



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Desenvolvimento de Métodos Computacionais para Análise da Injeção
Direta de Combustíveis Líquidos

MÁRCIO EXPEDITO GUZZO

Belo Horizonte, março de 2017.

Márcio Expedito Guzzo

**DESENVOLVIMENTO DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS PARA A
ANÁLISE DA INJEÇÃO DIRETA DE COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade Federal de
Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do
título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Energia e Sustentabilidade

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Mautone Barros
Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2017

G993d

Guzzo, Márcio Expedito.

Desenvolvimento de métodos computacionais para a análise da injeção direta de combustíveis líquidos [manuscrito] / Márcio Expedito Guzzo. – 2017.
xxv,195 f., enc.: il.

Orientador: José Eduardo Mautone Barros.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais,
Escola de Engenharia.

Anexos: f. 186-195.

Bibliografia: f. 179-185.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Automóveis - Motores - Sistemas de injeção eletrônica de combustível - Teses. 3. Combustíveis líquidos - Teses. I. Barros, José Eduardo Mautone. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário
31270-901 - Belo Horizonte - MG

Tel.: +55 31 3409.5145

E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**"DESENVOLVIMENTO DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS PARA
ANÁLISE DA INJEÇÃO DIRETA DE COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS"**

MÁRCIO EXPEDITO GUZZO

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Doutor em Engenharia Mecânica", na área de concentração de "Calor e Fluidos".

Tese aprovada no dia 07 de março de 2017.

Por:



Dr. José Eduardo Mautone Barros
Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG



Dr. Rudolf Huebner
Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG



Dr. Guilherme Bastos Machado
Petrobras



Dr. Sérgio de Moraes Hanriot
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais



Dr. Osmano Souza Valente
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado condições, força e oportunidade para a realização deste trabalho.

À minha família, minha mãe Márcia Cristina Ferreira e minha irmã Marcella Fernandes Guzzo pelo compartilhamento dos momentos felizes e apoio nos momentos difíceis.

Ao meu pai Expedito Macário Guzzo.

Ao Professor orientador deste trabalho, Doutor José Eduardo Mautone Barros, pelos conhecimentos transmitidos, pelas sugestões e grande ajuda no direcionamento do trabalho.

Aos colegas, Carlos Alberto Gomes Júnior, Sérgio Passos, Roberto Berlim e Rafael Lara pelo trabalho na parte experimental de fundamental importância para este trabalho. Este trabalho não teria sido possível sem a ajuda de vocês.

Ao professor Ramón Molina Valle, coordenador do Centro de Tecnologia da Mobilidade.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET MG - que permitiram o meu afastamento das atividades dessa instituição para a fase final do trabalho de Doutorado.

Aos colegas da Engenharia Mecânica da UFMG que foram alunos do curso em algum período coincidente ao período de realização da presente Tese: Thiago Augusto Araújo Moreira, Fernando Antonio Rodrigues Filho, Cláudio Márcio Santana, Paul Silva, Leonardo Fonseca, Giselle Couto, Carlos Castilla, Oscar Sandoval, Vinicius Roso, Hélder, Ali e Arthur pelo convívio durante o tempo de realização do trabalho.

Àqueles que trabalharam com simulações numéricas em dissertações ou trabalhos de conclusão de curso que necessitaram de dados experimentais fornecidos durante o desenvolvimento da presente Tese: Deborah Domingos da Rocha, Leonardo Mayer Reis e Felipe Grossi. Também a todo o pessoal que atualmente trabalha ou trabalhou com simulações numéricas no Centro de Tecnologia da Mobilidade.

Ao aluno Perez Rafael Pereira da Silva por ter medido as propriedades utilizadas neste trabalho para os fluidos simulacros (massa específica, viscosidade absoluta e tensão superficial) e também as propriedades do etanol hidratado, da gasolina A e da gasolina C.

À PETROBRAS pelo suporte dado aos laboratórios do Centro de Tecnologia da Mobilidade.

À CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão de bolsa de Doutorado para a realização do trabalho.

À Marina, secretária da Coordenação do programa de Pós-graduação pela ajuda prestada em diversos momentos.

Ao Alexandre Alves Gomes da parte administrativa do Centro de Tecnologia da Mobilidade também pela ajuda prestada em diversos momentos.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho fornecendo sugestões para melhoria.

RESUMO

Dentro de um contexto atual de restrições cada vez mais severas para as emissões de poluentes por combustíveis fósseis e suas possíveis implicações ambientais, torna-se de grande relevância o estudo do melhor aproveitamento dos combustíveis. Uma forma de atingir esse objetivo é analisar o próprio combustível na forma em que ele é utilizado. Este trabalho tem como foco melhorar as técnicas de estudo de algumas características relevantes da injeção direta de combustíveis líquidos em motores de combustão interna, aliando programações de rotinas de cálculo computacionais de análise de matrizes com dados obtidos dos experimentos para que os resultados sejam mais confiáveis e possibilitem a obtenção de correlações envolvendo parâmetros relevantes dos *sprays*. Imagens digitais são uma das principais fontes de informações obtidas dos experimentos para a análise dos *sprays* de combustíveis em vários trabalhos encontrados na literatura e também deste mesmo trabalho. Elas são essencialmente matrizes numéricas, em uma representação matemática. Nesta Tese, filmagens com alta velocidade de obtenção de imagens foram realizadas tanto em condições de injeção estática utilizando fluidos simulacros de gasolina e etanol, quanto em condições dinâmicas utilizando etanol hidratado em injeção dentro de um motor com acesso óptico, para exemplificar a utilização das metodologias desenvolvidas. As novas estratégias de análise proporcionaram a medição de grandezas importantes como o ângulo de cone, a penetração, o volume e a dispersão dos *sprays*. Tais estratégias também possibilitaram a obtenção de correlações preditivas do comportamento dos *sprays*. Os resultados demonstraram não existir grandes diferenças quanto às características macroscópicas dos *sprays* dos dois fluidos simulacros testados em condições estáticas e forte dependência do comportamento do *spray* de etanol com a condição de rotação do motor.

Palavras-chave: *sprays*, injeção direta, tratamento de imagens, combustíveis.

ABSTRACT

The analysis of better fuel applications is of great importance when is considered the growing restrictions on fossil fuel emissions, and its environmental implications in the actual context. Studying the fuel in the way it is used is a strategy for reaching this objective. This work has the goal to improve the techniques of analysis concerning some relevant characteristics of direct injection using liquid fuels in internal combustion engines. In this work computational programming calculations were linked with experimental data for getting more reliable results and mathematical relations for spray relevant parameters. Images are the source for getting results concerning fuel spray analysis in several experiments found in the literature. In the present work images were also used for this objective. They are essentially numerical matrices in a mathematical representation. High-speed image recording processes were performed both in static injection conditions using gasoline and ethanol similar fluids and in dynamic conditions with the ethanol injections inside an optical engine to serve as an example for the application of the new methodologies. With the developed strategies, it was possible to measure automatically important spray parameters as the cone angle, the penetration, the spray volume and the dispersion coefficients. Such strategies also helped obtaining predictive correlations. The results showed similar behavior in the macroscopic spray characteristics between the two tested fluids used in static conditions and a strong dependence in ethanol spray with the engine speed rotation.

