângulo entre 240° e 305°, como mostrado na Figura 35.

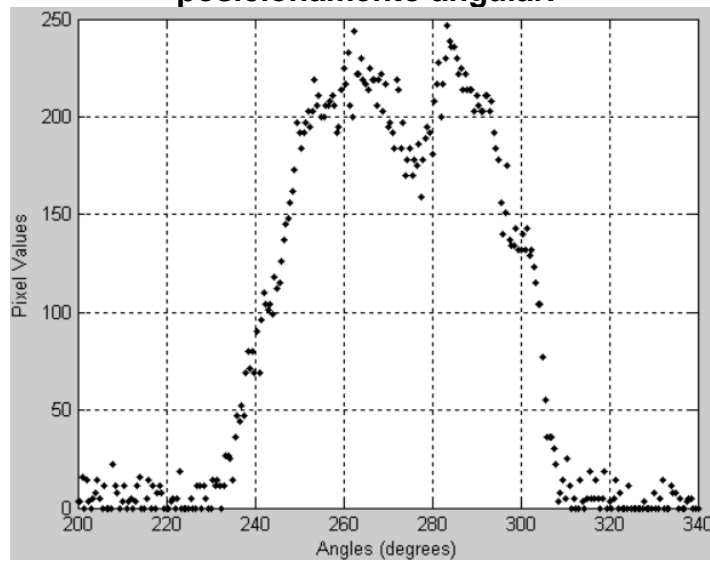
**Figura 34 – Arco de pixels situado a 0,5cm do injetor em uma imagem de injeção de Exxsol D60.**



**Fonte: Autor**

Os valores dos pixels pertencentes ao arco da Figura 34 são analisados em um gráfico, no qual o eixo das ordenadas corresponde aos valores de pixels e o eixo das abscissas ao posicionamento angular. Através da observação do comportamento dos valores dos pixels, foi estabelecido um valor de corte igual a 100 para a localização das bordas do spray em relação às suas coordenadas polares. Dessa forma, quando o valor do pixel é maior que 100 assume-se a presença de spray, enquanto valores menores indicam sua ausência. Essa escolha pode ser compreendida ao observar-se a Figura 35.

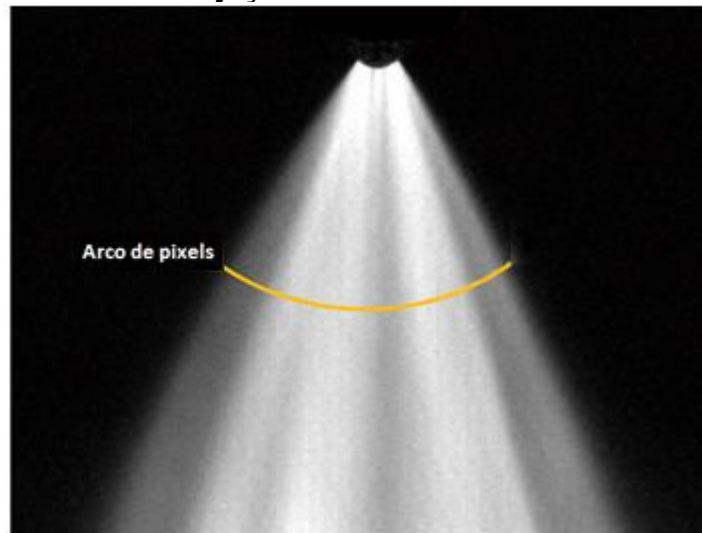
**Figura 35 – Valores em pixels do arco da Figura 34 em função do posicionamento angular.**



**Fonte: Autor.**

A partir da Figura 35, dadas as condições em que se assume a presença do *spray*, o ângulo de cone é definido pelo arco apresentado na Figura 36 para a distância de 5 mm da referência.

**Figura 36 – Ângulo de cone situado a 5 mm do injetor em uma imagem de injeção de Exxsol D60.**



**Fonte: Autor**

Com a localização das bordas, delimita-se a parte do arco situado entre elas e a variação de ângulo correspondente. O procedimento descrito é então repetido para

várias distâncias a partir do orifício do injetor, considerando um conjunto de sete imagens para obtenção de dados estatisticamente relevantes.

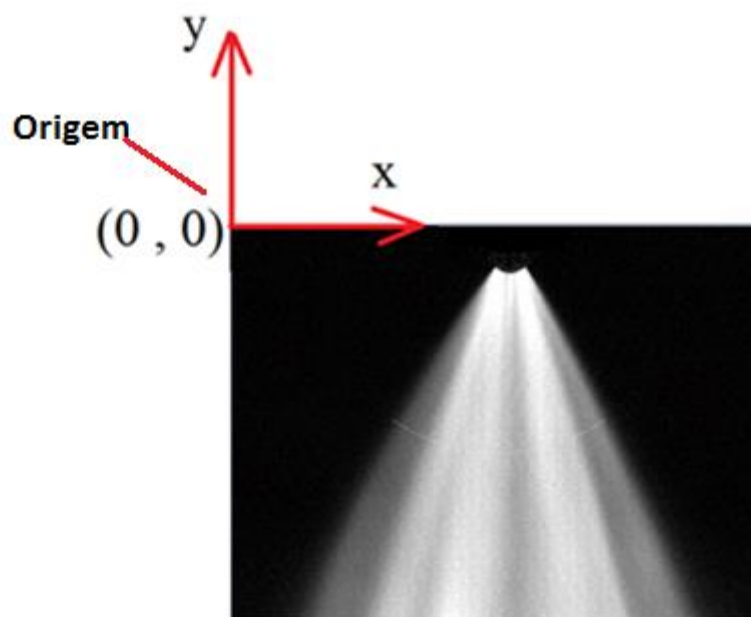
### 3.5.2. Penetração do spray

Para a medição automatizada das penetrações do spray fez-se, inicialmente, necessário o desenvolvimento de uma metodologia de identificação das bordas do spray, descrita com mais detalhes em (Guzzo. M, 2016).

O primeiro passo para o estabelecimento da metodologia para identificação das bordas do spray é a escolha da origem de um sistema de coordenadas cartesianas para as imagens. Uma posição da matriz numérica é escolhida para localização do ponto de posição  $x = 0$  cm e  $y = 0$  cm.

O pixel ou equivalentemente a posição de referência situada na extremidade superior esquerda da matriz associada à imagem foi escolhida para localizar a origem de um sistema de coordenadas cartesianas com valores positivos de  $x$  para a direita e valores negativos de  $y$  para baixo. A Figura 37 mostra a localização deste sistema em uma imagem obtida da injeção de EXXSOL D60 a 100 bar em um tempo aproximado de 1,2 milissegundos após o início da injeção.

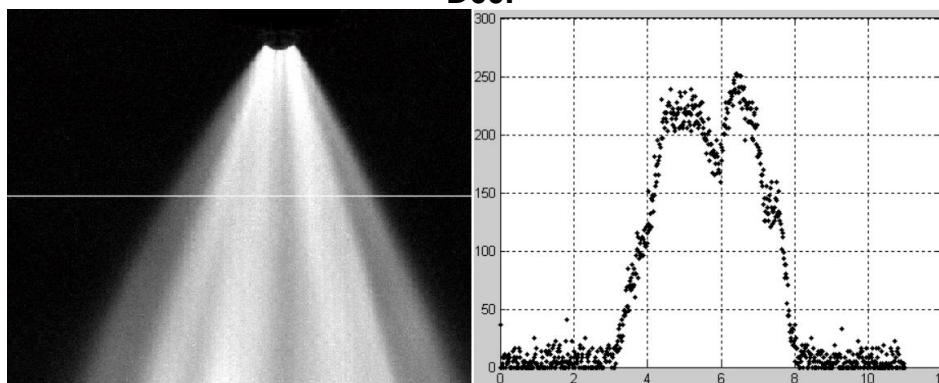
**Figura 37 – Origem do sistema de coordenadas para as imagens da Injeção de EXXSOL D60.**



Fonte: Autor

Para a identificação das bordas dos *sprays*, o procedimento adotado foi a análise dos perfis lineares horizontais de pixels. O Matlab permite a obtenção manual deste tipo de perfil. No entanto, para melhor controle, para assegurar a direção horizontal do perfil e para a obtenção dos perfis de maneira automatizada em diferentes posições, uma rotina computacional criada no Matlab foi usada para a análise dos perfis horizontais. A Figura 38 evidencia um destes perfis onde os valores dos pixels foram coletados. A linha branca horizontal na imagem do spray mostra a localização dos pixels cujos valores estão no gráfico à direita.

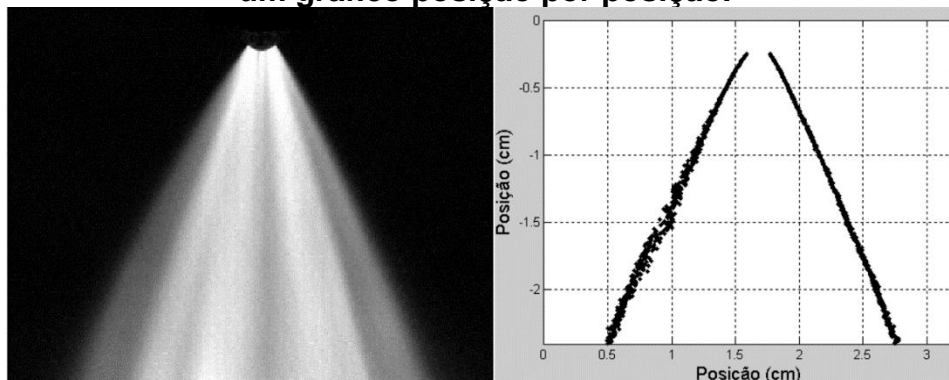
**Figura 38 – Perfil horizontal de pixel para uma imagem da injeção de EXXSOL D60.**



Fonte: Autor

Assim, com a obtenção de todos os pares  $(x, y)$  das bordas direita e esquerda o spray pode ser traçado em um gráfico posição por posição. A Figura 39 mostra um exemplo da identificação das bordas de um spray injetado a 100 bar para um tempo aproximado de 1,2 milissegundos após o início da injeção.

**Figura 39 – Imagem da injeção de EXXSOL D60 e a identificação das bordas em um gráfico posição por posição.**



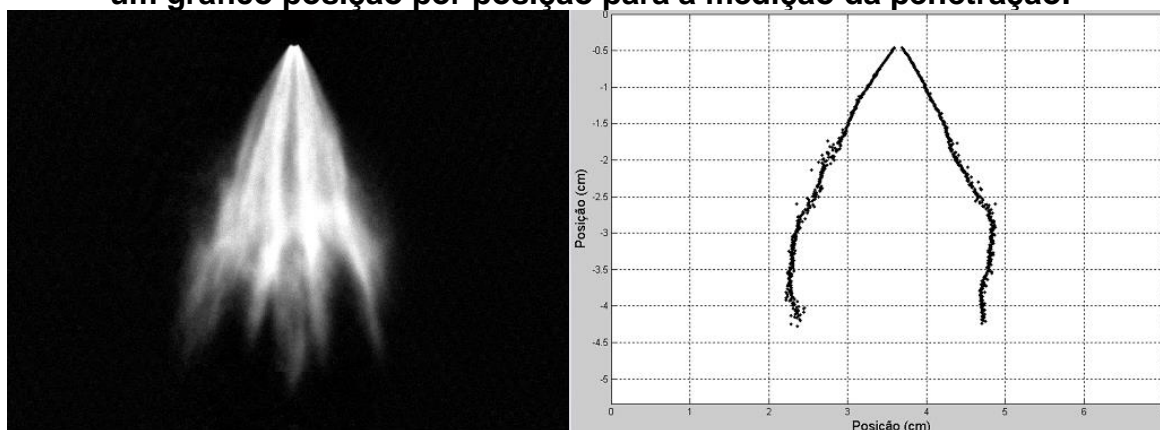
Fonte: Autor

Para avaliação da penetração do spray neste trabalho consistiu na observação de imagens sucessivas correspondentes ao início da injeção.

Com todos os dados de identificação das bordas calcula-se a diferença entre o máximo valor da posição  $y$  com o mínimo valor de posição  $y$  encontrado. O máximo valor  $y$  ocorre próximo ao orifício do injetor enquanto o mínimo valor  $y$  ocorre na região do spray mais afastada do orifício. Assim essa diferença representa o máximo deslocamento vertical do spray.

Utilizando como exemplo a Figura 40, o máximo valor  $y$  encontrado foi de  $-0,49$  cm próximo ao orifício do injetor enquanto o mínimo valor  $y$  encontrado foi de  $-4,4$  cm. Assim a penetração para o tempo específico de 1,2 milissegundos da imagem é 3,91 cm. Imagens para vários períodos de tempo após o início da injeção são então analisadas e um gráfico de distância máxima vertical percorrida pelo spray em função do tempo pode então ser construído, com isso obtém-se a penetração do spray.

**Figura 40 – Imagem da injeção de EXXSOL D60 e a identificação das bordas em um gráfico posição por posição para a medição da penetração.**



Fonte: Autor

### 3.6. PDA Configuração experimental

A técnica PDA foi usada para a caracterização microscópica do *spray* de Exxsol D40, porque a utilização deste simulacro se fez necessária devido à natureza dos testes realizados. O fluido foi injetado no ar ambiente, passando com pressões de injeção relativamente altas (80, 100bar e 120bar), de forma que a utilização dos combustíveis em laboratório, não ocorreria com a segurança desejada. Assim, optou-se pela realização dos testes com o Exxsol D 40, visto que ele é menos inflamável

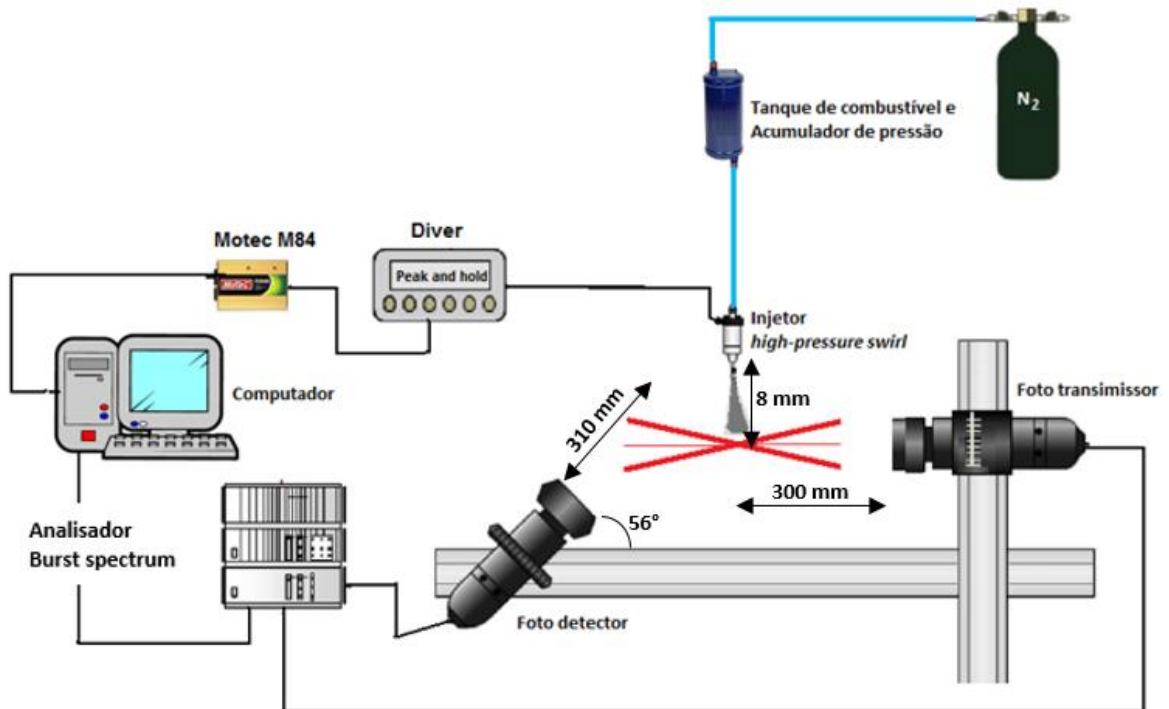
que os combustíveis e que possui propriedades semelhantes. As injeções ocorreram dentro de uma câmara retangular de acrílico, com uma abertura na parte inferior para escoamento e descarte do simulacro pós injeção.

O sistema, representado de forma esquemática na Figura 41, é composto por um laser de íon de Argônio (*Argon-ion*) - Dantec Dynamics A / S - com uma potência de saída de até 120 mW. O feixe de laser entra na célula de Bragg e na unidade separadora, onde este feixe é dividido em dois. A célula de Bragg desloca a frequência de um dos feixes por 80 MHz de modo a evitar ambiguidade direcional. Uma lente na óptica do foto-transmissor focaliza os dois feixes, que formam o volume de medição a uma distância focal de 300 mm.

O volume de medição, evidenciado na Figura 42, foi ajustado para o menor tamanho possível, a fim de minimizar o risco de ruptura de divisão (*burst splitting*) e outros eventos de partículas múltiplas (Payri et al, 2008) e (Strakey et al, 1998). Uma lente frontal com uma distância focal de 300 mm foi montada na óptica de recepção para focalizar a luz difusa do volume de medição nos detectores. O fotodetector foi colocado a 310 mm do volume de medição com um ângulo de 56 °. Os sinais luminosos detectados passam através de fibras ópticas e atingem a unidade de processamento de sinal onde os fotomultiplicadores transformam os sinais luminosos em sinais de tensão, os quais podem ser processados. Informações adicionais relacionadas à configuração do PDA estão descritas na Tabela 4.

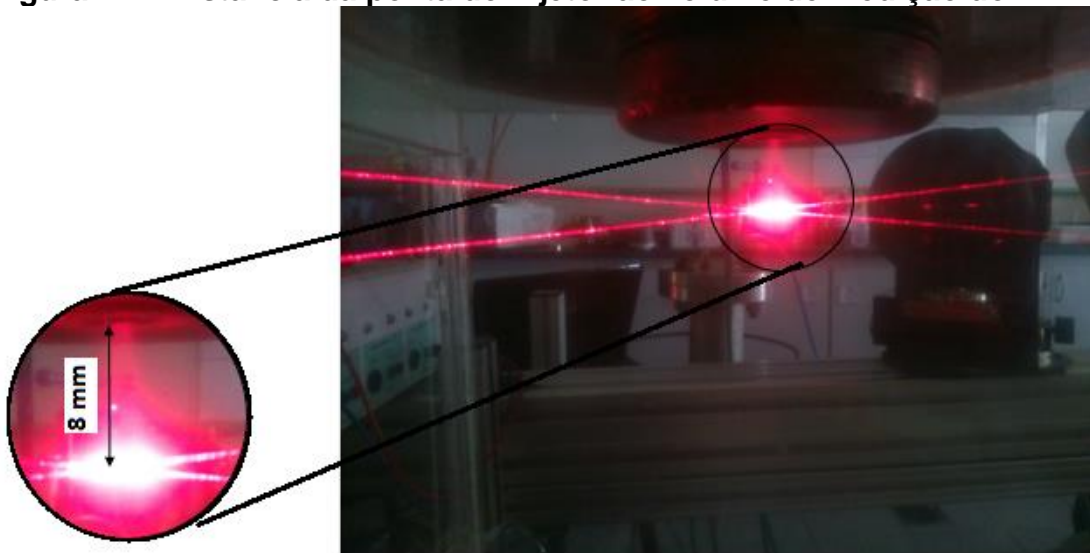
Considerando a taxa de dados obtida e o (*burst efficiency*), o ponto de medição dos experimentos do PDA foi determinado a uma distância de 8 mm da ponta do injetor, como observado na Figura 42 como resultado de que a velocidade da gota e o diâmetro das gotas são adquiridos ao mesmo tempo nos mesmos pontos. Para cada teste, foram obtidos dados validados até 2.000 amostras e repetidos cinco vezes para permitir resultados consistentes para análise, totalizando em amostras de velocidade e diâmetros de gotas de 10.000 partículas.

Figura 41 – Desenho esquemático aparato experimental.



Fonte: Autor

Figura 42 – Distancia da ponta do injetor ao volume de medição do PDA.