Keywords: sprays, direct injection, image analysis, fuels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Diferença entre a injeção no coletor de admissão PFI e a injeção direta em motores do ciclo Otto GDI. FONTE: adaptado de ZHAO, 2009.	6
Figura 3.2 – <i>Spray</i> produzido por um injetor do tipo <i>pressure-swirl</i> . FONTE: adaptado de BAUMGARTEN, 2006.	8
Figura 3.3 – Perfil de pixel mostrando concentração de gotículas acentuada nas bordas do <i>spray</i> . FONTE: (GUZZO, 2012).	9
Figura 3.4 – Simulações do campo de velocidade da fase gasosa na região do <i>spray</i> . FONTE: REIS, 2015.	10
Figura 3.5 – (a) Injetor com múltiplos orifícios, (b) injetor do tipo <i>outwardly-opening</i> e (c) injetor do tipo <i>inwardly-opening pressure-swirl</i> . FONTE: (ZHAO; LAI; HARRINGTON, 1999).	11
Figura 3.6 – Diferentes configurações na injeção direta: <i>Wall-guided</i> , <i>Air-guided</i> e <i>Spray-guided</i> . FONTE: ZHAO, 2010.	11
Figura 3.7 – Operação do motor em carga homogênea (a) e em carga estratificada (b). FONTE: adaptado de ZHAO, 2010.	12
Figura 3.8 – Produção de etanol anidro combustível e etanol hidratado combustível no Brasil entre 2012 e 2016. Fonte: (AMARAL et al., 2017).	16
Figura 3.9 – Representação dos pixels de uma imagem como elementos retangulares em uma imagem digital.	18
Figura 3.10 – Matriz identidade 300 x 300 representada como uma imagem. Os pixels brancos na diagonal principal tem valor um enquanto os demais pixels tem valor zero.	18
Figura 3.11 – Imagem de um <i>spray</i> em níveis de cinza e uma pequena parte de sua representação matricial à direita.	19
Figura 3.12 – Características da técnica PIV de obtenção de campos de velocidades, FONTE: adaptado de DANTEC DYNAMICS, 2015.	22
Figura 3.13 – Campo vetorial para velocidade resultante no <i>spray</i> de gasolina. FONTE: (GUZZO, 2012).	23
Figura 3.14 – Montagem para determinação tridimensional de um campo de velocidade. FONTE: (ÇENGEL; CIMBALA, 2007).	24

Figura 3.15 – Um sistema LDA de raio duplo. Fonte: Adaptado pelo Autor de (ÇENGEL; CIMBALA, 2007).	25
Figura 3.16 – Cruzamento dos dois raios Laser e volume de medição. Fonte (ÇENGEL; CIMBALA, 2007).	26
Figura 3.17 – Interferência de ondas: construtiva à esquerda e destrutiva à direita. Fonte: (WALKER; RESNICK; HALLIDAY, 2008).	27
Figura 3.18 – Cruzamento entre dois feixes de laser. Fonte: (ÇENGEL; CIMBALA, 2007).	27
Figura 3.19 – Velocidade das gotículas em função do tempo. FONTE:(GOMES et al., 2015).	29
Figura 3.20 – Disposição espacial de um sistema PDA. Fonte:Adaptado de (DANTEC DYNAMICS, 2015).	30
Figura 3.21 – Luz espalhada em duas diferentes direções por uma partícula esférica. Fonte: (DANTEC DYNAMICS, 2011).	31
Figura 3.22 – Diâmetro de Sauter em função da pressão de injeção. FONTE: (GOMES et al., 2015).	31
Figura 3.23 – Esquema de um <i>spray</i> mostrando a penetração, o ângulo de cone, e as desintegrações primária e secundária. FONTE: adaptado de BAUMGARTEN, 2006.	35
Figura 3.24 – Regimes de Rayleigh, <i>Wind-induced</i> e Atomização. Adaptado de BAUMGARTEN, 2006.	36
Figura 3.25 – Diferentes regimes de atomização dados pelos números adimensionais Ohnesorge Z e Reynolds. FONTE (BAUMGARTEN, 2006).	39
Figura 3.26 – Classificação dos regimes de atomização incluindo propriedades do gás ambiente. FONTE adaptado de (BAUMGARTEN, 2006).	39
Figura 3.27 – Histogramas de gotículas baseados em número e volume, Adaptado de LEFEBVRE, 1989.	43
Figura 3.28 – Curvas de Frequência baseadas em número e volume. Adaptado de LEFEBVRE, 1989.	43
Figura 3.29 – Distribuição do volume acumulativo do <i>spray</i> de EXXSOL D60 realizada a 8 mm de distância do orifício do injetor.	45
Figura 3.30 – Distribuição Rosin-Rammler para diâmetros de Sauter iguais a 10 μm , 20 μm , 30 μm e 40 μm	46
Figura 3.31 – Distribuição Rosin-Rammler para vários parâmetros q e para o diâmetro de Sauter D_{32} igual a 20 μm	47
Figura 3.32 – Combustão de uma gotícula de combustível para (a) convecção na vizinhança e (b) sem convecção na vizinhança. FONTE: (KUO, 2005).	48

Figura 3.33 – Parâmetros geométricos internos do injetor considerados no trabalho de RASHAD; YONG; ZEKUN, 2016.	53
Figura 4.1 – Esquema experimental da técnica <i>Shadowgraph</i> (fotografia da sombra) para filmagem no motor.	56
Figura 4.2 – (a) Imagem obtida da filmagem e (b) imagem obtida da filmagem convertida para a escala de cinza.....	57
Figura 4.3 – Resultado da subtração de uma imagem em escala de cinza do <i>spray</i> com uma imagem média também em escala de cinza sem <i>spray</i>	58
Figura 4.4 – Imagem subtraída do <i>spray</i> após ajuste do histograma de pixels para melhoria do contraste.....	59
Figura 4.5 – Histograma das intensidades dos pixels da imagem subtraída da Figura 4.3 sem ajuste de contraste.....	59
Figura 4.6 – Histograma de intensidade de pixels da imagem da Figura 4.4 subtraída e ajustada que compreende toda a faixa de valores possíveis.	60
Figura 4.7 – Medição de distância em pixels para cálculo da densidade de resolução ou fator de escala.....	61
Figura 4.8 – Injetor de Injeção direta de um único orifício do tipo <i>pressure-swirl</i> utilizado nos testes estáticos.	62
Figura 4.9 – Comparação dos fluidos simulacros EXXSOL D60 e EXXSOL D40 com o etanol, a gasolina A e a Gasolina C.	63
Figura 4.10 – Flange superior da câmara de acrílico com escala angular para medição do ângulo de observação.....	64
Figura 4.11 – Orientação do injetor visto da posição da câmera de alta frequência de filmagem.....	65
Figura 4.12 – Vaso de pressão utilizado nos testes para armazenamento e pressurização dos fluidos.	65
Figura 4.13 – Componentes da configuração experimental para as injeções em condições estáticas.....	66
Figura 4.14 – Resultado da filmagem (a) próxima com fator de escala equivalente a 249,3 pixels/cm e (b) distante do injetor com fator de escala equivalente a 72,7 pixels/cm.....	67
Figura 4.15 – Motor monocilindro com acesso óptico de pesquisa modelo AVL 5406 do Centro de Tecnologia da Mobilidade (CTM) da UFMG.....	68
Figura 4.16 – Injetor de injeção direta Bosch se sete orifícios (modelo 0261500073) utilizado no motor de acesso óptico.	69

Figura 4.17 – Escolha da origem do sistema de coordenadas para as imagens da Injeção dos fluidos de teste.....	71
Figura 4.18 – (a) Imagem do <i>spray</i> de EXXSOL D60 e (b) representação gráfica de três perfis horizontais de intensidades de pixels para a identificação da posição das bordas do <i>spray</i> em termos das coordenadas de posição $x(\text{cm})$ e $y(\text{cm})$	72
Figura 4.19 – Identificação das bordas de um <i>spray</i> de EXXSOL D60 injetado a 100 bar para 1,15 ms após o início da injeção.....	75
Figura 4.20 – Imagem da injeção de EXXSOL D60 e a identificação das bordas em um gráfico posição y por posição x	78
Figura 4.21 – Penetração obtida de forma manual por meio de medição de distância em pixels. FONTE: (GUZZO, 2012).	79
Figura 4.22 – Penetração calculada com base nos dados das bordas para a injeção de EXXSOL D60 na pressão de 100 bar.	80
Figura 4.23– Segmento de reta mostrando o diâmetro máximo do <i>spray</i> na posição $y = -4$ cm e a penetração do diâmetro máximo definida neste trabalho.....	81
Figura 4.24 – Evolução das bordas do <i>spray</i> de EXXSOL D60 com pressão de injeção de 100 bar em vários tempos após o início da injeção.	88
Figura 4.25 – Diâmetro do <i>spray</i> em função da posição y (cm) para injeção de EXXSOL D60 a 100 bar e 0,69 ms após o início da injeção.	89
Figura 4.26 – (a) Elemento cilíndrico no interior do <i>spray</i> . (b) Diâmetro do <i>spray</i> em toda a sua extensão longitudinal.	90
Figura 4.27 – Elemento em forma de disco infinitesimal dentro do domínio do <i>spray</i> para o cálculo do volume acumulado do <i>spray</i> até uma posição axial x' a partir do orifício do injetor.	92
Figura 4.28 – Medição manual do ângulo de cone em uma imagem da injeção de EXXSOL D60 obtida através de um software de CAD.	95
Figura 4.29 – Ajustes quadráticos nas bordas do <i>spray</i> de EXXSOL D60 para cálculo do ponto de referência situado no vértice do <i>spray</i>	97
Figura 4.30 – Ponto de referência para um caso de um <i>spray</i> de EXXSOL D60 obtido a partir de ajustes quadráticos às bordas.	98
Figura 4.31 – Bordas da injeção dos <i>sprays</i> de (a) EXXSOL D60 e (b) EXXSOL D40 a 30 bar em vários instantes após o início da injeção.	99
Figura 4.32 – Forma do perfil das intensidades dos pixels analisado por meio da metodologia dos perfis em arcos de circunferência na linha 200 da matriz numérica da imagem.	101