Fonte: Autor

Para analisar a tendência geral do processo de atomização (velocidade das gotas e diâmetro das gotas) sob as duas pressões de injeção do trabalho (80 e 100bar), os dados adquiridos foram calculados em conjunto em todas as injeções



válidas e conseqüentemente todas as partículas válidas. O diâmetro da gotícula foi expresso com Diâmetro Médio  $D_{10}$  e com o Diâmetro Médio de Sauter (SMD, ou  $D_{32}$ ).

**Tabela 4 – Detalhes das configurações do sistema PDA**

<b>Laser</b>	Íon de Argônio ( <i>Argon-ion</i> )
<b>Potência</b>	120 mW
<b>Comprimento de onda do Laser 1</b>	660 nm
<b>Comprimento de onda do Laser 2</b>	785 nm
<b>Deslocamento de frequência (<i>Frequency shift</i>)</b>	80 MHz
<b>Diâmetro do volume de medição</b>	2,5 mm
<b>Distância focal transmissor</b>	300 mm
<b>Distância focal receptor</b>	310 mm
<b>Polaridade da franja</b>	Positiva
<b>Modo de dispersão (<i>Scattering mode</i>)</b>	Refração

Fonte: Autor

A instalação experimental pode ser considerada esquematicamente composta de duas partes: o sistema de injeção DI (seção 3.3) e o sistema PDA.

### **3.6.1. Sistema PDA**

O aparato experimental para medições PDA é mostrado na Figura 41, é constituído por:

- Laser de Íon Argônio;
- Sonda de transmissão;
- Sonda de recepção;
- Processador de aquisição de dados;
- Programa de aquisição e pós-processamento de dados.

#### **3.6.1.1. Laser**

O laser de íons de Argônio é um dispositivo óptico que usa íons de Argônio como meio de formação do laser. Aplicando uma tensão à célula de Argônio, os átomos são excitados com uma energia igual à energia de transição entre dois níveis

de energia. Como resultado, é obtido um feixe de luz vermelha, o laser emitido é focado *Fiber Driver*.

A *Fiber Driver* consiste em:

- Um separador de feixe neutro que separa o feixe de laser de entrada em dois feixes com a mesma intensidade através de um prisma;
- Uma célula de Bragg, que separa as frequências em de 80 MHz;
- Um separador de cor, divide cada feixe de laser que saí da célula de Bragg em dois feixes: o primeiro é vermelho com um comprimento de onda de 660 nm e o outro é um vermelho, bem mais claro, com um comprimento de onda de 785 nm.

Os quatro feixes resultantes são focados em fibras ópticas, os levando para a sonda de transmissão.

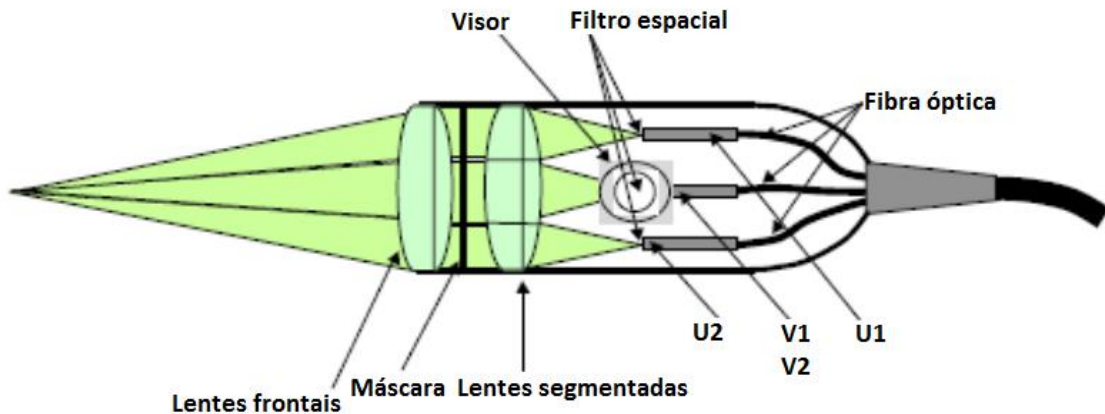
### **3.6.1.2. Transmissor**

A sonda de transmissão consiste em um conjunto óptico, que focalizam os quatro feixes de laser em um volume de medição e de um expensor de feixe que melhora a distância relativa entre estes feixes. As principais características da sonda são: distância focal de 300 mm, distância de 65 mm entre os feixes.

A sonda de recepção capta parte da luz espalhada pelas partículas quando atravessam o volume de medição e depois envia o sinal para os fotomultiplicadores através de quatro fibras ópticas. Os fotomultiplicadores são detectores extremamente sensíveis que multiplicam a corrente produzida pela luz incidente, permitindo até a detecção de poucos fótons mesmo quando o fluxo incidente de luz é muito baixo. Os principais componentes da sonda receptora apresentados na Figura 43, são:

- Lente acromática biconvexa;
- Máscara (*mask*);
- Filtro espacial (fenda).

**Figura 43 – Esquema da sonda receptora.**



Fonte: Adaptado de Dantec Dynamics Manual a92011).

A lente acromática biconvexa com um comprimento focal de 310 mm é um colimador é usada para coletar o sinal. O colimador converge o feixe em paralelo que é filtrado por uma placa com fendas apropriadas para separar o sinal dos quatro componentes enviados aos fotomultiplicadores: U1, U2, V1 e V2. Alterando a forma das fendas da placa e a dimensão é possível definir uma gama de medição do tamanho da gota. A jusante da máscara coloca-se uma lente que focaliza a luz em um filtro espacial (fenda) para um refinamento mais preciso da faixa de tamanho de gota, quatro valores de tamanho máximo de gotas podem ser selecionados como 25, 50, 100 e 200  $\mu\text{m}$ . A parte final da sonda é composta por quatro lentes (lente segmentada), que focam as porções de luz correspondentes na fibra óptica conectada aos fotomultiplicadores.

### **3.6.1.3. Analisador *Burst Spectrum* (BSA)**

O Analisador de espectro (*Burst Spectrum Analyzer* - BSA) é usado para processar o sinal que saí da sonda receptora e desta forma, medir o tamanho e a velocidade das gotículas. O BSA é uma CPU dedicada que estima o deslocamento de fase e frequência dos sinais Doppler dos fotomultiplicadores. Os sinais são detectados, processados e validados simultaneamente e continuamente. Especificamente, eles seguem dois caminhos. No primeiro, o sinal é filtrado através de um passa-banda para melhorar o SNR (taxa de sinal-ruído) e, em seguida, são enviados para o analisador de espectro. Após esta etapa, dois misturadores eletrônicos multiplicam os sinais de entrada por um sinal senoidal produzido através

de um oscilador, obtendo dois sinais de saída em quadratura. Os sinais, assim obtidos, são enviados a filtros passa-baixa para eliminar o ruído de alta frequência do sinal Doppler. Os conversores analógicos e digitais permitem a amostragem dos sinais que são processados pela transformada de Fourier.

No segundo percurso, um circuito mede o tempo de chegada e o tempo de trânsito do sinal no controle de *buffer*. Os sinais atravessam um filtro passa-baixa permitindo obter a base do sinal Doppler, um retificador e um segundo filtro passa-baixa produzem uma curva de cobertura do sinal Doppler. Quando os sinais de referência e de cobertura excedem um valor limiar, a amostragem é ativada e os tempos de partida e de trânsito são registados. Se a cobertura atinge posteriormente um limiar mais elevado, a amostragem começa novamente.

#### **3.6.1.4. Programa de aquisição de dados**

A aquisição e processamento de dados são gerenciados através do programa *Dantec Dynamics BSA Flow*, que permite a monitorização em tempo real dos resultados e a definição dos seguintes parâmetros de hardware:

- Frequência central e largura de banda para limitar a faixa de velocidade. Uma largura da banda reduzida pode excluir amostras úteis, enquanto um valor muito elevado pode causar a amostragem de falsos positivos;
- Fotomultiplicador de alta tensão. Tensões mais altas permitem detectar partículas ainda menores, mas podem saturar o sinal dos fotomultiplicadores;
- Ganho de sinal, que representa a amplificação do sinal Doppler. Um valor de ganho de sinal elevado aumenta o ruído, enquanto que um ganho pequeno pode determinar uma fraca amplificação de sinais pobres devido a partículas mais menores;
- Validação esférica, para discriminar as gotas que atravessam o volume de medição pelo sinal de ruído. Com base na hipótese de que as gotículas são aproximadamente esféricas, a razão entre as curvaturas das gotas em duas posições diferentes é estimada e mantida abaixo de um determinado limiar.

O programa permite controlar os sinais Doppler de cada fotomultiplicador, a taxa de dados e a taxa de validação da amostra.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a filmagem em alta velocidade, que são: a visualização do spray e comparação entre os injetores *high-pressure swirl* e *multi-hole* (seção 4.1), ângulo de cone do spray (seção 4.2), penetração do spray (seção 4.3), para todos os e na seção 4.4 os resultados das medições com o PDA, são mostrados nesta seção, os resultados da velocidade e distribuição de velocidades das gota, diâmetro de distribuição das gotas, velocidade média e diâmetros representativos das gotas em função da pressão de injeção, para o Exxsol D40.

### 4.1. Visualização do *spray*

Utilizando a filmagem em alta velocidade e a técnica *shadowgraphy*, foi possível capturar evolução do spray produzido pelo injetor *high-presseure swirl*, desde o início de sua abertura até seu fechamento. A Figura 44 mostra a sequência de quadros gerados no processamento de imagem para evidenciar apenas o *spray* de combustível no dado tempo de interesse, esse processamento é conhecido como subtração de imagem, explicado anteriormente e foi realizado em todas as imagens que possuem *spray* de todos os experimentos, onde as condições estão na Tabela 5. Como exemplo da Figura 44, foram usadas imagens do spray do fluido simulacro Exxsol D40, no tempo de 0,750 ms após a abertura do injetor (SOI), em contrapressão de 0 bar manométrica e pressão de injeção de 80 bar. Através das imagens subtraídas, pode-se avaliar o ângulo de cone e a penetração do spray.

Figura 44 – processo de subtração de imagens.



Fonte: Autor

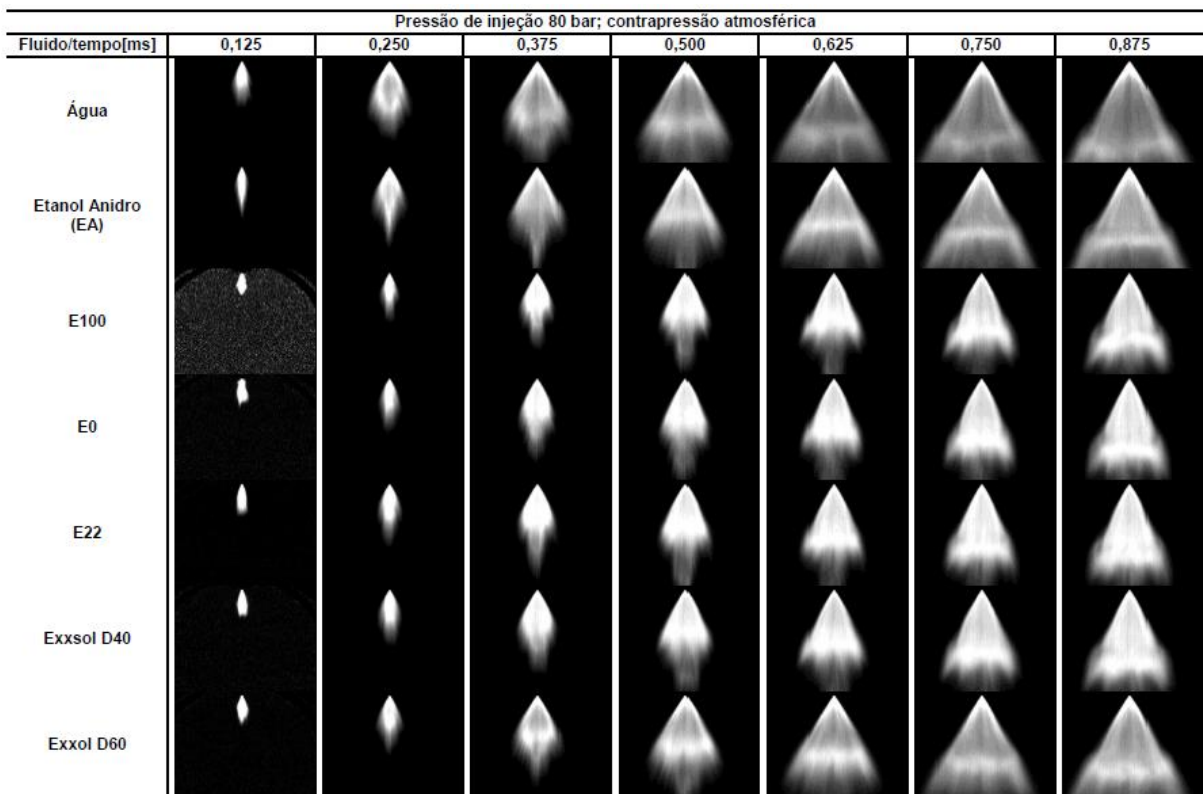
**Tabela 5 – condições de teste**

<b>Tempo de injeção [ms]</b>	1,50
<b>Pressão de injeção [bar]</b>	80 e 100
<b>Contrapressão ambiente[bar]</b>	0 e 10
<b>Frequencia de filmagem [Hz]</b>	8000
<b>Temperatura ambiente [°]</b>	23
<b>Pressão atmosférica [mbar]</b>	919
<b>Fluidos de teste</b>	H <sub>2</sub> O; EA; E100; E0; E22; Exxsol D40 e Exxsol D60

Fonte: Autor

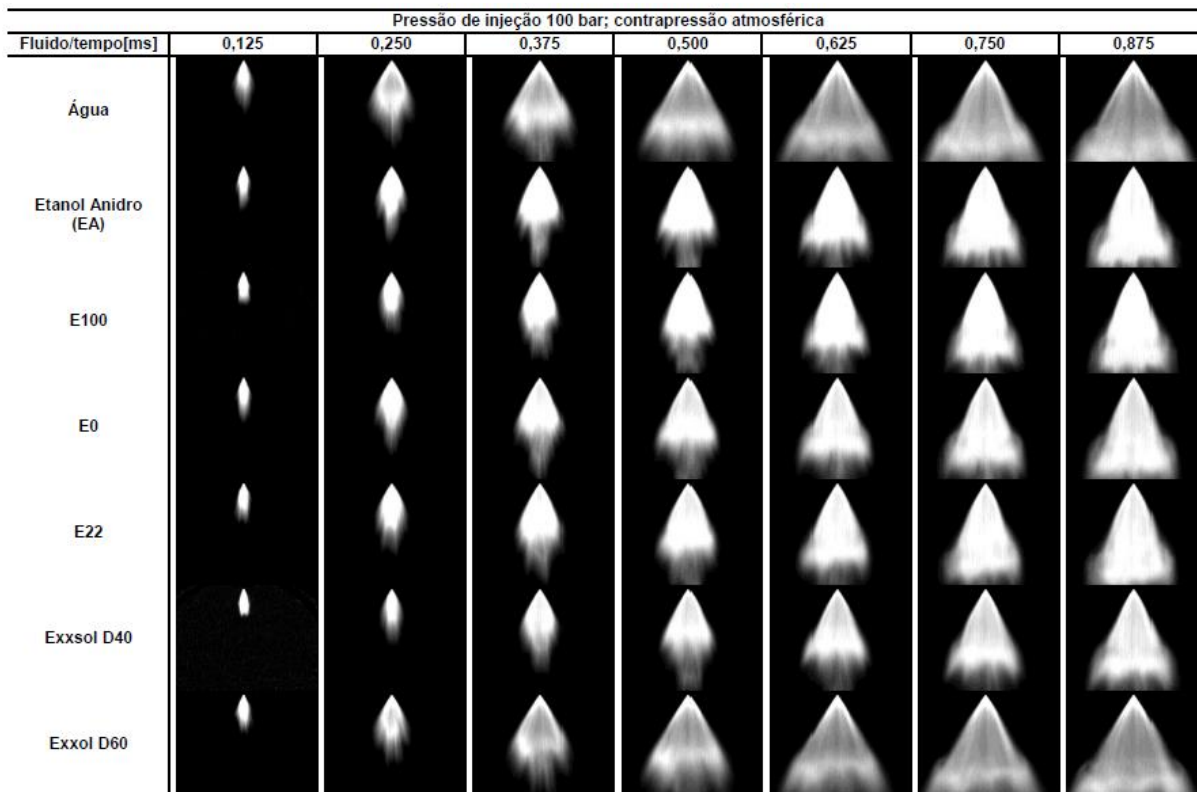
A Figura 45 e Figura 46 mostram a comparação das imagens do desenvolvimento dos *sprays* de água, etanol anidro, E100, E0, E22, Exxsol D40 e Exxsol D60, em temperatura ambiente, contrapressão de 0 bar e pressão de injeção de 80 bar e 100 bar, respectivamente.

**Figura 45 – Desenvolvimento dos *sprays* dos fluidos de teste no tempo à PI=80 bar e CP=0 bar.**



Fonte: Autor

**Figura 46 – Desenvolvimento dos *sprays* dos fluidos de teste no tempo à PI=100 bar e CP=0 bar.**



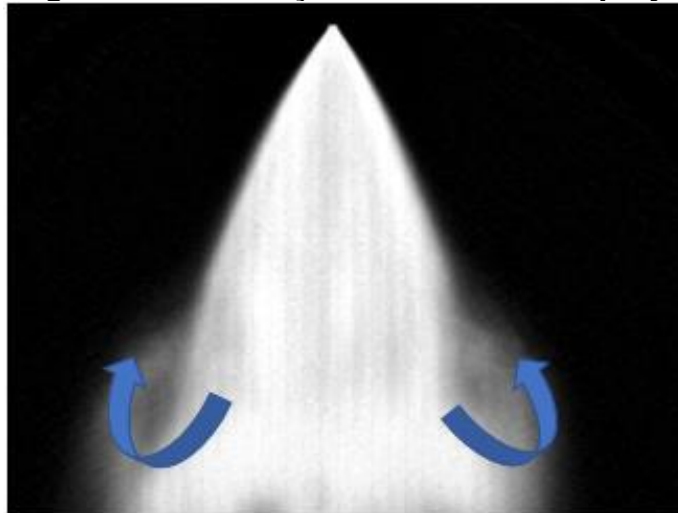
Fonte: Autor

As imagens das Figura 45 e Figura 46, qualitativamente, indicam que os padrões de desenvolvimento do spray dos combustíveis (E100, E0 e E22) e do Exxsol D40 são semelhantes para a pressão de injeção de 80bar, na pressão de injeção de 100 bar essa semelhança se mantém, juntamente com o spray do etanol anidro.

Pode-se notar que um *spray* de cone oco de ângulo aberto é formado no caso de baixa pressão ambiente, observa-se também a formação de vórtices nas extremidades do *spray*, como mostrado na Figura 47, isto pode satisfazer a exigência de melhor atomização e ampla distribuição de espaço para a preparação de mistura homogênea de um motor. Vale lembrar que esta formação de vórtices no *spray* é altamente influenciada pelo escoamento de ar e pelas estruturas presentes no escoamento dentro do cilindro.

Visualmente não se percebe alterações na penetração e no ângulo de cone devido ao aumento da pressão de injeção, logo deve-se fazer uma análise mais criteriosa e quantitativa.

**Figura 47 – Formação de vórtices no *spray*.**



Fonte: Autor

Em contraste com isto, um padrão de *sprays* mais compacto, em relação aos *sprays* de injetados em pressão ambiente, é apresentado nas Figura 48 e Figura 49, que representam a evolução do *spray* no tempo, para os fluidos de teste e pressões de injeção de 80 e 100 bar a uma contrapressão de 10 bar.