Figura 4.33 – Valores das intensidades dos pixels em função da sua posição x (cm) para a medição do ângulo do <i>spray</i>	102
Figura 4.34 – Parâmetros para o cálculo do ângulo de cone pela metodologia dos perfis em arcos de circunferência.	103
Figura 4.35 – Análise de uma região do <i>spray</i> para obtenção dos ângulos de cone em vários perfis.	103
Figura 4.36 – Ângulos de cone da linha 100 até a linha 400 da matriz da imagem de um <i>spray</i> de EXXSOL D60 com pressão de injeção de 100 bar.....	104
Figura 4.37 – Imagem teste formada por um triângulo equilátero para verificação da metodologia de medição dos ângulos por meio dos perfis em arcos.....	105
Figura 4.38 – Medições dos ângulos pela metodologia dos perfis em arcos na imagem artificial. (a) Região analisada na imagem e (b) os ângulos medidos em função da distância à corda do arco.	106
Figura 4.39 – Representação do ângulo do <i>spray</i> para a uma injeção de EXXSOL D60 na posição $y = -1,0$ cm.....	107
Figura 4.40 – Injeção de <i>spray</i> no tempo de compressão no motor monocilindro de acesso óptico utilizado em pesquisa.....	110
Figura 4.41 – Determinação do ponto de referência na imagem do cilindro do motor de acesso óptico.	111
Figura 4.42 – Penetração para o <i>spray</i> de etanol em 110° de ângulo de virabrequim APMS com motor operando a 2000 RPM. Imagem do <i>spray</i> (a) e representação qualitativa da penetração do <i>spray</i> (b).	112
Figura 4.43 – Cálculo do ângulo do <i>spray</i> de etanol hidratado em $x = 6$ cm para motor funcionando a 2000 RPM e 110° APMS.....	113
Figura 5.1 – Ajustes de potência ($y = ax^b$) aos dados de vazão mássica do injetor <i>pressure-swirl</i>	116
Figura 5.2 – Vazão volumétrica do injetor <i>pressure-swirl</i> em função da pressão de injeção para os dois fluidos de teste.....	117
Figura 5.3 – Evolução temporal das bordas dos <i>sprays</i> para a injeção de EXXSOL D60 em diferentes pressões.....	118
Figura 5.4 – Evolução temporal das bordas dos <i>sprays</i> para a injeção de EXXSOL D40 em diferentes pressões.....	120
Figura 5.5 – Bordas do <i>spray</i> de EXXSOL D60 e desvios na posição x para a injeção com pressão de 100 bar e 1,15 ms após o início da injeção.	121

Figura 5.6 – Bordas dos <i>sprays</i> de EXXSOL D40 e desvios na posição x para a injeção com pressão de 100 bar e 1,15 ms após o início da injeção.	122
Figura 5.7 – (a) Penetração do EXXSOL D60 e (b) penetração do EXXSOL D40 para várias pressões.	123
Figura 5.8 – Evolução temporal do <i>spray</i> de EXXSOL D60 injetado com pressão de 30 bar mostrando a queda na penetração vertical máxima.	125
Figura 5.9 – Penetração da extremidade e penetração do diâmetro máximo do <i>spray</i> de EXXSOL D60.	126
Figura 5.10 – Penetração da extremidade e penetração do diâmetro máximo do <i>spray</i> de EXXSOL D40.	127
Figura 5.11 – Visualização da diferença entre penetração do diâmetro máximo e penetração da extremidade de um <i>spray</i> de EXXSOL D60.	128
Figura 5.12 – Penetração do EXXSOL D60 em função da Penetração do EXXSOL D40 nas mesmas condições.	129
Figura 5.13 – Penetração calculada pela correlação de HIROYASU; ARAI, 1990 para (a) EXXSOL D60 e (b) EXXSOL D40.	132
Figura 5.14 – Comparação entre resultados da correlação e resultados experimentais para os fluidos de trabalho.	134
Figura 5.15– Histogramas para os erros da Correlação comparados com dados experimentais dos fluidos simulacros.	137
Figura 5.16 – Comparação entre a penetração experimental de água com a penetração obtida da correlação.	138
Figura 5.17 – Penetração calculada e penetração experimental para a água em todas as pressões testadas.	139
Figura 5.18 – Histogramas para os erros da Correlação D_0 para a penetração comparados aos dados experimentais da água.	140
Figura 5.19 – Volume total dos <i>sprays</i> de (a) EXXSOL D60 e (b) EXXSOL D40 em função do tempo.	141
Figura 5.20 – Comparação da média do volume de EXXSOL D60 com a faixa de volume do EXXSOL D40.	142
Figura 5.21 – Volume dos <i>Sprays</i> em função do cubo da penetração do diâmetro máximo.	144
Figura 5.22 – Correlação de volume obtida com os fluidos EXXSOL D40 e EXXSOL D60 aplicada para dados de injeção de água.	145
Figura 5.23 – Comparação entre os volumes calculados e volumes experimentais aplicados ao <i>spray</i> de água.	146

Figura 5.24 – Volume acumulado dos <i>sprays</i> em função da posição axial x' para (a) EXXSOL D60 e (b) EXXSOL D40.	149
Figura 5.25 – Coeficiente de dispersão dos <i>sprays</i> de (a) EXXSOL D60 e (b) EXXSOL D40 em função da pressão de injeção.	150
Figura 5.26 – Comparação entre valores calculados e Valores experimentais para o coeficiente de dispersão para (a) o EXXSOL D60 e (b) o EXXSOL D40.	152
Figura 5.27 – Ajuste da Correlação para a dispersão dos <i>sprays</i> de EXXSOL D60 e EXXSOL D40.	153
Figura 5.28 – Ângulos em função da distância vertical até a corda do arco para a injeção de EXXSOL D60.	155
Figura 5.29 – Ângulos em função da distância vertical até a corda do arco para injeção de EXXSOL D40.	156
Figura 5.30 – Comparação entre os ângulos de EXXSOL D60 e EXXSOL D40 pela metodologia dos arcos.	159
Figura 5.31 – Ângulos em função da distância vertical ao orifício para injeção de EXXSOL D60.	160
Figura 5.32 – Ângulos em função da distância vertical ao orifício para injeção de EXXSOL D40.	161
Figura 5.33 – Histograma dos desvios dos ângulos para a pressão de injeção de 100 bar e tempos de 0,85; 1,12 e 1,46 ms.	162
Figura 5.34 – Comparação entre os ângulos de EXXSOL D60 e EXXSOL D40 pela metodologia dos dados de posição das bordas.	163
Figura 5.35 – (a) Todos os dados de ângulos medidos. (b) Dados usados para a obtenção da correlação de ângulo.	164
Figura 5.36 – Valores calculados em função dos valores experimentais dos ângulos de cone dos fluidos EXXSOL D60 e EXXSOL D40.	165
Figura 5.37 – Aplicação da correlação de ângulo de cone para o caso da injeção de água a 100 bar para o tempo de 1,15 ms.	166
Figura 5.38 – Comparação entre ângulo calculado e ângulo experimental para os <i>sprays</i> de Água para todas as condições testadas.	167
Figura 5.39 – Histograma para os erros da Correlação de ângulo comparados aos dados experimentais da água.	168
Figura 5.40 – Penetração para as injeções no tempo de compressão em três diferentes condições de rotação do motor.	169