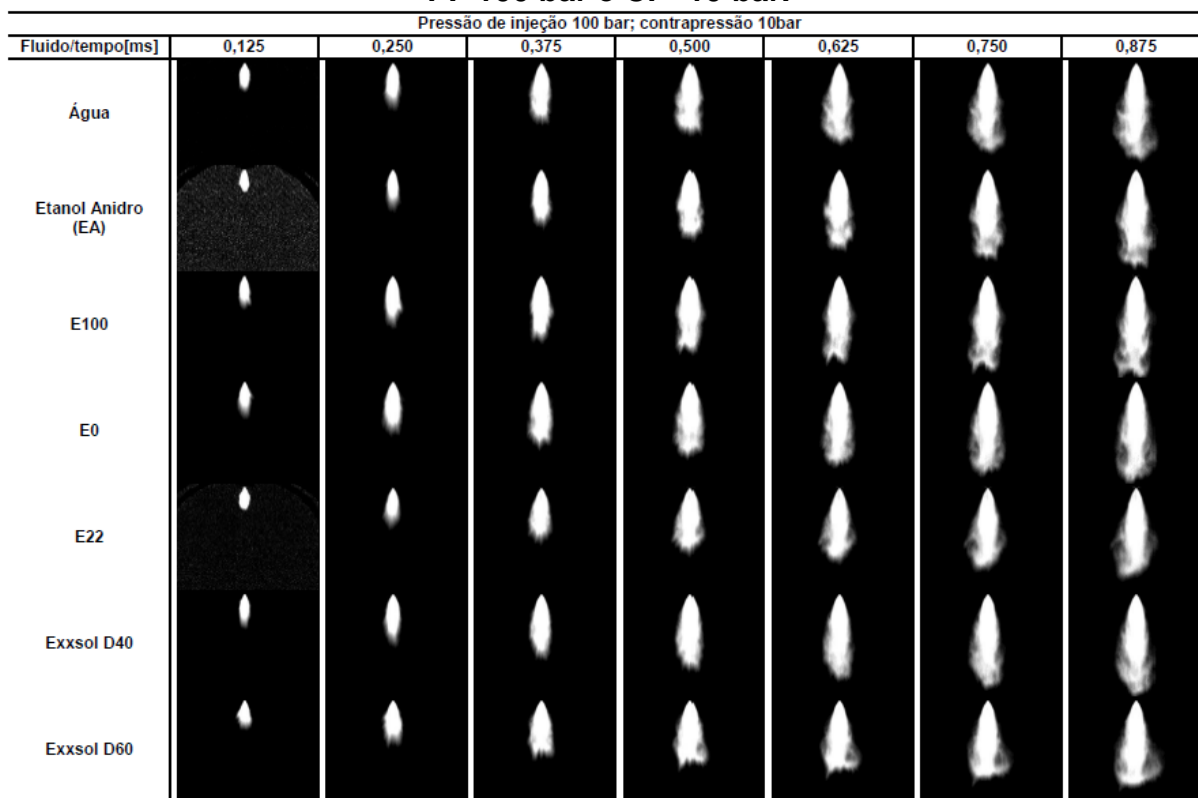
**Figura 48 – Desenvolvimento dos *sprays* dos fluidos de teste no tempo à PI=80 bar e CP=10 bar.**

Fluido/tempo[ms]	Pressão de injeção 80 bar; contrapressão ambiente 10bar						
	0,125	0,250	0,375	0,500	0,625	0,750	0,875
Água							
Etanol Anidro (EA)							
E100							
E0							
E22							
Exxsol D40							
Exxol D60							

Fonte: Autor



**Figura 49 – Desenvolvimento dos *sprays* dos fluidos de teste no tempo à PI=100 bar e CP=10 bar.**

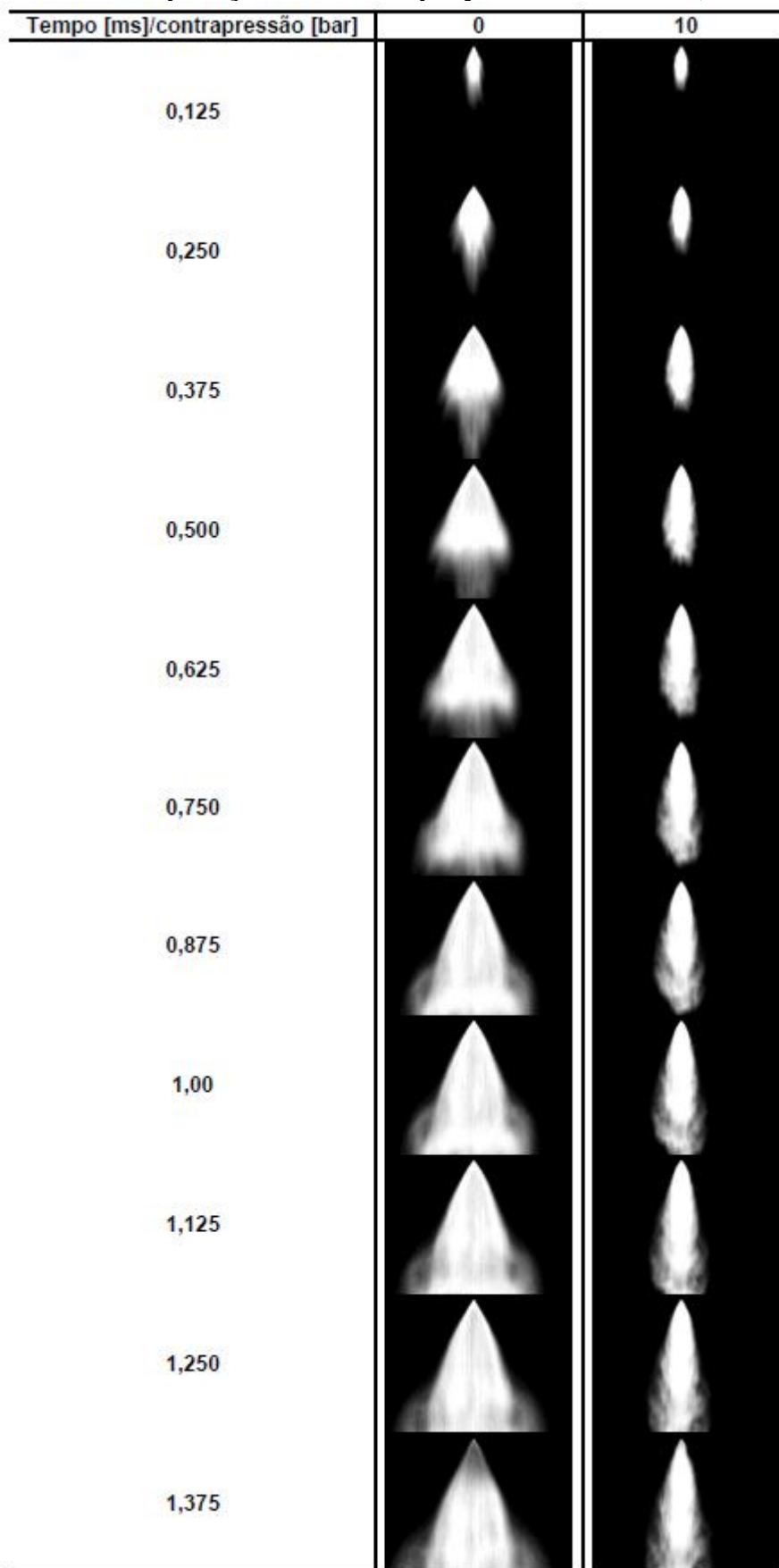


Fonte: Autor

Qualitativamente, as imagens demonstram que os padrões de desenvolvimento dos *sprays*, produzidos pelos fluidos testes, são semelhantes sob os efeitos da contrapressão ambiente. Logo, percebe-se que com o aumento da contrapressão, a resistência do gás ambiente no spray também aumenta e tanto a penetração quanto o ângulo de cone diminuem. O spray compactado e com penetração reduzida, devida a contrapressão ambiente, é favorável à formação de mistura estratificada e é favorável a evitar o molhamento das paredes do cilindro e do pistão pelo *spray* de combustível.

Com o aumento da contrapressão, a velocidade inicial do spray diminui. Este aumento da contrapressão leva a um aumento da resistência no spray e retarda o movimento do spray dentro da câmara, diminuindo a penetração e compactando o mesmo. As imagens da Figura 50 mostram que os padrões do spray são bastante diferentes sob diferentes contrapressões ambientes.

Figura 50 – Comparação entre os *sprays* de Exxsol D40; PI=80 bar.



Fonte: Autor

Sob a contrapressão de 0 bar manométrica, o spray se espalha em um ângulo de cone mais aberto. A razão é que, após um certo período de desenvolvimento do spray, um elevado número de gotículas se evaporam e desaparecem, visto que a resistência do gás na câmara é bem menor. Em contraste com isto, sob alta contrapressão (10 bar), o spray é denso e com um cone quase sólido de ângulo bem reduzido se forma, o spray se distribui em uma área menor. Os dois vórtices em sentido oposto também ocorrem com uma alta contrapressão, mas a posição dele está na parte do meio e na frente do spray e esses vórtices são confinados em pequeno volume. Resumindo, diferentes contrapressões ambientes resultam em diferentes características do desenvolvimento e estrutura do *spray*.

#### **4.1.1. Comparação dos injetores *high-pressure swirl* e *multi-hole*.**

Os ensaios de injeção para comparação dos injetores, foram feitos com o intuito de verificar as diferenças do spray gerado por dois diferentes tipos de injetores, *High-pressure swirl* e o outro um injetor, *multi-hole*, ambos de injeção direta.

Os testes foram realizados segundo a Tabela 6.

**Tabela 6 – Condições de teste de comparação entre os injetores.**

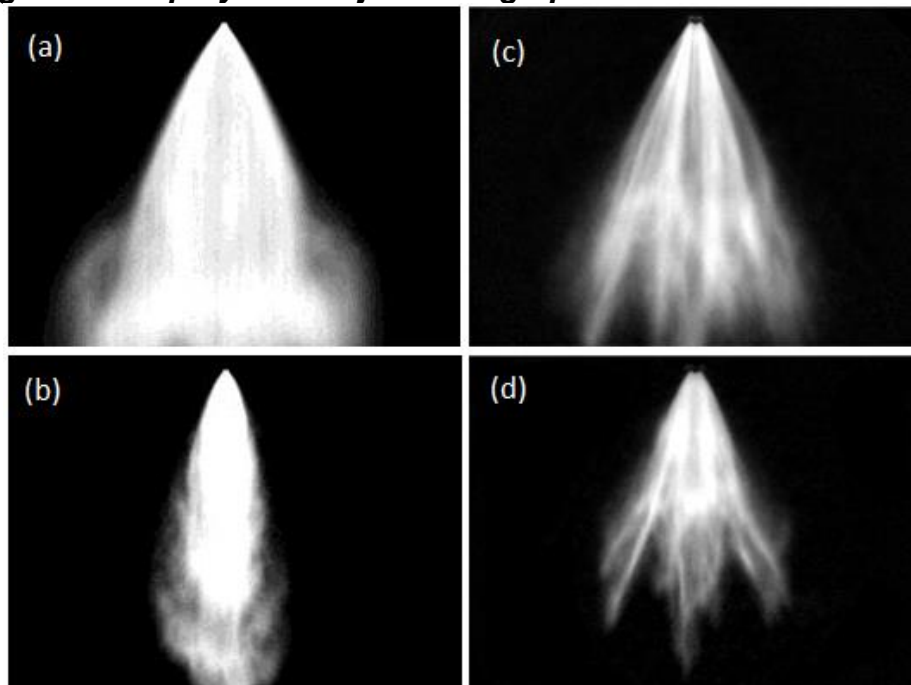
<b>Tempo de injeção [ms]</b>	1,50
<b>Pressão de injeção [bar]</b>	80
<b>Contrapressão ambiente[bar]</b>	0 e 10
<b>Frequencia de filmagem [Hz]</b>	8000
<b>Temperatura ambiente [°]</b>	23
<b>Pressão atmosférica [mbar]</b>	920
<b>Fluidos de teste</b>	Exxsol D40

Fonte: Autor

A Figura 51, mostra, de maneira qualitativa, o efeito da contrapressão ambiente nos padrões dos *sprays* formados pelos injetores. As imagens dos *sprays* correspondem ao tempo de 1,00 ms após o início da injeção, para ambos os injetores, em contrapressão ambiente de 0 e 10 bar e pressão de injeção de 80 bar. As imagens (a) e (b) são os *sprays* do injetor *high-pressure swirl*, em contrapressão ambiente de 0 bar para a imagem (a) e de 10bar para a imagem (b). Já as imagens (c) e (d)

correspondem aos *sprays* do injetor *multi-hole* nas contrapressões de 0 e 10bar, respectivamente.

**Figura 51 – *Sprays* dos injetores *high-pressure swirl* e *multi-hole*.**



Fonte: Autor

Em comparação direta da Figura 51, verifica-se que o injetor *multi-hole* possui um controle maior na formação do spray sob contrapressão crescente da câmara e por isso é mais apropriado para tal aplicação. O injetor *high-pressure swirl*, a uma pressão ambiente maior diminui em largura, ou seja, o ângulo de cone do seu *spray* é visivelmente afetado pelo aumento da contrapressão, o que cria uma interação ar/combustível pobre e uma homogeneidade menos intensa. Esta é uma possível causa das emissões de fuligem devido aos  $\lambda$  locais mais ricos em algumas regiões e mais pobres em outras. Observa-se também a partir da Figura 51, que o injetor *multi-hole* apresenta uma deformação menor em seu formato e a diminuição de sua penetração, em contrapressões maiores, pode se tornar vantajosa devido à prevenção de emissões de MP, visto que assim diminui ou até mesmo evita o molhamento das paredes do cilindro e/ou do pistão.

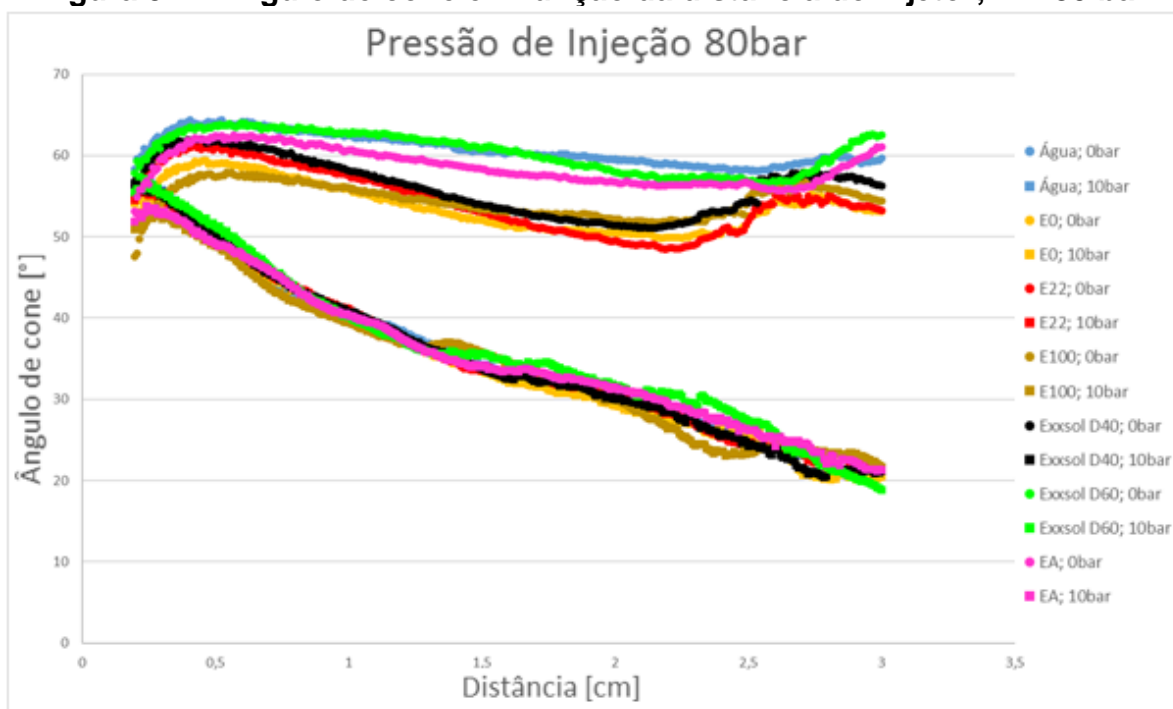
## 4.2. Ângulo de cone do *spray*

As medições do ângulo do cone para as pressões de injeção e contrapressões ambiente foram traçadas em função da distância para o *spray* em 1,0 ms depois do início da injeção. Os parâmetros de entrada para gerar os gráficos com os resultados foram a partir da distância inicial de 2,0 mm em relação ao ponto de referência escolhido no furo do injetor, a uma distância final de 30 mm desse mesmo ponto de referência e incrementos de pixel a pixel. Com isso há 326 dados de ângulo de cone para cada pressão de injeção e cada contrapressão. Todos os dados de ângulo de cone foram obtidos pela análise de 7 testes de injeção diferentes e então cada valor de ângulo nos gráficos é uma média de 7 medições.

O comportamento dos fluidos de teste: Água, Etanol Anidro e Exxsol D60, na pressão de injeção de 80 bar e contrapressão ambiente manométrica de 0 bar, são semelhantes e se destoa dos demais fluidos de teste, como mencionado, qualitativamente, na Figura 45 e pode ser observado, quantitativamente, na Figura 52.

Um aumento da pressão ambiente exerce uma grande influência no ângulo do cone e no formato *spray*, isso pode ser observado na Figura 52. Nota-se que o comportamento dos fluidos de teste são praticamente o mesmo para a contrapressão de ambiente de 10bar. Supõe-se que, devido à maior densidade do gás da câmara de teste, o escoamento de gás secundário é mais ativo em contrapressões ambiente maiores, causando uma redução mais elevada da componente radial da velocidade das gotas (diminuição do ângulo de cone), suportando o escoamento na direção axial dentro do cone oco.

Figura 52 – Ângulo de cone em função da distância do injetor; PI =80 bar.

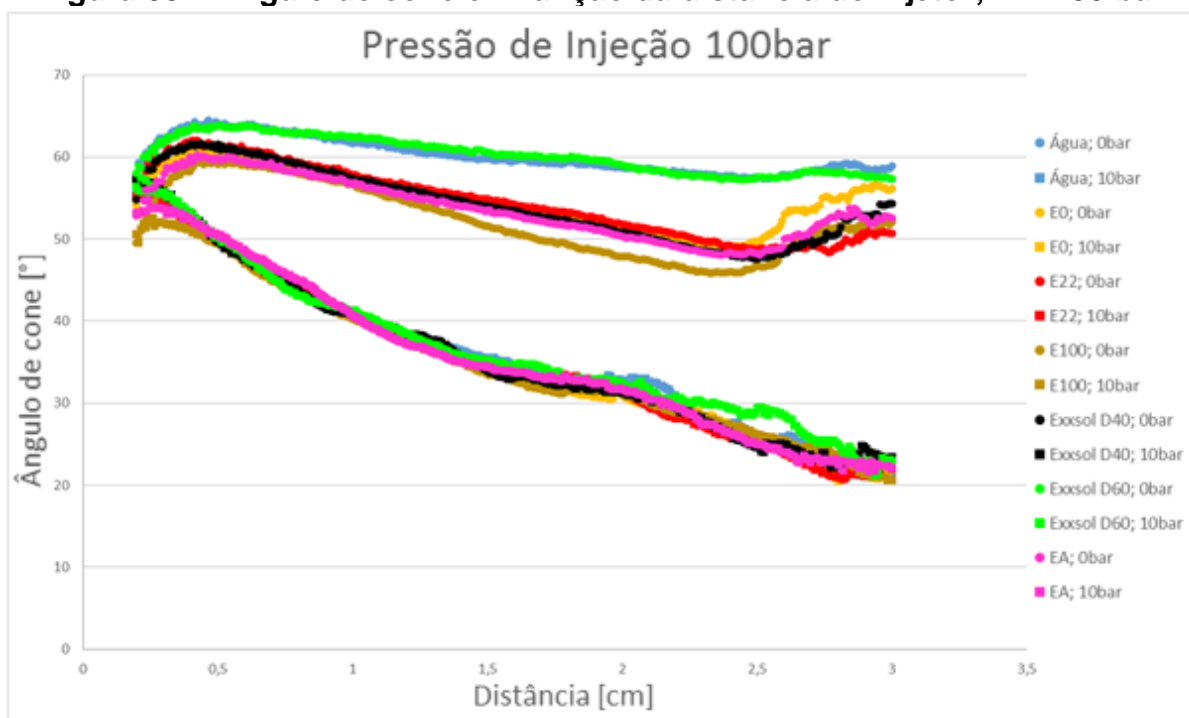


Fonte: Autor

Como observado na Figura 46, com a pressão de injeção de 100 bar e contrapressão de 0 bar, o comportamento do spray dos fluidos de teste não possui grande diferença entre eles, exceto pelos fluidos de teste Água e Exxsol D60. Já em contrapressão ambiente de 10 bar o comportamento dos *sprays* se iguala, como pode ser observado na Figura 53.