Figura 5.41 – (a) Comparação da penetração para o ângulo de virabrequim e (b) comparações da penetração para o tempo.	170
Figura 5.42 – Pressão no cilindro em função do ângulo de virabrequim (a) desde o início da injeção até o final da compressão e (b) para o intervalo correspondente à injeção.....	171
Figura 5.43 – Velocidade do pistão em função do ângulo de virabrequim para as três condições de rotações utilizadas nos testes de injeção direta de etanol.	172
Figura 5.44 – Ângulos de Cone para o <i>Spray</i> de etanol em diferentes rotações para 110° APMS de compressão.....	173
Figura 5.45 – Posições das bordas dos <i>sprays</i> para 110° APMS de compressão para o motor operando a 1000, 2000 e 3000 RPM.	174

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Diâmetros médios e suas aplicações, (LEFEBVRE, 1989).....	41
Tabela 4.1 – Viscosidade absoluta e Tensão superficial dos fluidos de teste.	63
Tabela 4.2 – Viscosidade absoluta e Tensão superficial dos combustíveis.....	63
Tabela 4.3 – Algumas Especificações do Motor monocilindro de Pesquisa.....	68
Tabela 4.4 – Identificação das bordas dos <i>sprays</i> para três perfis horizontais.....	73
Tabela 4.5 – Símbolos e dimensões de todos os parâmetros dos testes.	83
Tabela 4.6 – Matriz dimensional para os testes realizados.....	83
Tabela 5.1 – Vazão mássica e volumétrica de EXXSOL D60.	115
Tabela 5.2 – Vazão mássica e volumétrica de EXXSOL D40.	115
Tabela 5.3 – Média da incerteza na posição das bordas.....	122
Tabela 5.4 – Resultados da análise de variância para a pressão de injeção de 100 bar para penetração.....	130
Tabela 5.5 – Expoentes dos números adimensionais da correlação para o diâmetro máximo	134
Tabela 5.6 – Erros da correlação aplicada à injeção de água para todas as pressões.....	139
Tabela 5.7 – Resultados da análise de variância para a medição de volume na pressão de 100 bar.....	143
Tabela 5.8 – Erros percentuais médios da Correlação para o volume aplicada à água.	146
Tabela 5.9 – Equações para o volume em função da posição axial x' para o EXXSOL D60.	147
Tabela 5.10 – Equações para o volume em função da posição axial x' para o EXXSOL D40.	148
Tabela 5.11 – Parâmetros de ajuste na comparação dos ângulos obtidos através de arcos....	158
Tabela 5.12 – Parâmetros de ajuste na comparação dos ângulos obtidos por dados de posição.	162

SÍMBOLOS EM UNIDADES DO SI

a	Expoente do número de Reynolds em correlações obtidas nesta Tese.
\vec{a}	Aceleração de uma partícula (m/s^2).
$a1$	Coefficiente de x^2 no ajuste quadrático à borda superior do <i>spray</i> (cm^{-1}).
$a2$	Coefficiente de x^2 no ajuste quadrático à borda inferior do <i>spray</i> (cm^{-1}).
B	Número de Spalding (adimensional).
b	Coefficiente do adimensional Weber em correlações obtidas nesta Tese.
$b1$	Coefficiente de x' no ajuste quadrático à borda superior do <i>spray</i> .
$b2$	Coefficiente de x' no ajuste quadrático à borda inferior do <i>spray</i> .
c	Expoente do número de Euler nas correlações obtidas nesta Tese.
c_p	Calor específico (kJ/kg).
$c1$	Termo independente na equação quadrática da borda superior do <i>spray</i> (cm).
$c2$	Termo independente na equação quadrática da borda inferior do <i>spray</i> (cm).
d	Expoente do adimensional (Vt/D) nas correlações obtidas nesta Tese.
$dist$	Distância das bordas de um <i>spray</i> até um ponto de referência (cm).
D	Comprimento característico ou diâmetro (m).
D_{ab}	Diâmetro característico de ordem $(a+b)$ com a e b inteiros positivos (m).
D_{corda}	Distância de um ponto na imagem até à corda de um arco de pixels (cm).
D_g	Diâmetro de uma gotícula (m).
D_i	Diâmetro médio da faixa de tamanhos i .
D_p	Diâmetro de partícula (m).
d_{pixel}	Distância em pixels entre dois pontos de uma imagem.
DR	Densidade de resolução ou fator de escala (pixels/cm).
D_{RR}	Parâmetro da distribuição Rosin-Rammler dependente do diâmetro Sauter (m).
$D(t)$	Diâmetro da gotícula evaporando no tempo t (m).
$D_{t=0}$	Diâmetro inicial de uma gotícula.
dV	Volume de um elemento diferencial do <i>spray</i> (m^3).
D_{χ^2}	Parâmetro da distribuição χ^2 .
D_0	Diâmetro de um orifício por onde sai um líquido (m).
d_0	Diâmetro inicial de uma gotícula (m).
D_{10}	Diâmetro médio (m).
D_{20}	Diâmetro de gotícula para controle de área superficial (m).

D_{21}	Diâmetro de gotícula com aplicação na área de absorção (m).
D_{30}	Diâmetro de gotícula para controle de volume (m).
D_{31}	Diâmetro de gotícula com aplicação em evaporação e difusão (m).
D_{32}	Diâmetro de Sauter (m).
D_{43}	Diâmetro de Brouckere ou Herdan (m).
e	Expoente do número adimensional $\Delta y/D_0$ da correlação dos ângulos.
Eu	Número de Euler (adimensional).
f_D	Frequência Doppler (Hz).
$f(x,y)$	Energia luminosa de um objeto nas coordenadas (x, y) .
g	Aceleração da gravidade (m/s^2).
h	Espessura do anel de líquido no orifício do injetor <i>pressure-swirl</i> (m).
h_v	Calor latente de vaporização de um líquido (J/kg).
i	A i -ésima linha de uma matriz numérica.
i_{ref}	Linha na matriz numérica referente ao vértice do cone do <i>spray</i> .
$i(x,y)$	Função de iluminação sobre um objeto.
j	A j -ésima coluna de uma matriz numérica.
j_{ref}	Coluna na matriz numérica referente ao vértice do cone do <i>spray</i> .
\dot{m}_{D40}	Vazão mássica de EXXSOL D40 através do injetor (g/s).
\dot{m}_{D60}	Vazão mássica de EXXSOL D60 através do injetor (g/s).
m_g	Massa de uma gotícula formada em um gotejamento (kg).
n	Número de medições.
N_i	Número de gotículas em uma faixa de tamanhos i .
ΔP	Pressão de injeção (Pa).
q	Parâmetro da distribuição Rosin-Rammler (adimensional).
Q	Vazão volumétrica do injetor (m^3/s).
q/r_+	Fluxo de calor de um gás para uma gotícula líquida (W/m^2).
q/r_-	Fluxo de calor para o interior de uma gotícula (W/m^2).
$q_v(t)$	Vazão volumétrica de líquido instantânea (m^3).
r	Raio de uma gota não deformada (m).
R_{cm}	Raio de um arco de pixels em uma imagem do <i>spray</i> (cm).
$r(x,y)$	Função de reflexão de energia luminosa de um objeto.
Re	Número de Reynolds (adimensional).
<i>round</i>	Função que arredonda um número real ao número inteiro mais próximo.
R_{pixel}	Raio de um arco em pixels de uma imagem do <i>spray</i> .
s	Distância entre duas franjas no volume de medição da técnica LDA (m).

S	Penetração do diâmetro máximo dos <i>sprays</i> (cm ou m).
S_{tip}	Penetração da extremidade do <i>spray</i> (cm ou m).
t	Tempo (s).
t_{std}	Coefficiente t-student para 95% de probabilidade e n-1 graus de liberdade.
u	Componente da velocidade na direção x .
u_{des}	Desvio padrão.
u_f	Velocidade de um fluido (m/s).
u_p	Velocidade de uma partícula (m/s)
u_{rel} ou U_{rel}	Velocidade relativa entre uma partícula e um fluido (m/s).
v	Componente da velocidade na direção y .
V	Velocidade Resultante (m/s).
Ψ	Volume ocupado pelo <i>spray</i> (cm ³) ou (m ³).
Ψ_L	Volume de líquido injetado por pulso de injeção (cm ³) ou (m ³).
V_p	Velocidade de uma partícula (m/s).
Ψ_{RR}	Fração de volume total na distribuição Rosin-Rammler (adimensional).
Ψ_{χ^2}	Fração do volume total na distribuição χ^2 .
V_0	Velocidade média de saída do líquido do orifício do injetor (m/s).
We	Número de Weber (adimensional).
We_g	Número de Weber da fase gasosa (adimensional).
x'	Posição x da borda do <i>spray</i> após uma transformação de rotação (cm).
x_b	Posição x da borda (esquerda ou direita) do <i>spray</i> (cm).
xd	Matriz de armazenamento das posições x da borda direita dos <i>sprays</i> (cm).
yd	Matriz de armazenamento das posições y da borda direita dos <i>sprays</i> (cm).
$x_{d,i}$	Posição x da borda direita do <i>spray</i> identificada na i -ésima linha (cm).
$x_{e,i}$	Posição x da borda esquerda do <i>spray</i> identificada na i -ésima linha (cm).
x_j	Posição x do pixel da j -ésima coluna de uma matriz numérica (cm).
x_{jd}	Posição x da borda direita do <i>spray</i> localizada na j -ésima coluna (cm).
x_{je}	Posição x da borda esquerda do <i>spray</i> localizada na j -ésima coluna (cm).
x_{ref}	Posição x do ponto de referência do vértice do cone do <i>spray</i> (cm).
y_{ref}	Posição y do ponto de referência do vértice do cone do <i>spray</i> (cm).
y	Parâmetro de deformação de gota (adimensional).
y'	Posição y da borda do <i>spray</i> após uma transformação de rotação (cm).
y'_1	Ajuste quadrático à borda superior do <i>spray</i> após rotação (cm).
y'_2	Ajuste quadrático à borda inferior do <i>spray</i> após rotação (cm).
y_b	Posição y da borda direita ou esquerda do <i>spray</i> (cm).

Y_{FS}	Fração em massa de um combustível na interface gás/gotícula (adimensional).
$Y_{F\infty}$	Fração em massa de um combustível longe da gotícula (adimensional).
y_i	Posição y da i -ésima linha de uma matriz numérica (cm).
y_0	Posição y do orifício do injetor (cm)
y_1	Posição y da borda superior do <i>spray</i> através de um ajuste quadrático (cm).
y_2	Posição y da borda inferior do <i>spray</i> através de um ajuste quadrático (cm).
Z	Número de Ohnesorge (adimensional).

LETRAS GREGAS

α	Ângulo entre dois raios lasers na técnica LDA.
α_s	Difusividade térmica (m^2/s).
α_1	Parcela da esquerda em ângulo calculado por meio dos perfis em arcos.
α_2	Parcela da direita em ângulo calculado por meio dos perfis em arcos.
β	Coefficiente de evaporação (m/s).
γ	Função gama.
Δy	Distância vertical do orifício do injetor (cm).
θ	Ângulo do <i>spray</i> (rad ou graus).
λ	Comprimento de onda de um laser (m).
λ_s	Condutividade térmica de um combustível na interface gás/gotícula (W/k.m).
μ	Viscosidade absoluta de um fluido (Pa.s).
μ_L	Viscosidade absoluta de um líquido (Pa.s).
Π	Grupo adimensional.
Π_1	Razão entre a penetração e um comprimento característico.
Π_2	Número de Reynolds Re .
Π_3	Número de Weber.
Π_4	Metade do número de Euler.
Π_5	Número adimensional relacionado ao tempo após o início da injeção.
ρ	Massa específica (kg/m^3),
ρ_f	Massa específica de um fluido (kg/m^3).
ρ_G	Massa específica de um gás (kg/m^3).
ρ_{got}	Massa específica de uma gota (kg/m^3).
ρ_L	Massa específica de um líquido (kg/m^3).
ρ_p	Massa específica de uma partícula (kg/m^3).
ρ_s	Massa específica da fase gasosa na interface gás/gotícula (kg/m^3).
σ	Tensão superficial (N/m).
φ	Coefficiente de dispersão (adimensional).

SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
APMS	Antes do Ponto Morto Superior.
CIMA	Conselho Interministerial do Açúcar e do Alcool.
CTM	Centro de Tecnologia da Mobilidade.
DR	Densidade de resolução (pixels/cm).
GDI	<i>Gasoline Direct Injection</i>
LDA	<i>Laser Doppler Anemometry.</i>
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.
MATLAB	<i>Matrix Laboratory.</i>
PDA	<i>Phase Doppler Anemometry.</i>
PDI	<i>Phase Doppler Interferometry.</i>
PDPA	<i>Phase Doppler Particle Analyzer.</i>
PFI	<i>Port Fuel Injection.</i>
pH	Potencial hidrogeniônico.
PIV	<i>Particle Image Velocimetry.</i>
Pixel	Aglutinação de <i>Picture Element</i>
PMS	Ponto Morto Superior.
RPM	Rotações por minuto
SI	Sistema Internacional de Unidades.
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Importância do estudo dos <i>sprays</i> combustíveis no contexto atual	1
1.2	Organização do trabalho	2
2	OBJETIVOS E RELEVÂNCIA	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1	<i>Sprays</i> e atomização.....	4
3.2	Sistemas de injeção direta de combustível em motores do ciclo Otto.....	5
3.3	Combustíveis nacionais	13
3.3.1	Gasolina.....	13
3.3.2	Etanol.....	14
3.4	Visualização e técnicas ópticas aplicadas na análise dos <i>sprays</i>	16
3.4.1	Representação matemática de uma imagem.....	16
3.4.2	<i>Shadowgraph</i> (Fotografia da sombra).....	20
3.4.3	Velocimetria por Imagens de Partículas (PIV).....	21
3.4.4	Anemometria Laser Doppler (LDA)	25
3.4.5	Interferometria por Efeito Doppler.....	29
3.5	Características macroscópicas dos <i>sprays</i>	32
3.5.1	Dispersão	32
3.5.2	Ângulo de cone.....	33
3.5.3	Penetração.....	33
3.5.4	Comprimento de quebra (<i>break-up</i>)	35
3.6	Características microscópicas dos <i>sprays</i>	40
3.6.1	Diâmetros médios	40
3.6.2	Distribuições de tamanhos.....	42
3.6.3	Evaporação de gotículas	47

3.7	Trabalhos relacionados com análises de <i>sprays</i>	50
4	METODOLOGIA	55
4.1	Configurações dos testes experimentais	55
4.1.1	Injeções em condições estáticas	61
4.1.2	Injeções em condições dinâmicas.....	67
4.2	Bordas dos <i>sprays</i>	70
4.3	Penetração	77
4.3.1	Penetração vertical máxima.....	77
4.3.2	Penetração do diâmetro máximo dos <i>sprays</i>	80
4.3.3	Correlações para a penetração do diâmetro máximo.....	82
4.4	Medição do volume dos <i>sprays</i>	87
4.4.1	Calculo do volume total através de elementos cilíndricos	87
4.4.2	Equações para os volumes acumulados dos <i>sprays</i> em função da posição axial.....	91
4.5	Estimativas para a dispersão dos <i>sprays</i>	94
4.6	Metodologias para medição do ângulo de cone.....	95
4.6.1	Escolha do ponto de referência para medição dos ângulos	96
4.6.2	Ângulos de cone através dos perfis em arcos	100
4.6.3	Ângulos de cone através das posições das bordas.....	107
4.6.4	Correlação para os ângulos de cone	108
4.7	Análise do <i>spray</i> de etanol em condições dinâmicas.....	109
4.7.1	Penetração.....	110
4.7.2	Ângulo de cone.....	113
4.8	Erros aleatórios	114
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	115
5.1	Análise experimental estática dos <i>sprays</i>	115
5.1.1	Vazão mássica e vazão volumétrica do injetor.....	115
5.1.2	Bordas dos <i>sprays</i>	118
5.1.3	Penetração dos <i>sprays</i>	123

5.1.4	Correlações para a penetração do diâmetro máximo.....	133
5.1.5	Medição do Volume dos <i>sprays</i>	140
5.1.6	Correlação para os volumes dos <i>sprays</i>	143
5.1.7	Equações para os volumes dos <i>sprays</i> em função da posição axial	147
5.1.8	Estimativas para a dispersão dos <i>sprays</i>	150
5.1.9	Ângulos de cone através dos perfis em arcos	154
5.1.10	Ângulos de cone através dos dados das posições das bordas	160
5.1.11	Correlação para o ângulo de cone.....	164
5.2	Análise experimental dinâmica do <i>spray</i> de etanol	168
6	CONCLUSÕES.....	175
7	TRABALHOS FUTUROS.....	178
8	BIBLIOGRAFIA.....	179
	ANEXOS.....	186
	ANEXO A - Rotina Computacional para identificação das bordas dos <i>sprays</i>	186
A.1	Identificação das bordas.....	187
A.2	Pós-processamento das bordas.....	190

1 INTRODUÇÃO

1.1 Importância do estudo dos *sprays* combustíveis no contexto atual

A injeção direta de combustíveis em motores de ignição por centelha vem se constituindo em uma alternativa cada vez mais analisada em trabalhos técnicos e científicos. Existe uma série de vantagens desse sistema comparativamente com o sistema tradicional de injeção indireta com preparação de mistura no coletor de admissão. Como destacado em ZHAO, 2010, a necessidade de vaporização do combustível líquido dentro do cilindro provoca um resfriamento da câmara de combustão, diminuindo as chances de ocorrência de detonação, abrindo assim a possibilidade de operação do motor com razões de compressões mais elevadas.