O procedimento de medição de ângulo de cone leva em consideração a curvatura dos limites das bordas externas dos *sprays* dos fluidos de teste. Para distâncias maiores a 4 mm do ponto de referência, a diminuição do ângulo do cone mostra que os limites dessa borda se curvam para dentro do cone oco em comparação à forma de um cone oco perfeito. A forma do cone perfeito é caracterizada com um ângulo constante em relação à distância, o que não acontece com os *sprays* dos fluidos testados.

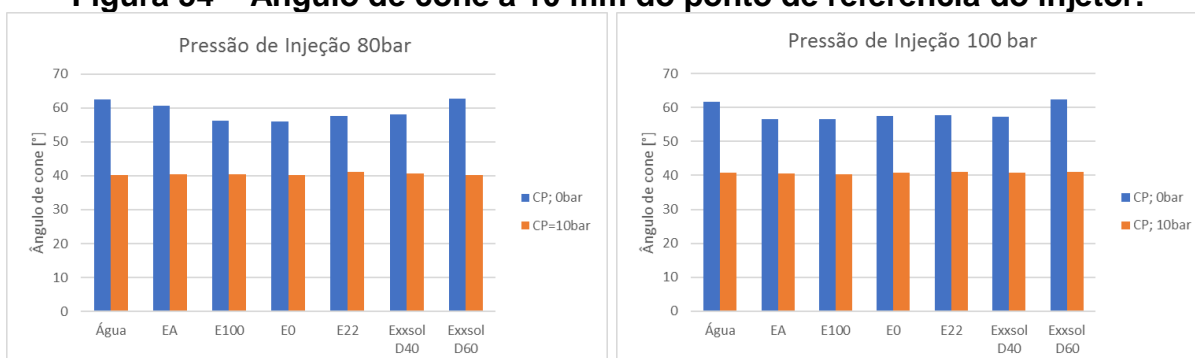
Figura 53 – Ângulo de cone em função da distância do injetor; PI =100 bar.



Fonte: Autor

Tomando-se a distância de 10 mm em relação ao ponto de referência na ponta do injetor, foi observado o efeito da contrapressão ambiente para as duas pressões de injeção (80 e 100 bar) nos ângulos de cone dos *sprays* dos fluidos de teste, Figura 54.

Figura 54 – Ângulo de cone a 10 mm do ponto de referência do injetor.



Fonte: Autor

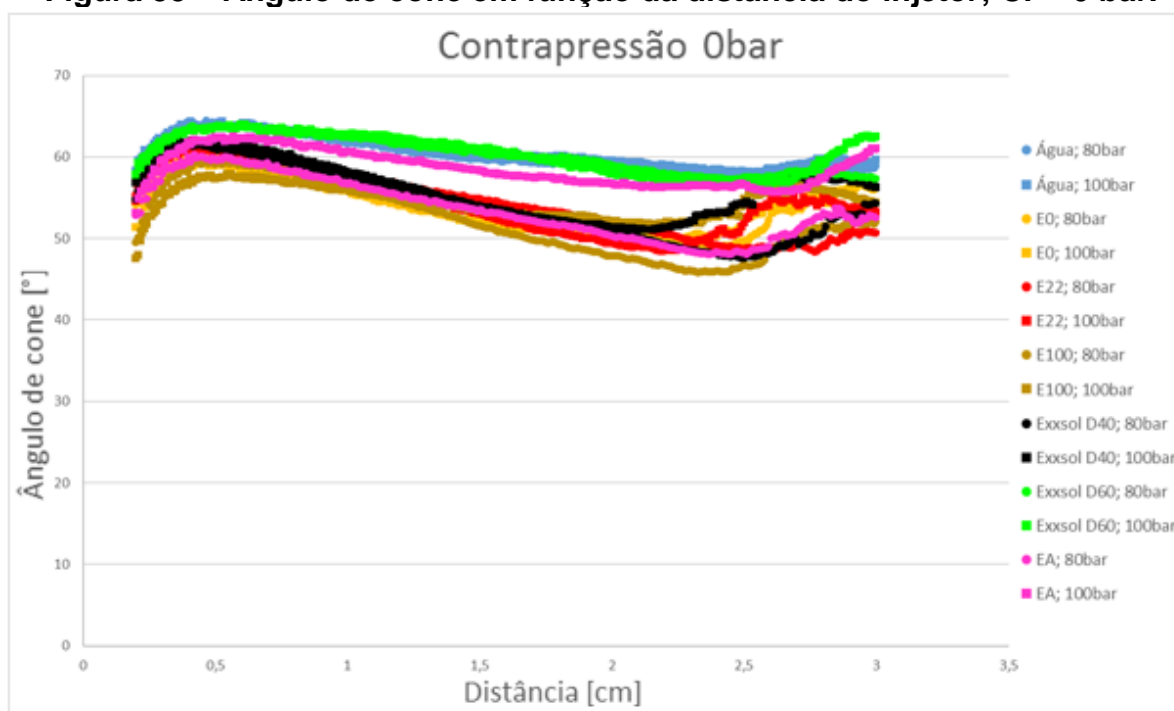
Na Figura 54 fica evidenciado o efeito do aumento da contrapressão ambiente (de 0 bar para 10 bar) no ângulo de cone do *spray*, para o injetor do tipo *high-pressure swirl*, tanto na pressão de injeção de 80 bar, quanto na pressão de injeção de 100 bar. Este comportamento não é vantajoso em relação ao uso deste tipo em motores DISI.

Dependendo do início da injeção, as pressões da câmara de combustão diferem suficientemente para produzir a gama de diferentes estruturas de spray e podem causar alterações significativas em relação à qualidade da formação da mistura.

Verifica-se que nenhuma diferença substancial no comportamento geral do ângulo do cone através da distância analisada é notada com a pressão de injeção, a não ser para o spray de Exxsol D60 em contrapressão ambiente de 0bar.

Duas regiões diferentes podem ser distinguidas fixando a contrapressão ambiente em 0 bar: na primeira região até aproximadamente 5,0 mm do ponto de referência na ponta do injetor, o ângulo do cone aumenta. O *break-up* ainda não está completo e o spray é caracterizado por grandes ligamentos e gotas com elevada quantidade de movimento. À medida que o jato penetra no ambiente circundante, a interação com o ar aumenta, o *break-up* ocorre e o ângulo de cone do spray aumenta. Na segunda região, maior que 5,0 mm, o *break-up* continua levando à formação de gotas menores e a uma diminuição de momentum. Nesta zona, o ângulo do cone é quase constante para a contrapressão de 0bar, em ambas as pressões de injeção e continua decrescendo para a contrapressão de 10 bar, nas duas de pressão de injeção. Comportamento pode ser observado nos gráficos da Figura 55 e Figura 56.

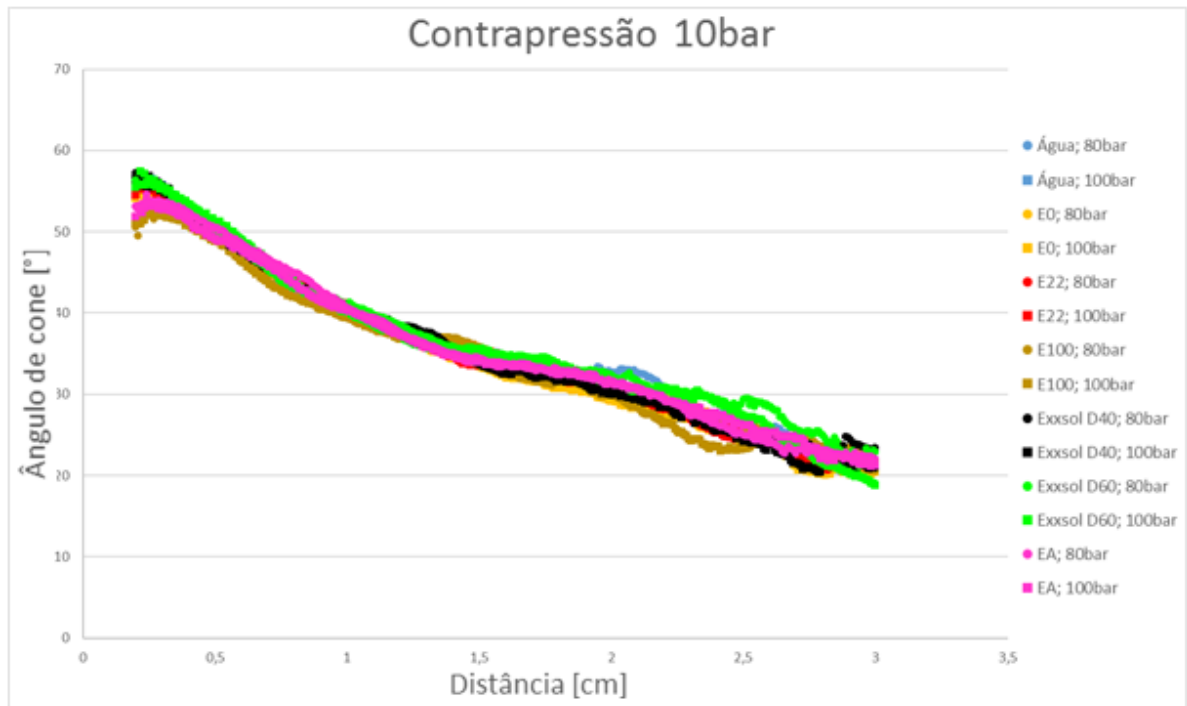
**Figura 55 – Ângulo de cone em função da distância do injetor; CP =0 bar.**



Fonte: Autor



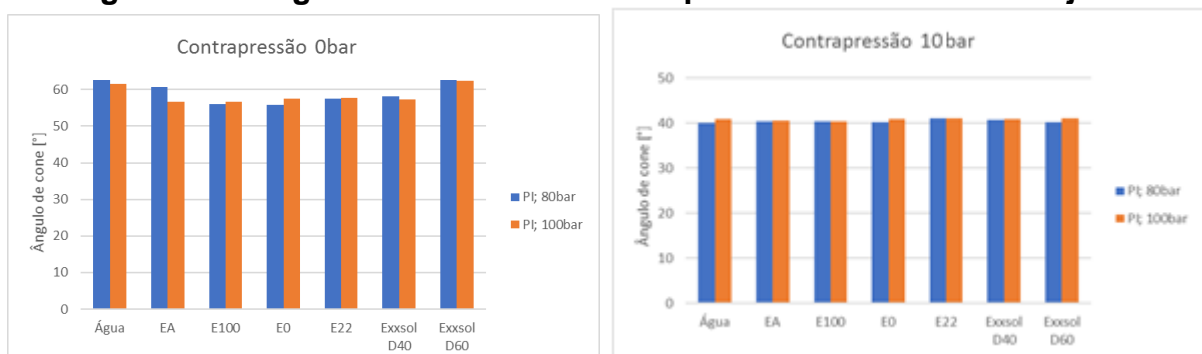
**Figura 56 – Ângulo de cone em função da distância do injetor; CP =10 bar.**



Fonte: Autor

A contrapressão ambiente de 10 bar se destaca por apresentar uma tendência mais homogênea nos valores de ângulo de cone entres os fluidos de teste e as pressões de injeção, em relação à contrapressão ambiente de 0 bar, isso pode ser melhor observado na Figura 57 em que foi usado o mesmo ponto de medição da Figura 54, porém avaliando o efeito da pressão de injeção no ângulo de cone do spray.

**Figura 57 – Ângulo de cone a 10 mm do ponto de referência do injetor.**



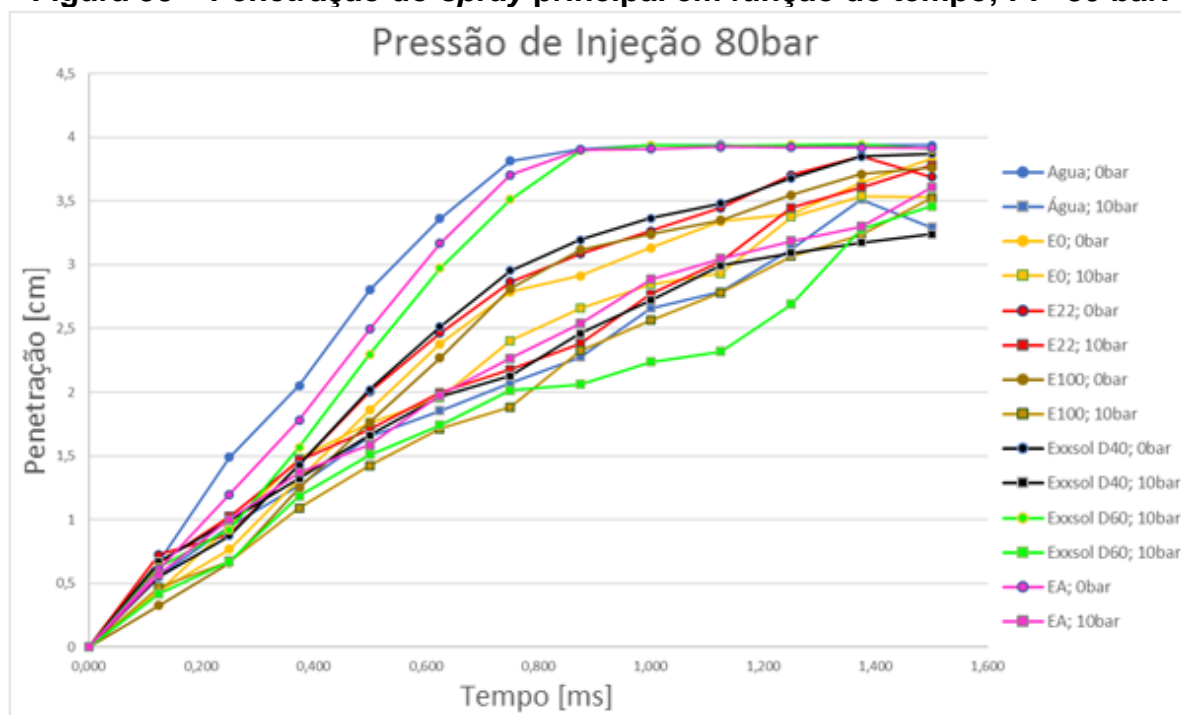
Fonte: Autor

### 4.3. Penetração do *spray*

Os resultados das medições do comprimento de penetração do *spray* são apresentados em gráficos, em função do tempo após o início da injeção a duas diferentes pressões de injeção e duas contrapressões ambiente para os fluidos de teste: Água, EA, E100, E0, E22, Exxsol D40 e Exxsol D60.

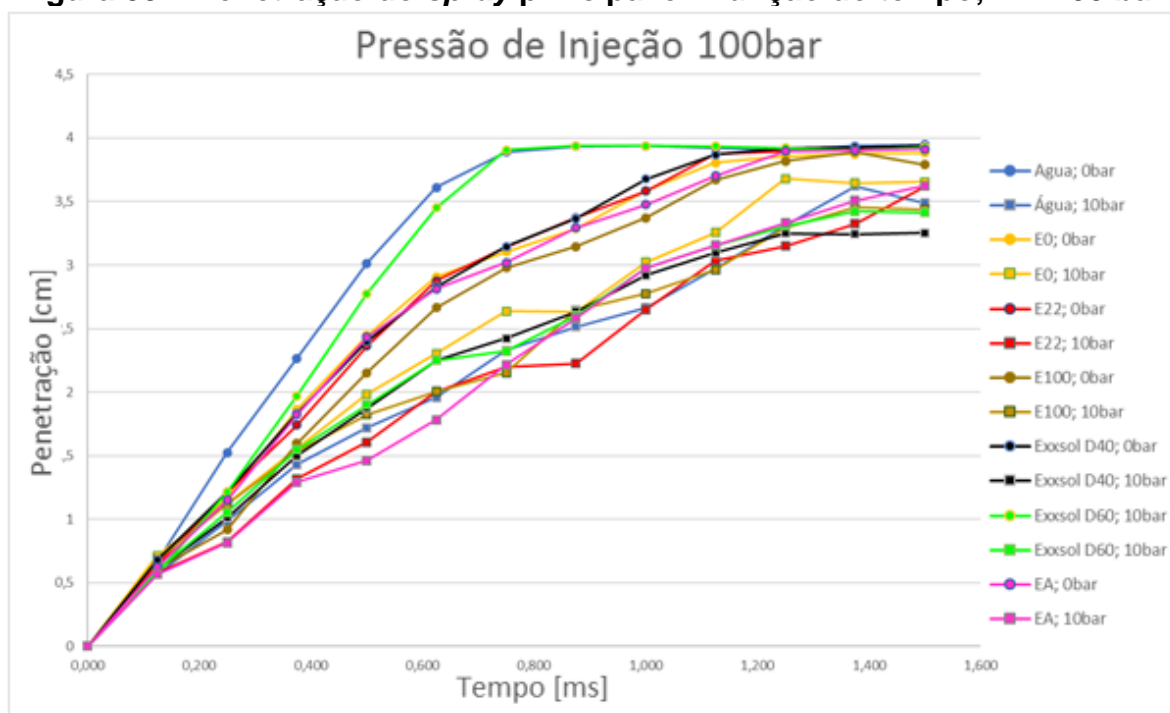
Os gráficos da Figura 58 e Figura 59 mostram o efeito da contrapressão ambiente sobre a penetração principal do *spray* à pressão de injeção de 80 bar e 100 bar, respectivamente. O desenvolvimento do *spray* também pode ser dividido em fase inicial (*pré-spray*) e fase principal. Na fase principal a penetração aumenta de forma linear com o tempo. Este fato pode ser observado para todos os fluidos de teste e contrapressão ambiente atmosférica (0 bar). Com o aumento da contrapressão, a resistência do gás ambiente sobre o *spray* aumenta e a penetração diminui.

**Figura 58 – Penetração do *spray* principal em função do tempo; PI =80 bar.**



Fonte: Autor

**Figura 59 – Penetração do *spray* principal em função do tempo; PI =100 bar.**

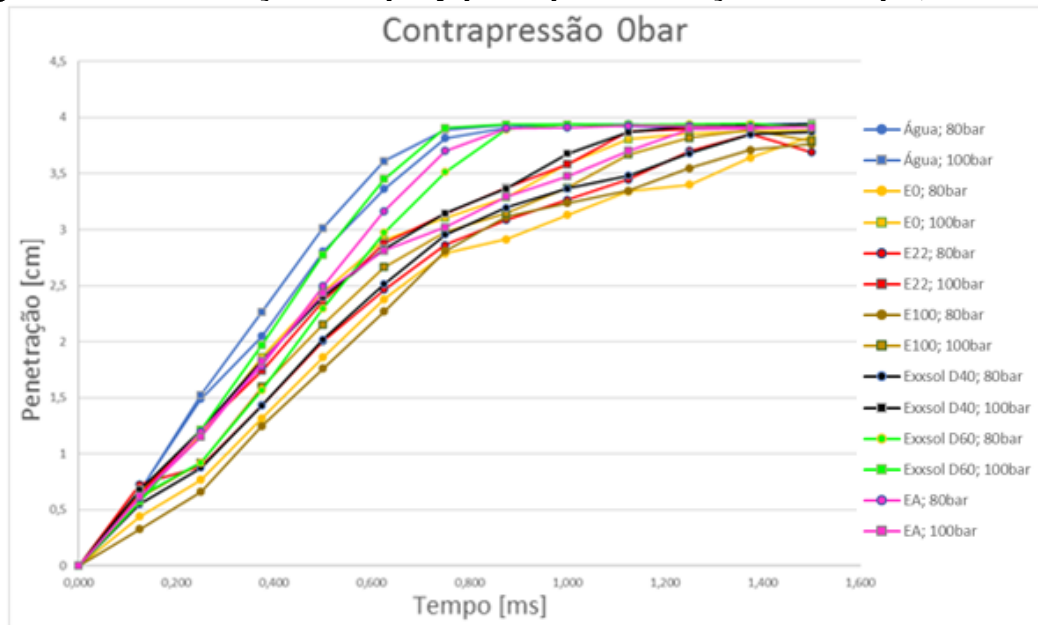


Fonte: Autor

Os fluidos Água, EA e Exxsol D60, apresentam a penetração do *spray* principal mais elevada que os demais fluidos, isso em contrapressão ambiente de 0 bar e nas duas pressões de injeção (80 e 100 bar). Tal comportamento foi observado com a visualização do *spray* e no ângulo de cone do *spray* também. Isto acontece devido à evaporação das gotas do *spray* - para os combustíveis e o Exxsol D40 - no decurso do seu desenvolvimento, o que leva a uma penetração decrescente em função do tempo da fase líquida desse *spray*.