Nos últimos anos, têm se tornado cada vez mais restritivas, as normas e regulações quanto à emissão de poluentes. Muitos pesquisadores e engenheiros da área automotiva têm concentrado seus esforços para melhorar a eficiência dos motores de combustão interna, reduzir o consumo de combustíveis e enquadrá-los dentro das normas referentes às emissões. A atomização dos combustíveis tem influência direta sobre os parâmetros que devem ser melhorados e o seu estudo é de grande relevância no contexto atual.

Como discutido em LEFEBVRE, 1989, o desempenho da queima de combustíveis líquidos em motores de combustão interna depende fortemente dos parâmetros relacionados à injeção do combustível. A efetiva atomização do líquido tem o papel de aumentar a sua área específica superficial e assim alcançar altas taxas de mistura e evaporação possibilitando assim maior facilidade de ignição, maior liberação de energia, e menor concentração de poluentes nos gases de exaustão.

Dentro desse contexto de importância do estudo da injeção dos combustíveis e também das características dos *sprays* produzidos por uma tecnologia relativamente recente na área automotiva, como é o caso da injeção direta em motores do ciclo Otto, reside a motivação da elaboração de estratégias mais robustas de análises, para melhor entendimento do fenômeno. Esse é o foco principal do presente trabalho.

Este trabalho foi realizado no Centro de Tecnologia da Mobilidade (CTM) que é constituído de um conjunto de laboratórios que tem como atividade principal, as pesquisas com motores de combustão interna. O CTM faz parte do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais. Para o trabalho, houve a utilização da infraestrutura do Laboratório de Combustão junto com alguns equipamentos do Laboratório de Velocimetria a Laser. Também foi utilizado o motor com acesso óptico do CTM.

1.2 Organização do trabalho

O texto da Tese começa com a revisão bibliográfica tratando temas já descritos na literatura a respeito do processo de atomização, dos sistemas de injeção direta, de algumas técnicas óticas e das características macroscópicas e microscópicas dos *sprays*.

Após a parte inicial de revisão bibliográfica, segue a seção de Metodologia. A Metodologia foi desenvolvida de forma a apresentar análises alternativas e automatizadas para evitar medições manuais. Critérios numéricos e matemáticos precisos para a definição da região do *spray* foram adotados para reduzir a subjetividade da análise. São apresentadas estratégias de análises para geração de resultados associados à injeção direta de *sprays*. Essas estratégias foram estabelecidas com base na elaboração de códigos computacionais de análise de matrizes escritos no ambiente MATLAB. Dois dos códigos elaborados para a Tese se encontram no Anexo A.1 para identificação das bordas dos *sprays* e no Anexo A.2 para pós-processamento dos dados de posição das bordas.

A escolha do MATLAB ocorreu devido à facilidade de sua linguagem de programação, pela existência de um conjunto específico de funções para análise de imagens e por sua ótima capacidade de trabalhar com matrizes numéricas. Um único comando do MATLAB, por exemplo, é capaz de armazenar uma imagem digital, em uma variável com formato de uma matriz numérica. Também por um único comando, o MATLAB é capaz de converter uma imagem colorida em uma imagem em escala de cinzas.

A seção de resultados mostra dados predominantemente quantitativos das caracterizações dos *sprays* obtidos da utilização das metodologias criadas e as conclusões resumem os principais resultados e destacam os pontos inéditos da Tese.

2 OBJETIVOS E RELEVÂNCIA

O objetivo geral do presente trabalho é a elaboração, aplicação de metodologias de tratamento de imagens e a obtenção de correlações preditivas do comportamento dos *sprays* produzidos por um injetor de injeção direta automotivo do tipo *pressure-swirl*. Correlações para este tipo de injetor relacionando propriedades macroscópicas dos *sprays* têm rara ocorrência na literatura atual onde o foco principal são as relações entre as variáveis microscópicas (como as distribuições de velocidades e os tamanhos das gotículas). Correlações envolvendo ao mesmo tempo propriedades macroscópicas e propriedades microscópicas também são escassas em trabalhos técnicos e a presente Tese propõe algumas relações inéditas utilizando tal conexão.

Como parte dos objetivos específicos, foi realizada a comparação e análise em um primeiro momento da injeção de dois fluidos simulacros em condições estáticas laboratoriais (injeção em atmosfera inicialmente estática com o injetor fora do motor), usando um injetor de injeção direta automotivo com variação da pressão de injeção na faixa compreendida entre 30 e 110 bar. As metodologias elaboradas foram aplicadas para esta finalidade específica. Em uma etapa posterior, a análise em condições dinâmicas, com a injeção direta de etanol hidratado por um injetor de injeção direta de múltiplos orifícios em um motor com acesso óptico foi realizada. As metodologias de tratamento de imagens digitais inicialmente elaboradas para os *sprays* de cone oco foram adaptadas para esta finalidade específica.

A relevância e ineditismo do trabalho residem também na criação de ferramentas capazes de gerar resultados e dados de condições de contorno e validações para simulações numéricas de *sprays* constituindo em outro objetivo específico da Tese.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 *Sprays* e atomização

A desintegração de uma massa líquida em pequenas partes (ou gotículas) em uma atmosfera gasosa é de grande importância em inúmeros processos industriais e têm várias outras aplicações na agricultura, na medicina e meteorologia. Esse processo, como descrito em LEFEBVRE, 1989, é chamado de atomização e ocorre devido à interação da massa líquida com o ambiente gasoso. Essencialmente, o que se faz necessário é uma elevada diferença de velocidade entre o líquido a ser atomizado e a atmosfera gasosa onde o líquido é descarregado. Devido à natureza aleatória do processo, um grande espectro de dimensões das gotículas é formado e todo o conjunto constituído pela massa líquida fragmentada é denominado *spray*.

Uma consequência da atomização é o aumento da superfície de contato da fase líquida com a fase gasosa. Em processos em que as transferências de massa e energia entre as duas fases através da interface são importantes, a fragmentação da fase líquida torna-se uma alternativa interessante.

LEFEBVRE, 1989, cita vários exemplos de *sprays* no cotidiano. As chuvas, as névoas produzidas por quedas d'água de cachoeiras ou pelas ondas do mar são exemplos encontrados na própria natureza. Na engenharia, a combustão é extremamente dependente da atomização dos combustíveis líquidos em motores Diesel, turbinas a gás, motores por ignição a centelha e fornalhas industriais. A redução do tamanho das gotículas dos combustíveis nesses dispositivos pode significar maior liberação de energia e menor emissão de poluentes.

Os dispositivos capazes de gerar *sprays* são denominados atomizadores. No trabalho de CHIGIER, 2006, discute-se a importância do modelo do atomizador nas estruturas dos *sprays*. Características como a geometria da parte interna, a sua rugosidade, a frequência dos pulsos de operação, ou ainda a possibilidade de ocorrência de cavitação são algumas características dos atomizadores que influenciam na atomização.

3.2 Sistemas de injeção direta de combustível em motores do ciclo Otto

Desde a primeira série de motores de injeção direta de gasolina lançada pela Mitsubishi em 1995, o desenvolvimento desses motores passou por um considerável avanço. A principal razão dessa tendência é que o consumo dos motores atuais deve ser significativamente reduzido com o objetivo de atender às futuras exigências de redução das emissões de dióxido de carbono - CO₂. Motores do ciclo Diesel apresentam excelente eficiência, mas deixam a desejar no quesito emissões de óxidos de nitrogênio - NO_x. O desafio mais importante, portanto, é a redução do consumo específico de combustível com o objetivo de diminuir a grande discrepância entre os motores do ciclo Otto a gasolina em relação aos motores do ciclo Diesel e reduzir as emissões de CO₂ no ciclo Otto, (BAUMGARTEN, 2006).