O efeito da pressão de injeção sobre o comprimento de penetração é bastante evidente, Figura 60. A maior pressão de injeção induz uma maior velocidade do jato atomizado, portanto, tanto a energia cinética quanto o momentum são melhorados. À medida que a atomização prossegue, a energia cinética das gotas e o momentum diminuem gradualmente, devido à interação com o gás ambiente e, conseqüentemente, a influência da pressão é menos significativa, durante o desenvolvimento do *spray*.

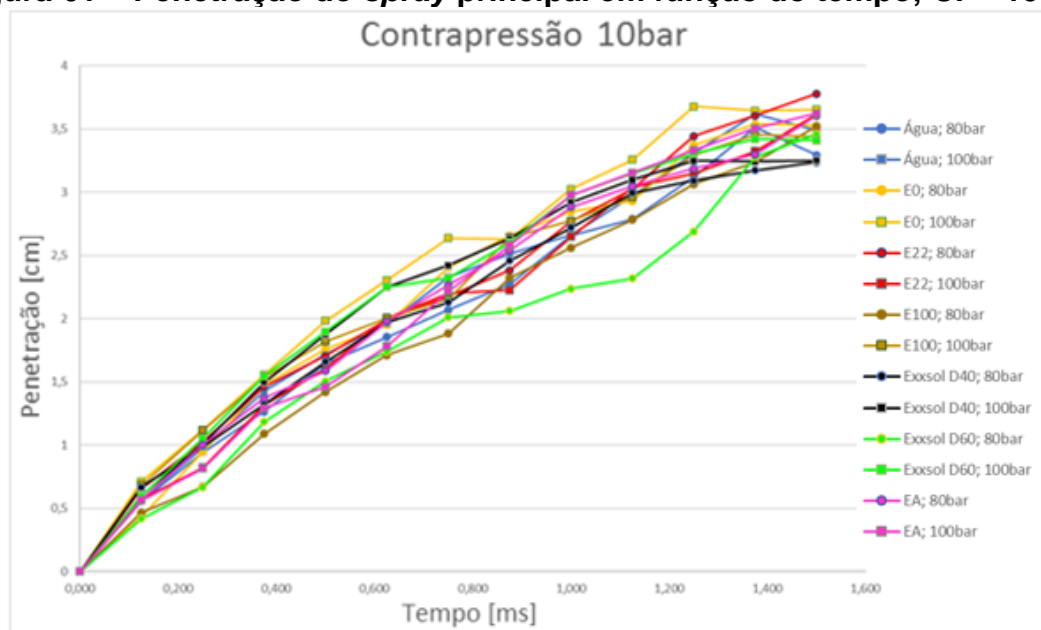
**Figura 60 – Penetração do *spray* principal em função do tempo; CP =0 bar.**



Fonte: Autor

Entretanto, com o aumento da contrapressão ambiente de 0 para 10 bar a diferença entre as pressões de injeção avaliadas não fica tão evidente, como pode ser observado na Figura 61. Nota-se uma pequena diferença da penetração do *spray* principal em função do aumento da pressão de injeção, mas a o efeito da causado pelo o aumento da densidade do gás ambiente é mais acentuado.

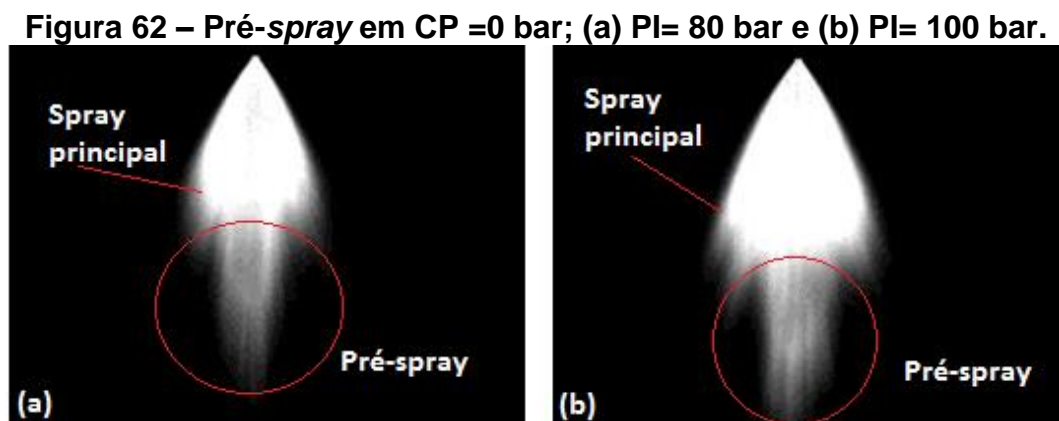
**Figura 61 – Penetração do *spray* principal em função do tempo; CP =10 bar.**



Fonte: Autor

Como mencionado anteriormente, o desenvolvimento do *spray* pode ser dividido em duas fases: a fase muito curta e transitória no início da injeção (*pré-spray*) e a fase de estado estacionário correspondente à maior parte da duração da injeção.

À medida que a injeção começa, uma quantidade de combustível residual da injeção anterior que fica aprisionada nas fendas tangenciais (de geração de *swirl* que ficam dentro do injetor), flui com velocidade e quase sem quantidade de movimento angular e forma uma espécie de *spray* de cone sólido com ângulo de cone mais estreito que o ângulo do *spray* principal e gotas grandes, por isso é chamado de *pré-spray*. O Figura 62 mostra claramente esta estrutura.

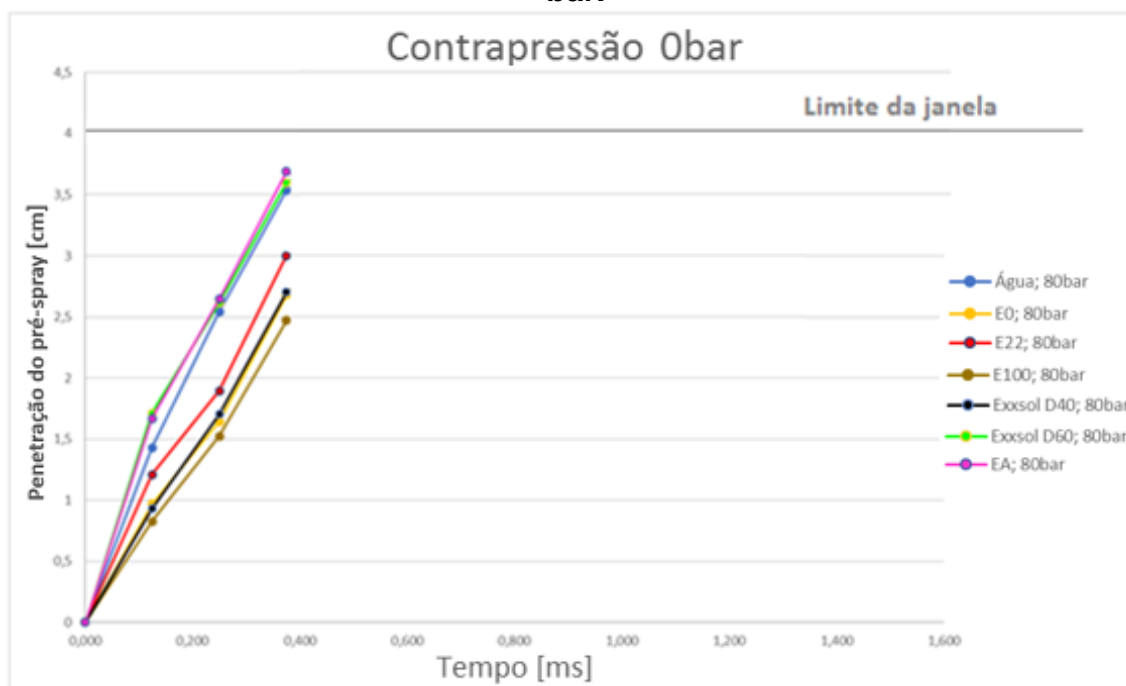


Fonte: Autor

Como exemplo, a Figura 62 mostra a presença do *pré-spray*, no *spray* de Exxsol D40 para as pressões de injeção de 80 e 100 bar e contrapressão atmosférica. Esse tipo de estrutura é típico de *sprays* gerados por atomizadores do tipo *swirl*, como o injetor *high-pressure swirl*. Com a contrapressão ambiente de 10 bar o *pré-spray* não é formado.

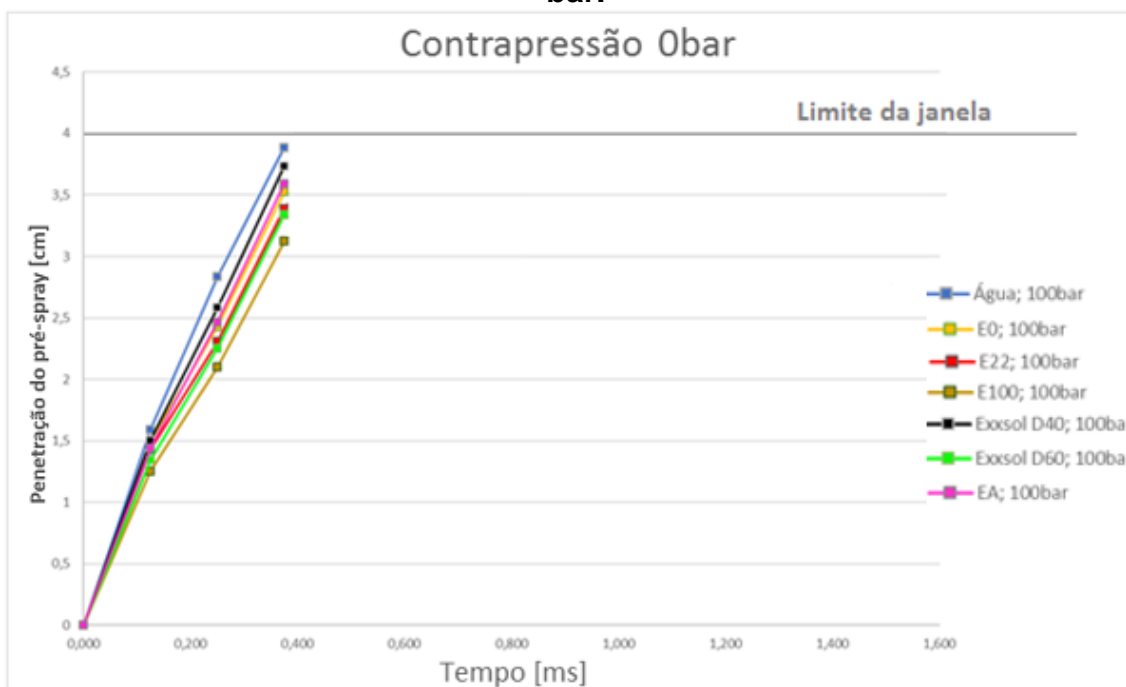
Durante a fase inicial (*pré-spray*) a penetração do *spray* aumenta rapidamente ao longo do tempo. Nos gráficos da Figura 63 e Figura 64 é mostrado a penetração do *pré-spray* para todos os fluidos de teste e seu desenvolvimento com o tempo. O número de amostras da penetração do *pré-spray* é menor que o número de amostras de penetração do *spray* principal, pois ele possui velocidades maiores e atingem o limite de visualização (limite da janela), impossibilitando a medição do comprimento de sua penetração.

Figura 63 – Penetração do pré-spray em função do tempo CP =0 bar; PI= 80 bar.



Fonte: Autor

Figura 64 – Penetração do pré-spray em função do tempo CP =0 bar; PI= 100 bar.



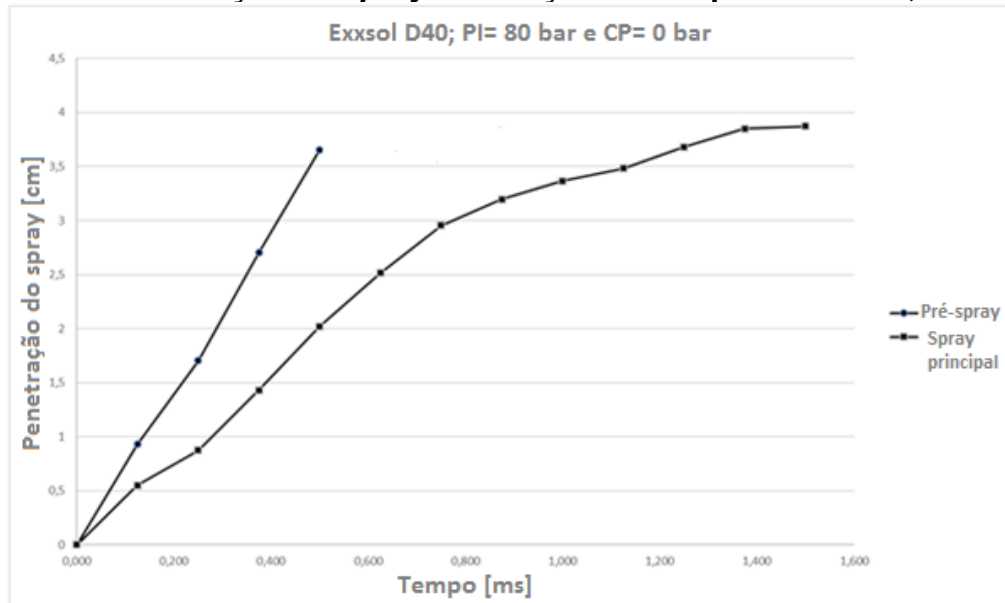
Fonte: Autor

Com os gráficos consegue-se perceber que a penetração do pré-spray também sofre influência da pressão de injeção e segue a mesma tendência da penetração do spray

principal, ou seja, aumentando-se a pressão de injeção, aumenta-se também a penetração do pré-*spray*.

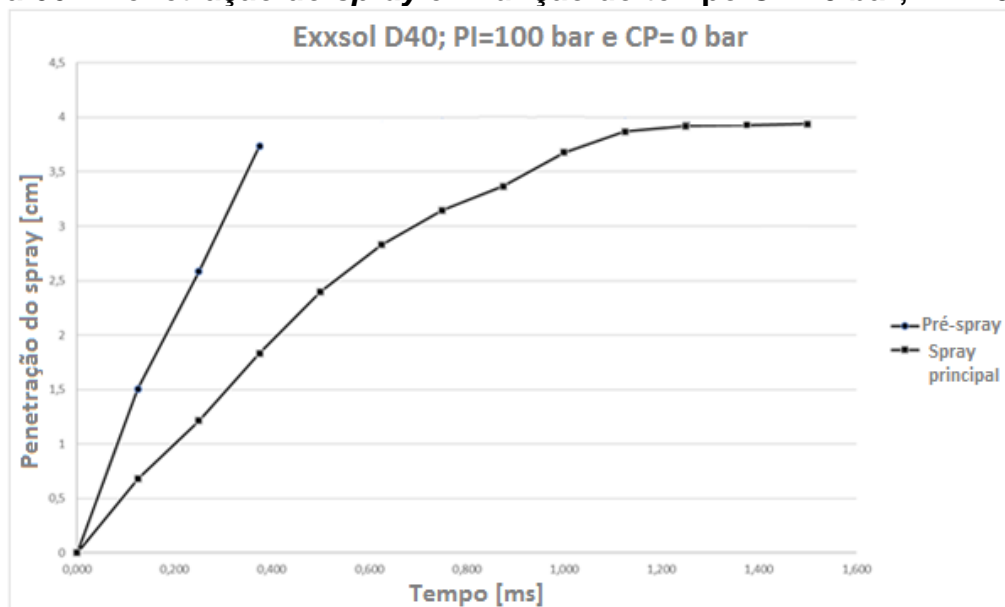
Nos gráficos das Figura 65 e Figura 66, onde são exemplos de penetração do *spray* (incluindo a penetração do pré-*spray* e penetração do *spray* principal) para o fluido de teste Exxsol D40, em contrapressão atmosférica e nas pressões de injeção de 80 e 100 bar, respectivamente.

**Figura 65 – Penetração do *spray* em função do tempo CP =0 bar; PI= 80 bar.**



Fonte: Autor

**Figura 66 – Penetração do *spray* em função do tempo CP =0 bar; PI= 100 bar.**



Fonte: Autor

Verifica-se que o pré-*spray* possui uma velocidade de penetração bem maior que a velocidade do *spray* principal, já que o pré-*spray* percorre uma distância maior em menos tempo que o *spray* principal, em ambas as pressões de injeção. Isso pode acarretar problemas de formação de mistura e aumento da variabilidade cíclica do motor, causados por exemplo pelo molhamento de parede do pistão e do cilindro em motores DISI, através do toque do pré-*spray* em tais componentes, dependendo da estratégia de injeção adotada. O pré-*spray* é uma característica inerente ao *spray* gerado pelo injetor *high-pressure swirl* e, portanto, deve-se conhecer muito bem os diferentes fatores que afetam a estrutura deste *spray*, evitando com isso, problemas causados por ele.

#### 4.4. Medições com o PDA.

Conforme descrito anteriormente, as medições com PDA foram realizadas em um ponto específico na borda do cone do *spray*, Figura 42. As condições dos testes para a avaliação da velocidade e dos diâmetros das gotas são apresentadas na Tabela 7.

**Tabela 7 – Condições de teste para as medições com o PDA.**

<b>Tempo de injeção [ms]</b>	1,50
<b>Pressão de injeção [bar]</b>	80 e 100
<b>Contrapressão ambiente[bar]</b>	0, aberto para a atmosfera
<b>Número de ensaios</b>	5
<b>Temperatura ambiente [°]</b>	23
<b>Pressão atmosférica [mbar]</b>	920
<b>Fluidos de teste</b>	Exxsol D40

Fonte: Autor

##### 4.4.1. Velocidade e distribuição de velocidades das gotas.

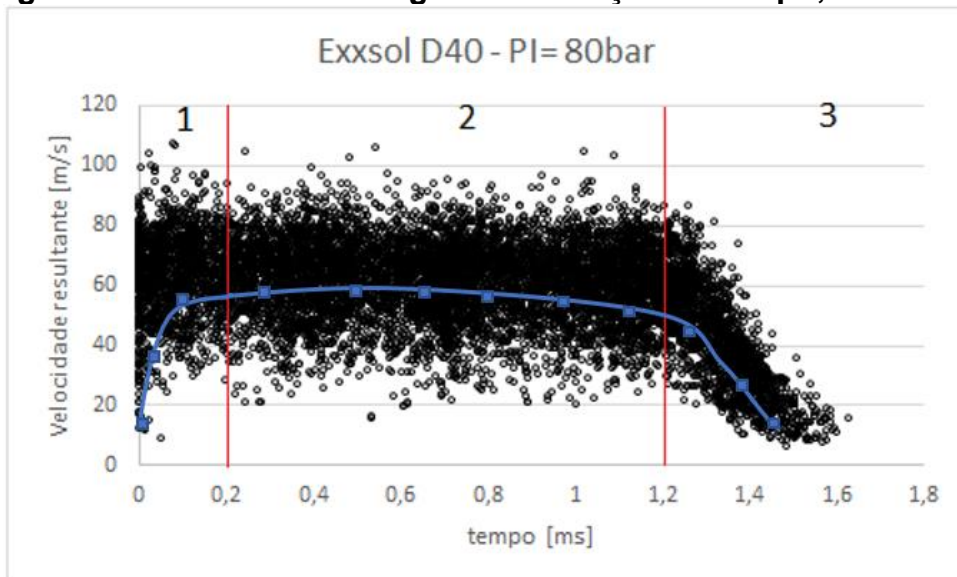
Os gráficos das Figura 67 e Figura 68 mostram os perfis temporais da velocidade resultante de cada gota, medida na borda do jato de Exxsol D40. O tempo de injeção foi ajustado em 1,5 ms nas pressões de injeção de 80 e 100 bar, respectivamente. Os resultados foram obtidos de amostra 2000 gotas por teste em 5 testes, totalizando 1000 gotas como amostra geral dos resultados.



Como esperado, os perfis de velocidade mostram uma forma semelhante nas duas pressões de injeção investigadas, (Li, 2013). Como verificado em Gomes et al, (2015), claramente percebe-se que a injeção possui três fases distintas, que são elas:

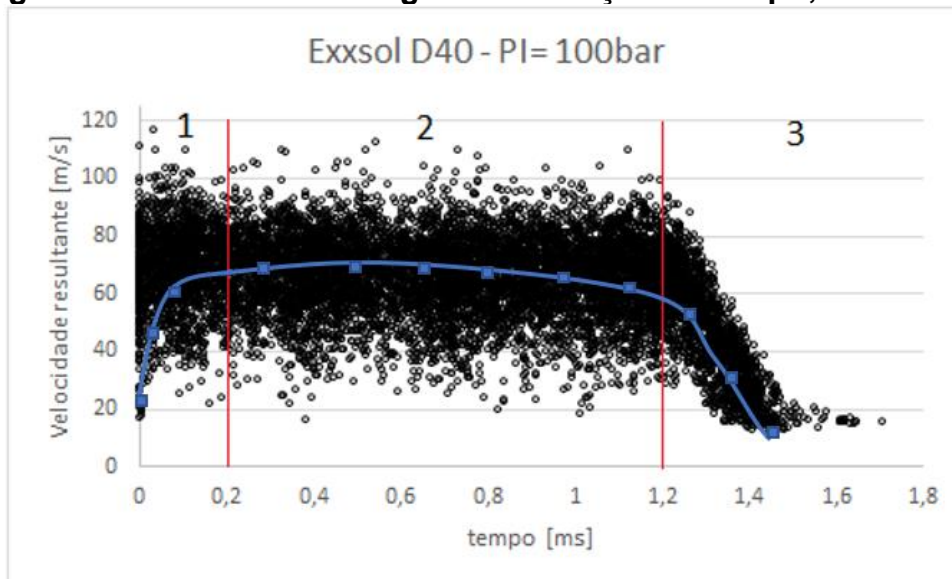
1. Fase inicial (elevação da agulha) correspondente ao estágio transitório do início da injeção. Esta seção é caracterizada pelos dados de velocidades aparentemente crescentes;
2. Fase estável (agulha completamente levantada). A velocidade é quase constante até o início da terceira fase;
3. Fase final (fechamento do injetor), devido ao fim da injeção. É detectada uma rápida redução de velocidade das gotas.

**Figura 67 – Velocidade das gotas em função do tempo; PI=80 bar.**



Fonte: Autor

**Figura 68 – Velocidade das gotas em função do tempo; PI=100 bar.**

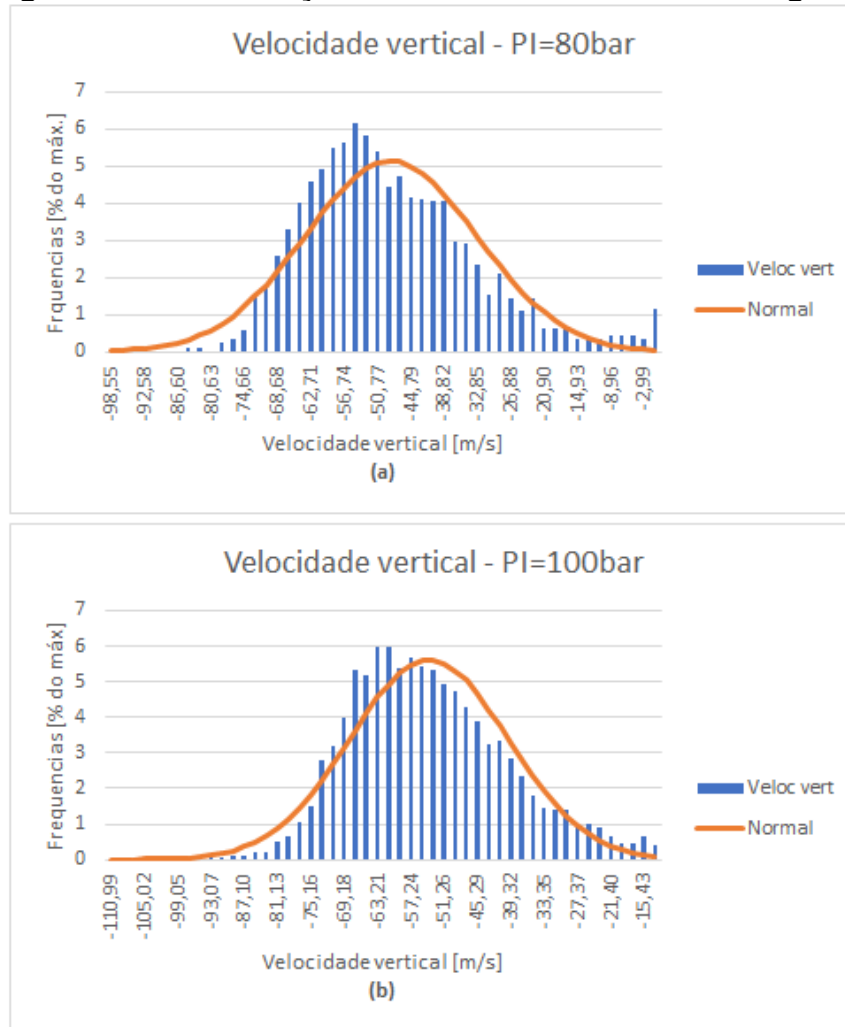


**Fonte: Autor**

As primeiras gotas que saem do injetor, localizadas na ponta do jato, são as primeiras a impactar com o ar e, portanto, perdem rapidamente a sua quantidade de movimento. As gotas seguintes são afetadas por um "efeito de reação", elas são injetadas no ar que está seguindo o primeiro movimento das gotas, assim o efeito da resistência do ar é reduzido e as gotículas penetram mais, isso antes da *break-up*, (Allocca et al, 2009). O *break-up* ocorre quando as gotas se quebram em gotas menores e o momentum é reduzido drasticamente. Tal comportamento é semelhante para os *sprays* de ambas as pressões de injeção. No entanto, nota-se que com o aumento da pressão de injeção aumenta-se, também, o pico da velocidade da gota, ou seja, no conjunto de amostras do *spray*, de pressão de injeção de 100bar, possuem gotas com velocidades máximas maiores que o conjunto de dados do *spray* de 80 bar de pressão de injeção.

As imagens das Figura 69 (a e b) e Figura 70 apresentam o histograma de distribuição das velocidades das gotas (componente vertical e componente horizontal) de Exxsol D40, nas pressões de injeção de 80 e 100bar e condições de testes citadas na Tabela 7.

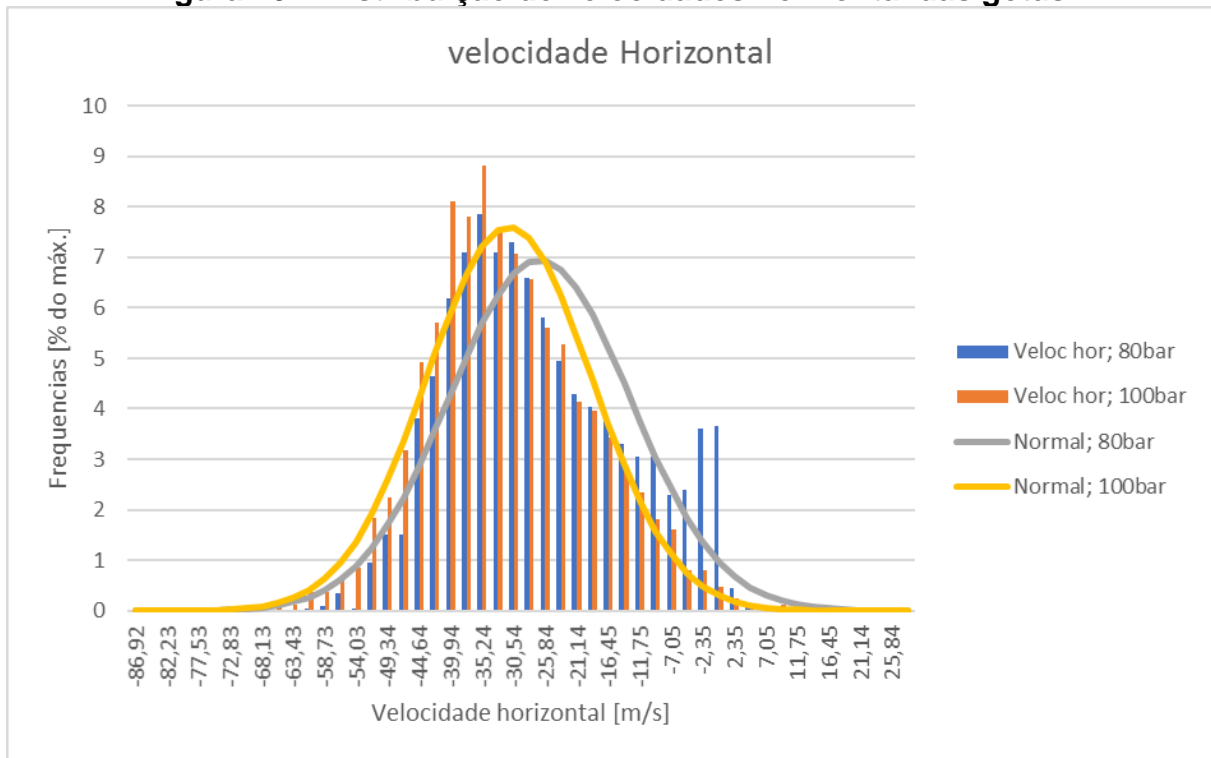
**Figura 69 – Distribuição de velocidades vertical das gotas.**



Fonte: Autor

Os histogramas da componente vertical das velocidades das gotas de Exxsol D40 podem ser vistos na Figura 69. O caso de pressão de injeção de 80 bar, Figura 69 (a), apresenta a distribuição normal centrada em -48,78 m/s e o caso de pressão de injeção de 100 bar Figura 69 (b), possui a distribuição normal centrada em -53,26 m/s. O sinal negativo indica o sentido do deslocamento das gotas do *spray* na direção vertical, neste caso o sentido é para baixo. Com isso percebe-se que, a pressão de injeção exerce um efeito, não somente na velocidade do *spray*, bem como na velocidade das gotas do *spray*. Para pressões de injeção maiores, tem-se gotas mais velozes e maiores frequências de gotas velozes que para pressões de injeção menores.

**Figura 70 – Distribuição de velocidades horizontal das gotas.**



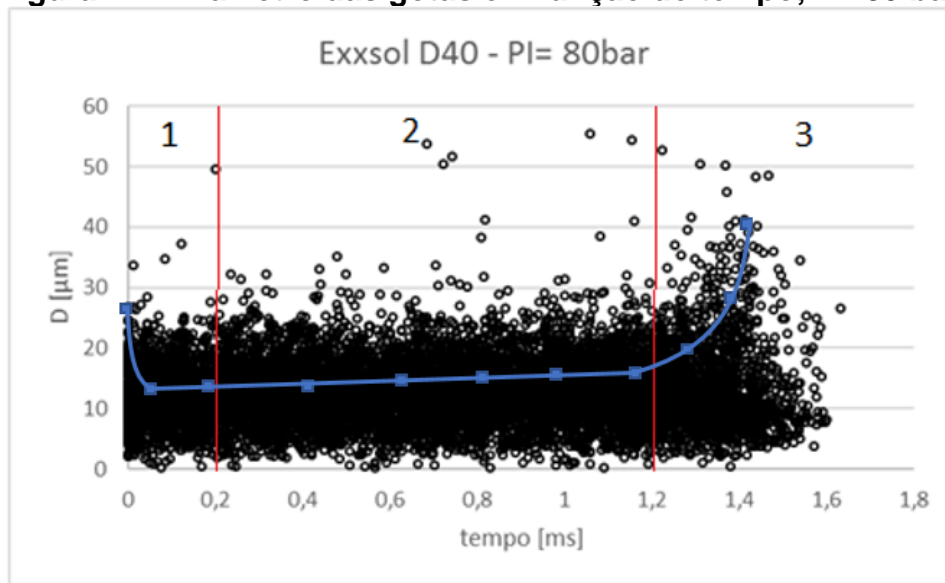
Fonte: Autor

Um comportamento análogo pode ser observado para a distribuição das velocidades horizontais, em que para maior pressão de injeção tem-se maior velocidade horizontal das gotas e maior frequência de gotas mais velozes, o que pode ser notado na comparação entre as velocidades da Figura 70. Com velocidades horizontais médias elevadas, na ordem de 35-40 m/s, indica que as gotas têm movimento rotacional, caracterizando o *swirl*, e que o mesmo é influenciado, também pela pressão de injeção.

#### **4.4.2. Diâmetro e distribuição de diâmetro das gotas**

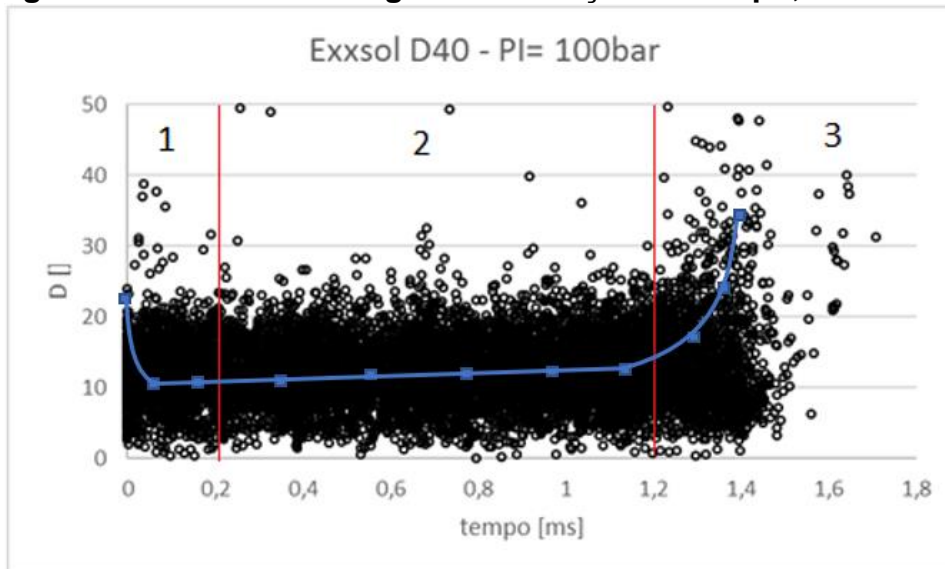
Os gráficos das Figura 71 e Figura 72 mostram os perfis temporais do diâmetro de cada gota, medida na borda do *spray* de Exxsol D40. Como as medições foram feitas, utilizando o PDA, os valores das velocidades e diâmetros de gotas são colhidos no mesmo instante para a mesma gota. Logo, a aquisição dos diâmetros das gotas e suas distribuições trata-se do mesmo experimento para a obtenção das velocidades de suas distribuições.

**Figura 71 – Diâmetro das gotas em função do tempo; PI=80 bar.**



Fonte: Autor

**Figura 72 – Diâmetro das gotas em função do tempo; PI=100 bar**



Fonte: Autor

Uma tendência oposta em relação aos perfis de velocidade foi encontrada para os diâmetros das gotas. Quanto a dispersão das gotas em função do tempo de injeção, identifica-se três secções diferentes da curva, dependendo dos estádios de injeção.

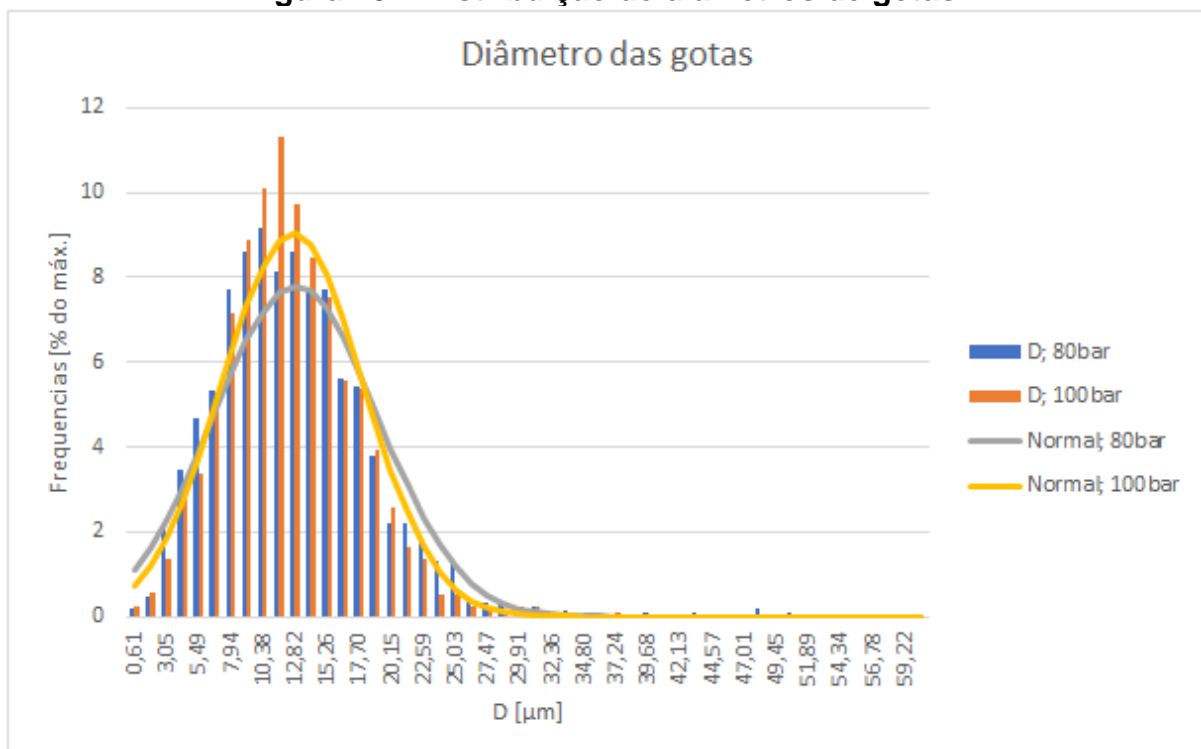
1. No início da injeção, os valores de diâmetro diminuem até um mínimo.
2. Depois, o tamanho das gotas mostra uma tendência crescente até um estágio quase constante, com valores quase constantes até o final da injeção.

3. Durante a fase transiente final, é registrado um aumento dos diâmetros das gotículas, após o fechamento do injetor.

Este fenômeno é provavelmente devido a fenômenos de coalescência que ocorrem quando a agulha abaixa, fechando o injetor, privando as gotas da pressão de injeção à montante.

Para as medições de Exxsol D40, o histograma de distribuição de partículas, comparando as duas pressões de injeção (80 e 100 bar), pode ser visto na Figura 73.