Nas últimas décadas, um dos objetivos das pesquisas em motores de combustão interna, tem sido o desenvolvimento de motores que combinem as melhores características tanto dos motores Diesel quanto dos motores convencionais de gasolina com ignição por centelha. O objetivo é combinar a potência específica do motor do ciclo Otto com a eficiência do motor Diesel. Trabalhos técnicos na área têm demonstrado que esse objetivo tem sido aproximado por meio do desenvolvimento de motores de injeção direta quatro tempos com ignição por centelha, (ZHAO; LAI; HARRINGTON, 1999).

Recentemente novas alternativas vêm sendo estudadas para os motores de injeção direta considerando até mesmo a projeção da diversidade de combustíveis em um cenário futuro. No trabalho de ALEIFERIS; ROSATI, 2012, por exemplo, foi estudada a combustão em um motor com injeção direta de hidrogênio. Foi utilizado um motor com acesso óptico, originalmente projetado para operar com combustíveis líquidos, com um injetor de injeção direta de gasolina de seis orifícios, mas utilizado como injetor de hidrogênio. Parâmetros como a velocidade do centroide da chama e velocidade do crescimento da chama foram avaliados. Também foi constatado que a natureza do fenômeno da autoignição é bastante diferente daquela que ocorre com hidrocarbonetos combustíveis. A injeção direta de hidrogênio, no entanto, ainda possui literatura escassa e dificuldades de operação como constatado em ALEIFERIS; ROSATI, 2012, que salientou que a baixa lubricidade do hidrogênio tem o efeito de diminuir a vida útil do injetor. Injeção direta de hidrogênio também é considerada nos trabalhos de SHUDO; OBA, 2009, ROY; KAWAHARA; TOMITA, 2013, DU et al., 2016 e SHI et al., 2016.

Outros trabalhos que consideram a projeção da diversidade de combustíveis em um cenário futuro na injeção direta podem ser encontrados para a utilização de biodiesel, (SALLEVELT; POZARLIK; BREM, 2015), mistura de etanol e biodiesel, (HUANG et al., 2015) e misturas de n-butanol, Diesel e biodiesel, (LIU; LI; JIN, 2015) para aplicações em motores Diesel. A utilização de injeção direta de etanol em motores do ciclo Otto é considerada no trabalho de BAÊTA; PONTOPPIDAN; SILVA, 2015.

A Figura 3.1 mostra de forma esquemática a injeção indireta convencional no coletor de admissão ou PFI do inglês *Port Fuel Injection* e a técnica de injeção de combustível diretamente dentro do cilindro ou GDI do inglês *Gasoline Direct Injection*.

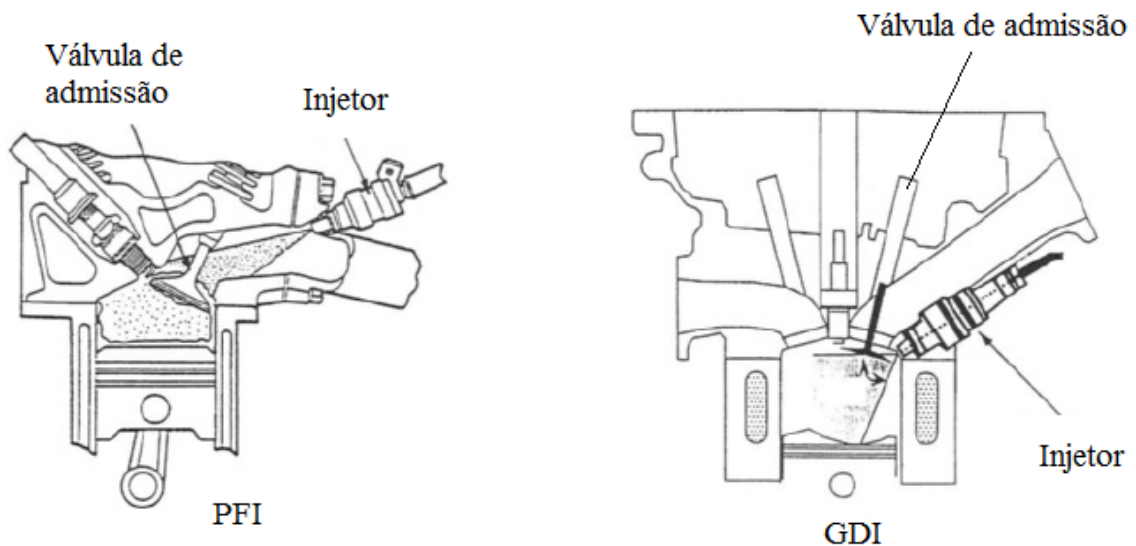


Figura 3.1 – Diferença entre a injeção no coletor de admissão PFI e a injeção direta em motores do ciclo Otto GDI. FONTE: adaptado de ZHAO, 2009.

A injeção indireta convencional ocorre com a formação inicial da mistura ar e combustível dentro do coletor de admissão enquanto na injeção direta, o combustível é diretamente injetado dentro do cilindro do motor que é onde ocorre a mistura com o ar. Na injeção direta, apenas o ar entra no cilindro através do coletor de admissão enquanto nos sistemas de injeção indireta entra no cilindro uma mistura de combustível e ar.

Motores com injeção direta de gasolina possuem, em geral, melhor desempenho em consumo de combustível, maior potência, menores níveis de emissão de hidrocarbonetos e constituem a nova geração de motores do ciclo Otto, (DING et al., 2011).

ZHAO; HARRINGTON, 2002, também ressaltam que na injeção indireta convencional, na maior parte dos motores automotivos, o combustível líquido é direcionado para a válvula de admissão no momento em que ela ainda se encontra fechada. Em partidas a frio, um filme líquido transiente de combustível é formado no coletor de admissão provocando um atraso na entrega do combustível ao cilindro do motor devido à vaporização incompleta. A quantidade de combustível injetada em partidas a frio, também excede de maneira significativa à quantidade estequiométrica necessária elevando assim as emissões de hidrocarbonetos não queimados. Tal fato é ainda agravado no caso da injeção indireta de etanol, gerando emissões de etanol não queimado.

Como discutido em ZHAO; HARRINGTON, 2002, existe a possibilidade de um maior controle da quantidade de combustível entregue ao cilindro além da eliminação completa da formação do filme líquido de combustível no coletor de admissão quando a estratégia de injeção direta é utilizada.

A injeção direta, no entanto, possibilita a formação de filme fluido no pistão e nas paredes do cilindro. As altas pressões requeridas para uma efetiva atomização resultam em gotículas com alta quantidade de movimento que as fazem percorrer distâncias significativas em curto período de tempo, (SERRAS-PEREIRA; ALEIFERIS; RICHARDSON, 2012). Portanto, a emissão de hidrocarbonetos não queimados ainda pode ocorrer mesmo na injeção direta. Os tempos para formação da mistura ar/combustível são menores exigindo estratégias específicas de injeção.

Os injetores utilizados nos sistemas de injeção direta operam com pressões muito mais elevadas que os injetores usados para a injeção no coletor. Como consequência a atomização na injeção direta é mais efetiva, as gotículas formadas são menores e maiores taxas de evaporação são alcançadas, (ZHAO, 2009).

Uma forma de atingir a atomização efetiva necessária para a injeção direta é através de *sprays* no formato aproximado de um cone oco. Esses *sprays*, como discutido em BAUMGARTEN, 2006, são tipicamente caracterizados por pequenos diâmetros das gotículas, efetiva mistura ar-combustível, baixas penetrações e alta eficiência de atomização. Os injetores do tipo *pressure-swirl* são capazes de fornecer *sprays* com essa estrutura, onde um escoamento rotacional de um filme fino e cilíndrico dentro do injetor é capaz de formar a estrutura cônica quando o fluido emerge do orifício do injetor. A Figura 3.2 mostra a estrutura típica de um *spray* produzido por um atomizador do tipo *pressure-swirl*.