**Figura 73 – Distribuição de diâmetros de gotas.**



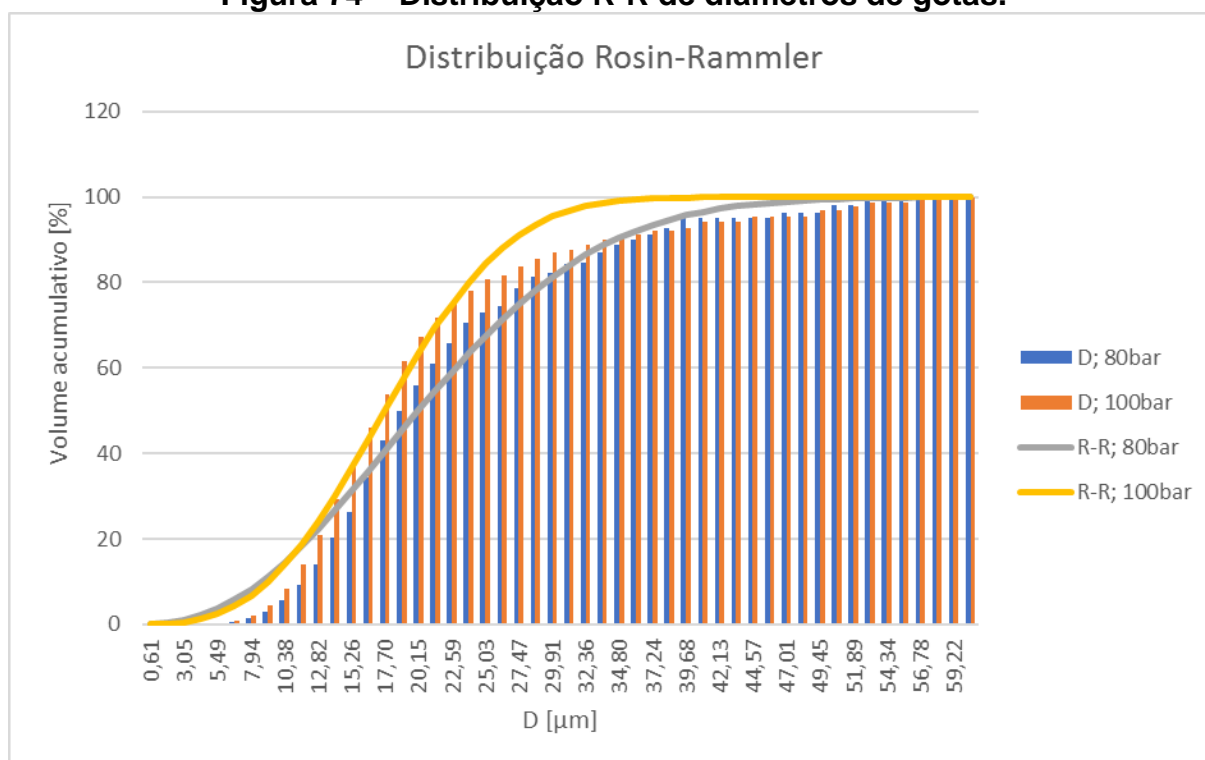
Fonte: Autor

Observa-se que o perfil do histograma permanece praticamente o mesmo para ambas as pressões de injeção, isto é: a maior frequência de gotas se concentra no intervalo 7,94 -15,26 µm, com máxima frequência entre 10,3 - 11,3 µm, diminuindo ao passo que o diâmetro aumenta e diminui. A diferença mais significativa entre as duas pressões de injeção está no mesmo intervalo onde concentram-se as maiores frequências e se torna mais acentuada no sentido positivo da ordenada. Apesar de não se detectar uma frequência maior de gotas menores para a pressão mais alta, nota-se que a frequência de gotas maiores é menor para a pressão de 100 bar. O

aumento da pressão de injeção faz com que o *spray* produza gotículas menores com maior frequência que o *spray* produzido por pressões de injeção menores.

A Figura 74 mostra a distribuição dos diâmetros das gotas pelo volume acumulativo do *spray* de Exxsol D40, juntamente com as curvas da distribuição Rosin-Rammler (R-R).

**Figura 74 – Distribuição R-R de diâmetros de gotas.**

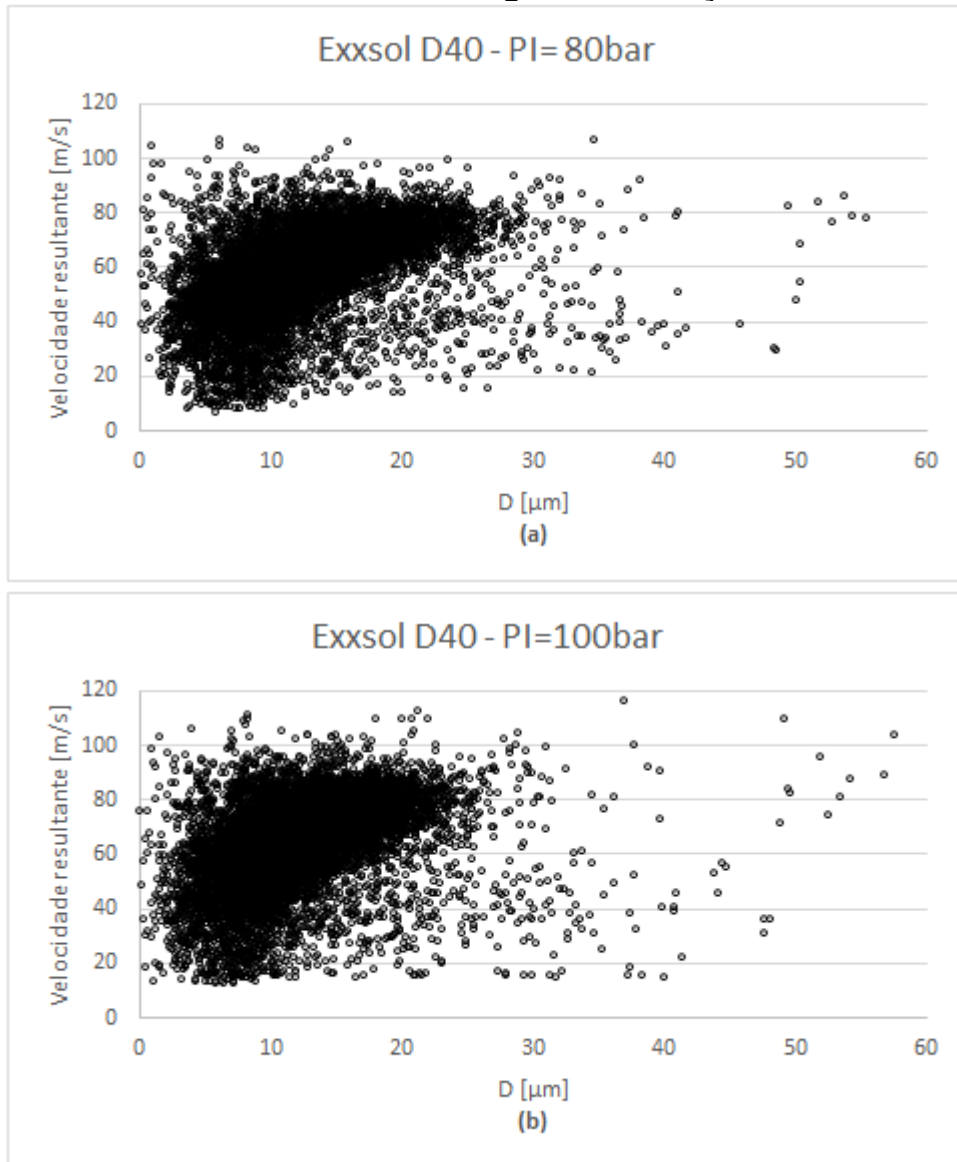


Fonte: Autor

No caso específico mostrado na Figura 74, para as pressões de injeção de 80 e 100 bar, praticamente 100% do volume total das gotículas possuem diâmetro inferior a 60 µm. Contudo, para a pressão de 100bar de injeção o percentual de volume de gotas menores é maior que para a pressão de injeção de 80bar, mostrando mais uma vez a influência da pressão no processo de atomização do *spray*.

A Figura 75 (a e b) apresenta os gráficos de dispersão da velocidade resultante das gotas em função de seus diâmetros para o Exxsol D40 para as pressões de injeção de 80 e 100 bar. Os gráficos foram elaborados com cerca de 10.000 gotas detectadas e validadas pela técnica PDA.

**Figura 75 – Velocidade resultante das gotas em função de seus diâmetros.**



**Fonte: Autor**

É possível observar que os padrões de dispersão das gotas são similares quando comparados com diferentes pressões de injeção. O padrão apresentado na pressão de injeção de 80bar (Figura 75 (a)) e o padrão da pressão de injeção de 100 bar (Figura 75 (b)).

No ponto de medição a 8 mm, as Figura 75 (a e b) mostram de forma clara que a pressão de injeção influencia nos diâmetros das gotas, ou seja, as gotas para a pressão de 100 bar a estão concentradas um pouco mais à esquerda e mais acima no gráfico comparadas com aquelas de 80bar, indicando a presença de gotas com diâmetros menores e mais velozes.



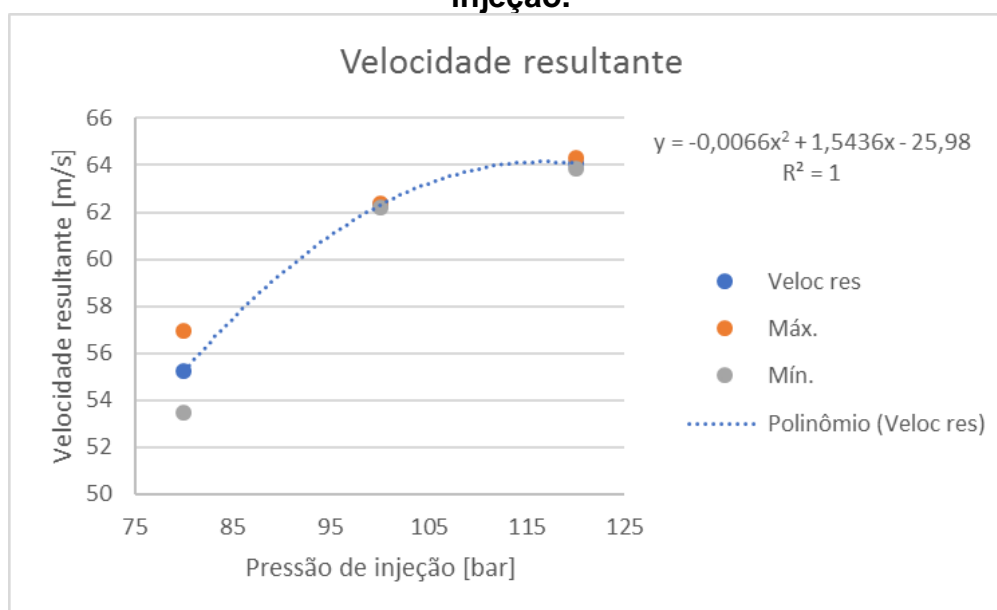
#### 4.4.3. Velocidade média resultante em função da pressão de injeção

A Figura 76 mostra o efeito da pressão de injeção sobre a velocidade média resultante das gotas do *spray* de Exxsol D40. Esta velocidade é a média das componentes verticais e horizontais das velocidades das gotas do *spray* e é expressa pela Equação (7).

$$V_{res} = \sqrt{(V_x)^2 + (V_y)^2} \quad (7)$$

Os dados referem-se à velocidade média resultante calculada ao longo do tempo correspondente a 5 testes com 2.000 gotas, totalizando em uma média de 10.000 gotas. Neste caso em particular, as pressões de injeção foram de 80, 100 e 120 bar.

**Figura 76 – Velocidade média resultante das gotas em função da pressão de injeção.**



Fonte: Autor

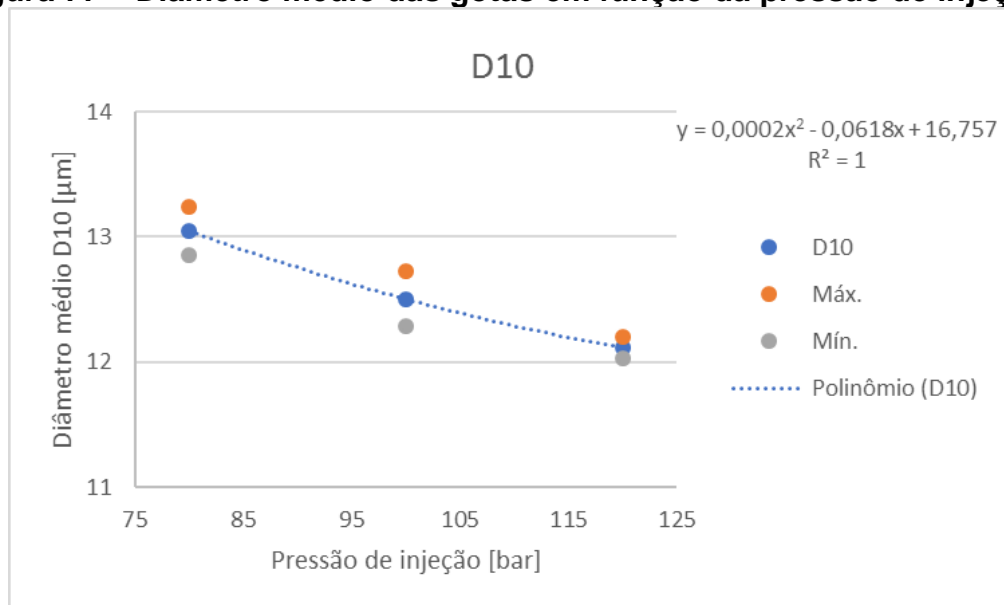
Como esperado, as velocidades das gotículas aumentam à medida que a pressão de injeção aumenta. O comportamento do aumento da velocidade das gotas em função do aumento da pressão de injeção, para estes três pontos, segue uma tendência parabólica. Nota-se também, uma variação maior da velocidade, em torno da média resultante, para pressões de injeção mais baixas. A diminuição da pressão induz uma redução da velocidade, devido à diminuição do momento das gotas, aumentando as oscilações.

A velocidade resultante média mais elevada é de cerca de 64 m/s e é atingida à pressão de injeção de 120 bar, para as primeiras gotículas injetadas e detectadas a 8 mm à jusante do injetor.

#### 4.4.4. Diâmetros médios representativos em função da pressão de injeção

A influência da pressão de injeção, nos diâmetros médios representativos  $D_{10}$  e  $D_{32}$  (SMD), também foi testada na mesma posição e com as mesmas pressões de injeção, como mostrado na Figura 77 e Figura 78, respectivamente.

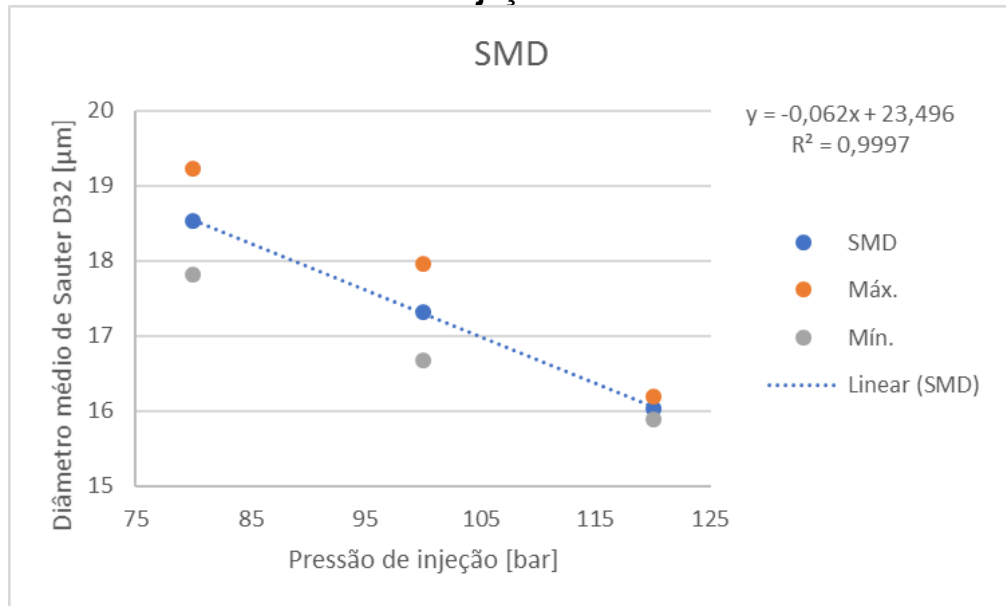
**Figura 77 – Diâmetro médio das gotas em função da pressão de injeção.**



Fonte: Autor

Como é conhecido na literatura (Li, 2013), um aumento na pressão de injeção resulta numa melhor atomização do *spray*, pois a pressão mais elevada transfere para o fluido de teste uma energia cinética mais elevada e com isso, melhora-se a interação com o ar circundante. Como efeito, mede-se a diminuição do tamanho médio das gotículas.

**Figura 78 – Diâmetro médio de Sauter das gotas em função da pressão de injeção.**



Fonte: Autor

Geralmente, quanto maior for a pressão de injeção, menor será o SMD. Dentro da região de pressão testada, o perfil mostra boa linearidade. O que se torna uma excelente ferramenta para predições e extrapolações.

## 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 5.1. Conclusões

Neste trabalho de pesquisa, foram analisadas as influências das contrapressões ambientes, das pressões de injeção e dos tipos de combustíveis sobre o comportamento das características macroscópicas e microscópicas do *spray* de injetor de injeção direta *high-pressure swirl*. As características macroscópicas estudadas concernem à estrutura e padrão do *spray*, avaliada visualmente, aos ângulos do cone e às penetrações do *spray*. Já as características microscópicas estudadas foram aquelas referentes à atomização do *spray*, como: velocidade e tamanho de gotas, através do diâmetro médio e diâmetro médio de Sauter (SMD), distribuição dos diâmetros de gotas e velocidades das gotas. O injetor *high-pressure swirl* foi empregado em dois diferentes aparatos experimentais com a finalidade de analisar as características do *spray* gerado por ele. O primeiro foi o experimento de visualização do *spray*, em que através dele, avaliaram-se as características macroscópicas e o outro experimento consistiu nas medições com o PDA, onde mediram-se as características microscópicas da atomização.

A utilização do aparato experimental para a visualização do *spray*, através de filmagens em alta velocidade, teve como objetivo principal verificar a influência da pressão de injeção e da contrapressão ambiente e do tipo de combustível no ângulo do cone e penetração do *spray*, aliando-se a *shadowgraphy* e o pós tratamento das imagens. Os parâmetros adotados para o funcionamento do injetor foram: pressão de injeção de 80 e 100 bar e tempo de injeção de 1,5 ms. Água, etanol anidro (EA), etanol combustível (E100), gasolina (E0), gasolina (E22), Exxsol D40 e Exxsol D60, foram utilizados como fluidos de testes a temperatura ambiente e contrapressões de 0bar e 10bar, manométricas. As conclusões principais dos resultados obtidos com este experimento estão resumidas a seguir:

- Há diferenciação dos *sprays* de fluidos diferentes, contudo para os *sprays* de combustíveis (E0, E22 e E100) e de Exxsol D40, tal diferenciação não é tão evidente em uma análise qualitativa.
- A pressão de injeção influencia a formação do *spray*, porém para os combustíveis e para o Exxsol D40 esta influência não é notada apenas visualmente.

- A contrapressão ambiente exerce grande influência no formato do *spray* do injetor *high-presseure swirl*, para todos os fluidos testados.
- O ângulo de cone do *spray* não sofre grande influência devido à pressão de injeção para uma dada contrapressão ambiente, em contrapartida ele é bastante influenciado por esta contrapressão ou densidade ambiente, ou seja, a mudança da contrapressão ambiente de 0 bar para 10 bar é mais significativa que a mudança da pressão de injeção de 80 bar para 100 bar.
- Com o aumento da pressão de injeção a penetração do *spray* aumenta e com o aumento da contrapressão ambiente a penetração do *spray* diminui.
- Para contrapressão atmosférica o *spray* gerado pelo injetor high-pressure swirl possui uma estrutura conhecida como pré-*spray* e ela é independente do tipo de combustível e pressão de injeção, porque é uma característica deste tipo de atomizador.
- O fluido simulacro Exxsol D40 mostrou-se ser uma alternativa mais segura na substituição dos combustíveis nos testes com injetores de injeção direta, porque é menos inflamável que os demais combustíveis e apresenta características físico-químicas similares.

Com o PDA, foi possível analisar a influência da pressão de injeção nas variáveis de microscópicos da atomização do *spray* formado pelo injetor *high-pressure swirl*. Os parâmetros adotados para o funcionamento do injetor foram: pressão de injeção de 80, 100 e 120 bar e tempo de injeção de 1,5 ms. Por questões de segurança, o Exxsol D40 foi utilizado como fluido de testes a temperatura ambiente e contrapressão atmosférica. As medições ocorreram na distância de 8,0 mm à jusante da ponta do injetor. As conclusões dos resultados obtidos das características microscópicas são resumidas a seguir:

- Como esperado, maiores pressões de injeção levam a maiores velocidades das gotas, na ordem de 55 m/s para 80 bar, 62 m/s para 100 bar e 64 m/s para 120 bar.
- A representação da velocidade das gotas em função do tempo de injeção, evidencia o comportamento típico da dinâmica da injeção, isso independente da pressão de injeção.

- Este tipo de injetor, possui velocidade horizontal (radial) elevada, na ordem de 30m/s, caracterizando o injetor como um atomizador do tipo *swirl*.
- A disposição da velocidade das gotas pelos seus diâmetros indica qual o comportamento do *spray* e quais diâmetros possuem maiores velocidades, no ponto medido do *spray*.
- Maiores pressões de injeção, implicam em menores diâmetros médios representativos das gotas.
- Segundo a distribuição dos diâmetros das gotas, no ponto de medição, o *spray* possui gotas grandes, contudo em frequências menores que diâmetros menores. Isso para ambas as pressões de injeção.

Pode-se concluir então que, embora a pressão de injeção e a contrapressão ambiente tenham um forte efeito sobre o processo de atomização, as características dos combustíveis, mesmo que pouco, influenciam também nesses parâmetros. O simulacro Exxsol D40, provou-se ser um fluido de teste para a caracterização de injetores de injeção direta, mais seguro e que representa bem o comportamento tanto da gasolina quanto do etanol.

Portanto, este estudo motivado pelo melhor entendimento da importância da atomização de combustível líquido e com isso, posteriormente, entender melhor o processo de evaporação deste combustível, formação de mistura ar/combustível e do processo de combustão, em motores DISI, visando uma melhor eficiência de combustão, melhorando o desempenho do motor e a diminuição das emissões de poluentes. Para isso, técnicas e instrumentos ópticos avançados foram os meios utilizados para obter experimentalmente alguns parâmetros fundamentais para o entendimento do processo de atomização.

## **5.2. Sugestão de trabalhos futuros**

A seguir serão apresentadas algumas sugestões de trabalhos futuros que podem continuar o estudo das características da atomização do *spray*, tais como:

- Melhorar a resolução das imagens, melhorando-se a densidade de resolução e com isso obtém-se mais informação por imagem analisada.

- Aplicar técnicas de visualização do vapor de combustível, aliadas à filmagem de alta velocidade e à shadowgraphy, como a técnica óptica conhecida como Schlieren e Exciplex.
- Obter o campo de velocidades do *spray* através da velocimetria por imagens de partículas (Particle Image Velocimetry – PIV).
- Avaliar a influência da temperatura ambiente na atomização do *spray*.
- Avaliar a influência da temperatura do fluido de teste na atomização do *spray*.
- Avaliar a influência da distância do ponto de medição (axial e radial), na velocidade e no diâmetro de gotas do *spray*.
- Avaliar a influência do tempo de injeção na atomização do *spray*.
- Avaliar a influência do escoamento do ar na atomização do *spray*.
- Medir as características microscópicas da atomização do *spray* em ambiente pressurizado, avaliando assim, a influência da contrapressão ambiente nessas características.
- Simular em CFD a atomização do *spray*, levando-se em conta modelos de *break-up*, evaporação, colisão e coalescência das gotas, bem como a geometria interna do injetor e as características dos fluidos.
- Caracterizar *sprays* produzidos por outros tipos de injetores como o injetor *multi-hole* e *outward-opening*.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adrian, R. J., & Westerweel, J. (2011). Particle image velocimetry (Vol. 30).n Cambridge University Press. ISBN 9780521440080.

ARCOUMANIS C, SCHINDLER KP. **Mixture formation and combustion in the DI diesel engine**. SAE paper 972681, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724**: informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

Bachalo, W. D., Houser, M. J., (1984) “**Development of the Phase/Doppler Spray Analyser for Liquid Drop Size and Velocity Characterizations**”, Proc. AIIA/SAE/ASME 20th Joint Propulsion Conference, Cincinnati, Ohio

BAE, C., YU, J., KANG, J., KONG, J., & LEE, K. O. (2002). Effect of nozzle geometry on the common-rail diesel *spray*. **Evaluation**, 2009, 03-30.

Basshuysen, R. **Ottomotor mit Direkteinspritzung**, 2008.

Baumgarten, C. **Mixture formation in internal combustion engines. Germany: Springer**, 2006. 294 p.

BAYVEL, L., ORZECOWSKI, Z. Liquid Atomization. Combustion: An International Series. EUA: Taylor & Francis, 1993.

CAIRNS, A., TODD, A., HOFFMAN, H., ALEIFERIS, P., & MALCOLM, J. (2009). **Combining unthrottled operation with internal EGR under port and central direct fuel injection conditions in a single cylinder SI engine**. 2009-01-1835. SAE Technical Paper. DOI 10.4271/2009-01-1835.

CAMERETTI, M. C., & TUCCILLO, R. (2007). Flow and Atomization Models for CR Diesel Engine CFD Simulation. In ASME/IEEE 2007 Joint Rail Conference and Internal Combustion Engine Division Spring Technical Conference (pp. 451-461). **American Society of Mechanical Engineers**. DOI 10.1115/JRC/ICE2007-40068.

CENEDESE, A.; DOGLIA, G.; ROMANO, G.P.; MICHELE, G.D. e TANZINI, G. Lda and piv velocity measurements in free jets. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 9, n. 2, 125–134, 1994.



CHAVES, H., KNAPP, M., KUBITZEK, A., & OBERMEIER, F. (1995). Experimental study of cavitation in the nozzle hole of diesel injectors using transparent nozzles. **Training**, 1999, 09-27.

DANTEC DYNAMICS. Dantec Dynamics, Acessado em janeiro de 2017.

DANTEC DYNAMICS. **Manual**. [S.l.]: [s.n.], 2011.

DUCLOS, J. M., & ZOLVER, M. (1998). 3D modeling of intake, injection and combustion in a DI-SI engine under homogeneous and stratified operating conditions. In **COMODIA** (Vol. 98, pp. 335-340).

Dust, F., Melling, A., Whitelaw, J. H., (1981) “**Principles and Practice of Laser-Doppler Anemometry**”, Academic Press, London (2nd edition)

ESMAIL, M., KAWAHARA, N., TOMITA, E., & SUMIDA, M. Direct microscopic image and measurement of the atomization process of a port fuel injector. **Measurement Science and Technology**, 2010.

FRASER, R. P., EISENKLAM, P., DOMBROWSKI, N., & HASSON, D. (1962). Drop formation from rapidly moving liquid sheets. **AIChE Journal**, 8(5), 672-680. DOI 10.1002/aic.690080522.

FU, L., ISHIMA, T., LONG, W. Q., & TIAN, J. P. Research on the Ignition Chamber GDI Engine Combustion System. **Journal of Thermal Science and Technology**, 2009, p 53-62.

G. WIGLEY ET AL., "Air-Fuel Mixing in a Homogeneous Direct Injection Spark Ignition Engine with a Fully Variable Valve Train System," in Haus der Technik, 7th. International Congress – Engine Combustion Processes, Munich, 2005.

GALLONI E, FONTANA G, PALMACCIO R. Effects of exhaust gas recycle in a downsized gasoline engine. **Applied Energy** 2013; 105: 99-107.

GUZZO, M. E., BARROS, J. E. M., HUEBNER, R. AND VALLE, R. M., “**A Computational Methodology for Studying Spray Characteristics of a Gasoline Direct Injection Injector**,” SAE Technical Paper 2012-36-0362, 2012.

GUZZO, M. E., BARROS, J. E. M., HUEBNER, R. AND VALLE, R. M., JÚNIOR, C. A. G., RODRIGUES F., “**Experimental Study of Spray Pattern, Tip Penetration and Velocity Profiles of a Gasoline Direct Injection Injector Using High Speed**

**Image Recording and Particle Image Velocimetry”** SAE Technical Paper 2013-36-0553, 2013.

HONDA T, KAWAMOTO M, KATASHIBA H, SUMIDA M, FUKUTOMI N, KAWAJIRI K. **A study of mixture formation and combustion for *spray* guided DISI.** SAE paper 2004-01-0046, 2004.

HUANG, Y., HONG, G., CHENG, X. & HUANG, R. **Investigation to Charge Cooling Effect of Evaporation of Ethanol Fuel Directly Injected in a Gasoline Port Injection Engine,** SAE paper 2013-01-2610, 2013.

HÜTTEN (1994). **Schnelle Motoren seiert und frisiert “,** Motorbuchverlag.

HWANG SS, LIU Z, REITZ RD (1996) Breakup Mechanisms and Drag Coefficients of High-Speed Vaporizing Liquid Drops. **Atomization and Sprays,** vol 6, pp 353–376.

ISO. **Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement.** International Organization for Standardization (ISO), Geneve, 1 ed., 2008.

JÚNIOR, C. A. G., BARROS, J. E. M., HUEBNER, R. AND VALLE, R. M., **“Comparison of the Macroscopic Characteristics of the Atomization in a New, Used and Reconditioned Diesel *Spray* Nozzles of Common Rail System.”** SAE Technical Paper 2012-36-0351, 2012.

**Junkers.** Fo2. Acessado em janeiro de 2017.

KARLSSON, R. B., & HEYWOOD, J. B. (2001). **Piston fuel film observations in an optical access GDI engine** (No. 2001-01-2022). SAE Technical Paper. DOI 10.4271/2001-01-2022

KASHDAN, J. T., MENDEZ, S., & BRUNEAUX, G. (2007). **On the origin of unburned hydrocarbon emissions in a wall guided, low NOx diesel combustion system.** 2007- 01-1836. SAE Technical Paper. DOI 10.4271/2007-01-1836.

KRÄMER (1998). **Untersuchung zur Gemischbildung, Entflammung und Verbrennung beim Ottomotor mit Direkteinspritzung.** Institut für Kolbenmaschinen. P.h.D. thesis. Karlsruhe, Karlsruhe Institute of Technology.

KRZECZKOWSKI SA (1980) Measurement of Liquid Droplet Disintegration Mechanisms. **Int J Multiphase Flow**, vol 6, pp 227–239

KUBACH, H., GINDELE, J., & SPICHER, U. (2001). **Investigations of mixture formation and combustion in gasoline direct injection engines**. 2001-01-3647). SAE Technical Paper. DOI 10.4271/2001-01-3647.

L. ALLOCCA, S. ALFUSO, L. MARCHITTO, G. VALENTINO, **GDI Multi-Hole Injector: Particle Size and Velocity Distribution for Single and Jet-to-Jet Evolution Analysis**, ICLASS 2009, 11th Triennial International Annual Conference on Liquid Atomization and *Spray* Systems, Vail, Colorado USA, July 2009

LAOONUAL, Y., YULE, A. J., & WALMSLEY, S. J. Internal fluid flow and *spray* visualization for a large-scale valve covered orifice (VCO) injector nozzle. **ILASS-Europe** 2001, Zurich, 2–6 Sept.

LEDUC P, DUBAR B, RANINI A, MONNIER G. Downsizing of gasoline engine: an efficient way to reduce CO2 emissions. **Oil Gas Si Technology** 2003; 58: 115-27.

LEFEBVRE, A. H. **Atomization and Sprays**. USA: Taylor & Francis, USA, 1989. 416 p.

LEONHARD R. Bosch DI-Motronic Gasoline Direct Injection. **The technology of direct injection**. [http://www.autospeed.com/cms/A\\_1761/article.html](http://www.autospeed.com/cms/A_1761/article.html).

Li H. **CFD modelling study of sprays and combustion of gasoline and DMF in direct injection gasoline engines**. PhD thesis, University of Birmingham. 2013.

LI, J., HUANG, Y., ALGER, T. F., MATTHEWS, R. D., HALL, M. J., STANGLMAIER, R. H., ... & ANDERSON, R. W. Liquid fuel impingement on in-cylinder surfaces as a source of hydrocarbon emissions from direct injection gasoline engines. **Journal of engineering for gas turbines and power**, 2001. 123(3), p; 659-668.

LIU, Z., & REITZ, R. D. (1997). An analysis of the distortion and breakup mechanisms of high speed liquid drops. **International journal of multiphase flow**, 631-650. DOI 10.1016/S0301-9322(96)00086-9.

MAHLE. **Advanced Direct Injection Combustion Engine Technologies and Development**. [S.I.]: Woodhead Publishing Limited, v. 1, 2010.

MEINIG, U. (2008). **Geschichte der Benzin-Direkteinspritzung“**. **Ottomotor mit Direkteinspritzung**, van Basshuysen, R.: 3 - 27.

MITROGLOU, N., NOURI, J.M., GAVAISES, M., AND ARCOUMANIS, C. **Spray characteristics of a multi-hole injector for direct-injection gasoline engines**. Int. J. Engine Res. 2006; 7: 255-270.

MONTANARO, A., MALAGUTI, S., & ALFUSO, S. (2012). **Wall impingement process of a multi-hole GDI spray: Experimental and numerical investigation**. 2012-01-1266 SAE Technical Paper. DOI 10.4271/2012-01-1266.

ORTMANN, R., ARNDT, S., RAIMANN, J., GRZESZIK, R., & WÜRFEL, G. (2001). **Methods and analysis of fuel injection, mixture preparation and charge stratification in different direct injected SI engines**. 2001-01-0970. SAE Technical Paper. DOI 10.4271/2001-01-0970.

PAYRI R, ARANEO L, SHAKAL J, SOARE V. Phase doppler measurements: system setup optimization for characterization of a diesel nozzle. **Journal of Mechanical Science and Technology**, Volume 22, Number 8; 2008.

PREUSSNER, C., DÖRING, C., FEHLER, S., & KAMPMANN, S. (1998). **GDI: interaction between mixture preparation, combustion system and injector performance**. 980498. SAE Technical Paper. DOI 10.4271/980498.

Reitz, R. D., **Atomization and Other Breakup Regimes of a Liquid Jet**, Ph.D. thesis, Princeton University, 1978.

SCHERENBERG, H. (1955). **Rückblick über 25 Jahre Benzineinspritzung in Deutschland**. MTZ

SCHMIDT, D., RUTLAND, C., CORRADINI, M., ROOSEN, P, "**Cavitation in Two-Dimensional Asymmetric Nozzles**," SAE Technical Paper 1999-01-0518, 1999

SETTLES, G. S. Schlieren and shadowgraph techniques: visualizing phenomena in transparent media. 2 Ed. **Germany Springer**, 2006. 376 p.

SOUZA, E. J. J. **Concepção e desenvolvimento de correlações experimentais para a simulação, controle e otimização de sprays gerados em atomizadores mecânicos-centrífugos**. 2009. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SPICHER, U., HEIDENREICH T. **Gemischbildungs- und Verbrennungsverfahren. Ottomotor mit Direkteinspritzung**, van Basshuysen, 2008. 116 p.

STAN C, STANCIU A, TROEGER R, MARTORANO L, TARANTINO C, ANTONELLI M. **Influence of mixture formation on injection and combustion characteristics in a compact GDI engine**. SAE paper 2002-01-0997, 2002.

STRAKEY P, TALLEY D, BACHALO W D. Phase Doppler Measurements in Dense *Sprays*. Proc. **ILASS-Americas**, Sacramento, CA. (1998).

**URL:** [http://hugojunkers.pytalhost.com/ju\\_fo2\\_a1.htm](http://hugojunkers.pytalhost.com/ju_fo2_a1.htm)

**URL:** <http://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-pda>>.

Yeh, Y., Cummins, H. Z., (1964), **Applied Physics Letters**, vol. 4, pp. 176-178.

ZHAO FQ, LAI MC, HARRINGTON DL. **A review of mixture preparation and combustion control strategies for spark-ignited direct-injection gasoline engines**. SAE paper 970627, 1997.

## 7. APÊNDICE

### 7.1. Erros Aleatórios Associados aos Resultados Experimentais

Para uma determinada medição  $X_i$ , obtida de resultado experimental de uma grandeza  $X$  do trabalho, uma faixa de erro aleatório foi associada baseada na Equação (8).

$$X \pm t \cdot u \quad (8)$$

Na Equação (5) o produto  $t \cdot u$  é a metade do valor da largura de uma faixa simétrica, dentro da qual, para uma dada probabilidade, o erro aleatório é esperado e representa a repetitividade da medida. Em que  $t$  é o coeficiente  $t$  de Student (valor tabelado) para uma dada probabilidade e  $n - 1$  graus de liberdade, sendo  $n$  o número de medições realizadas para a grandeza  $X$  e  $u$  a incerteza padrão (desvio-padrão) das medições.

Aos valores médios resultantes da obtenção de uma série de  $n$  de medidas, para um determinado parâmetro  $X$ , uma faixa de erro aleatório foi associada através da repetitividade da média baseada na Equação (6).

$$Re_M = \frac{t \cdot u}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

Logo o resultado da medição é dado por:

$$X_M \pm Re_M \quad (10)$$

Onde  $X_M$  é o valor médio do parâmetro  $X$ .

Se for associada uma probabilidade de 95% para o coeficiente  $t$  de Student, para  $n - 1$  graus de liberdade, a Equação (9) indica que para uma série de  $n$  medições realizada sob as mesmas condições, o valor médio  $X_M$  terá uma probabilidade de 95% de estar na faixa determinada pela Equação (10). Da mesma forma, uma medição individual  $X_i$ , terá probabilidade de 95% de situar-se na faixa determinada pela Equação (5), se o coeficiente  $t$  de Student para  $n - 1$  graus de liberdade corresponder à probabilidade de 95%.

Neste trabalho, para a determinação do ângulo de cone e penetração, pela média dos respectivos valores em 7 imagens, a Equação (10) foi caracterizado o valor de cada parâmetro.

## 7.2. Análise de incerteza das medições com o PDA.

As incertezas envolvidas no processo de medição de uma grandeza física podem ser divididas em dois tipos: tipo A e tipo B. As incertezas do tipo A são associadas à variações estatísticas na medição e o seu método de avaliação ocorre através da análise estatística de séries de observações enquanto que as incertezas do tipo B são relacionadas com outros fatores além dos associados com às variações estatísticas (ISO, 2008).

Para os testes realizados no aparato experimental composto pelo PDA, as incertezas do tipo A, aquelas associadas às variações estatísticas na medição, foram determinadas através da repetibilidade das medições. Nesse sentido, foram realizadas cinco medições análogas de cada pressão de injeção para determinar a média e o desvio-padrão de cada parâmetro desejado. Cada medição consiste de aproximadamente 2.000 gotas detectadas pela técnica PDA, totalizando em um conjunto de 10,000 gotas. Conforme Cenedese et al. (1994), tal estratégia de medição permite obter resultados estatisticamente significantes.

Os valores das médias e desvios-padrão das cinco medições dos diâmetros representativos e da resultante da velocidade das gotas dos *sprays* do simulacro Exxsol D40 são apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8 – Valores da velocidade resultante, do D10 e SMD das gotas.**

<b>Pressão de injeção/Variável</b>	<b>Velocidade resultante [m/s]</b>	<b>D10 [µm]</b>	<b>D32 [µm]</b>
<b>80 [bar]</b>			
<b>Média</b>	55,21014	13,04691	18,51984
<b>Desvio-padrão</b>	1,725774	0,190957	0,698033
<b>100 [bar]</b>			
<b>Média</b>	62,28959	12,11447	16,03799
<b>Desvio-padrão</b>	0,079331	0,084892	0,152732
<b>120 [bar]</b>			
<b>Média</b>	64,08184	12,50381	17,31607
<b>Desvio-padrão</b>	0,208423	0,221027	0,410989

Fonte: Autor

As incertezas do tipo B são associadas com outros fatores além dos relacionados às variações estatísticas. No presente trabalho, elas são identificadas no equipamento da técnica PDA. Para a utilização das lentes de 300 mm e 310mm em ambos os módulos (emissor e receptor, respectivamente), o fabricante informa que essa incerteza é de 1  $\mu\text{m}$  para a medição dos diâmetros e 0,01% do valor da magnitude da velocidade.