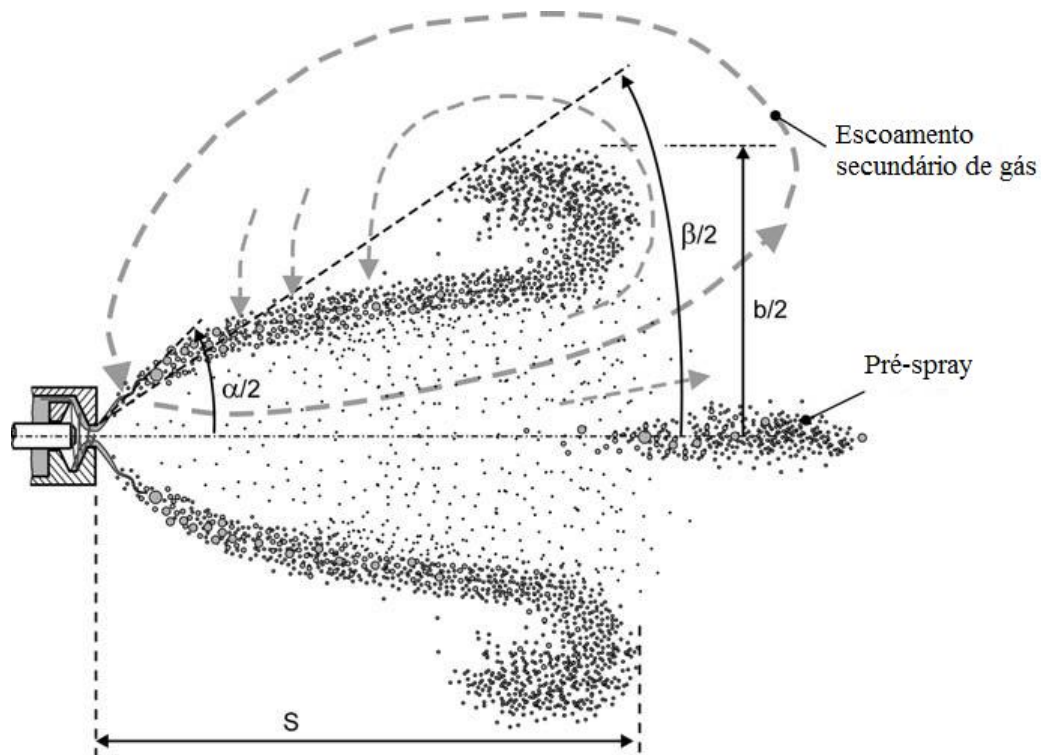


Figura 3.2 – *Spray* produzido por um injetor do tipo *pressure-swirl*. FONTE: adaptado de BAUMGARTEN, 2006.

Em BAUMGARTEN, 2006, é explicado que no início da injeção o líquido sai do injetor no formato de um *spray* sólido devido ao baixo movimento rotacional e à pequena velocidade do líquido no interior do injetor, formando a estrutura do *pré-spray* mostrada na Figura 3.2.

Ainda na Figura 3.2, α corresponde a um ângulo próximo do injetor, β 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 devido ao escoamento secundário de gás mostrado na figura, uma estrutura em vórtice é formada na extremidade das bordas do *spray*. Algumas gotículas também preenchem a parte interna do cone, no entanto, a maior concentração delas ocorre nas bordas dos *sprays*.

Na aquisição de dados pela técnica de Velocimetria por Imagens de Partículas no trabalho de dissertação de GUZZO, 2012, as imagens obtidas por iluminação através de um plano de laser passando através do cone formado por um injetor BOSCH do tipo *pressure-swirl*, mostraram intensidades dos pixels mais altas próximas das bordas dos *sprays* configurando uma concentração maior de gotículas naquela região, coerente com a distribuição espacial de líquido sugerida na Figura 3.2 de BAUMGARTEN, 2006, para um injetor *pressure-swirl*. A

Figura 3.3 (a) mostra essa situação onde se destacou na imagem as posições dos pixels cujos valores das intensidades estão no gráfico da Figura 3.3(b). Os valores foram traçados em função do ângulo do arco a 0,7 cm do orifício do injetor. É possível observar que os dados formam dois picos nas regiões destacadas pelos círculos que se referem às bordas do *spray*.

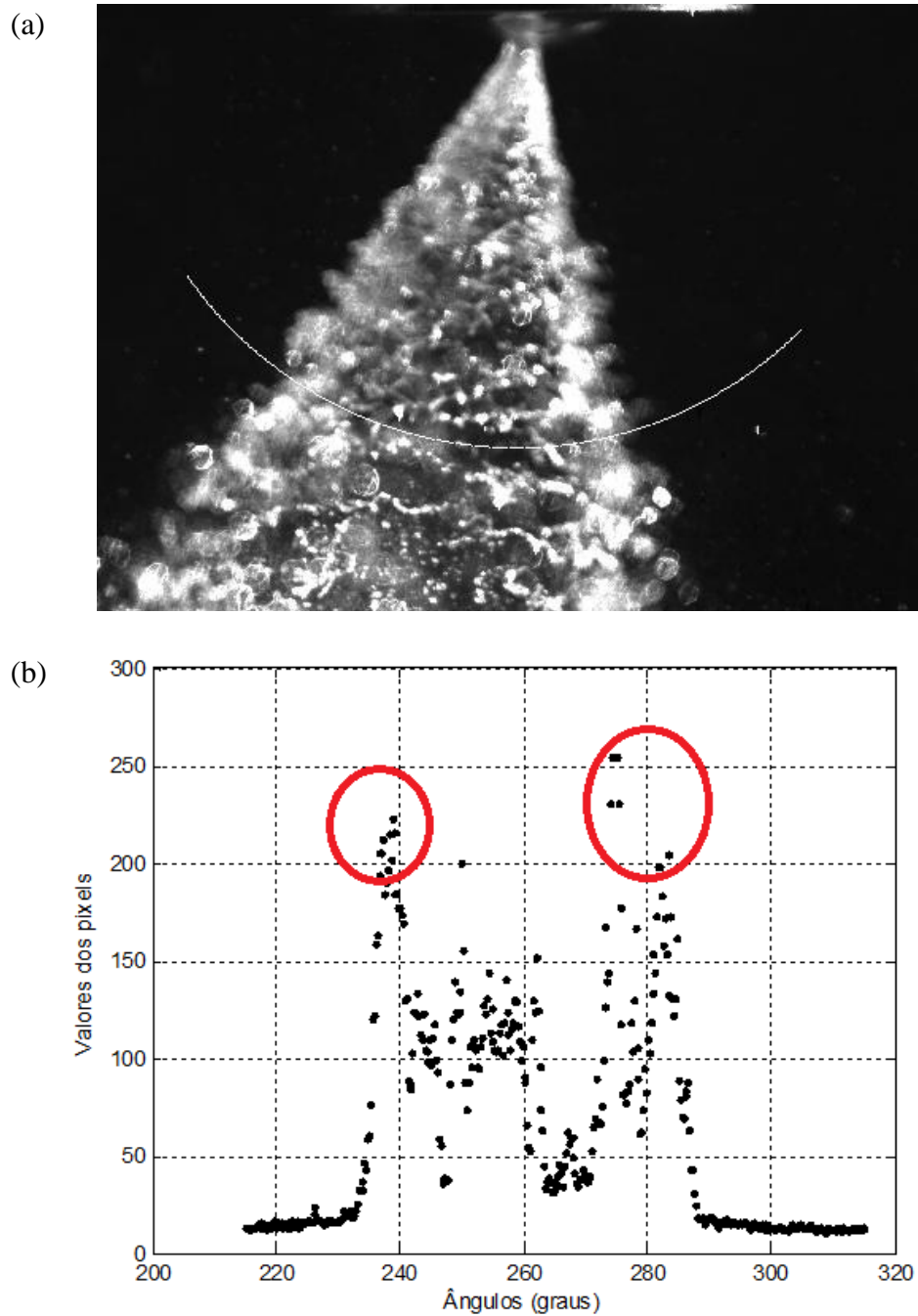


Figura 3.3 – Perfil de pixel mostrando concentração de gotículas acentuada nas bordas do *spray*. FONTE: (GUZZO, 2012).

No trabalho de conclusão de curso de REIS, 2015, realizado no CTM, para simulação do *spray* em câmara atmosférica e em condições estáticas de um injetor do tipo *pressure-swirl*, são apresentados resultados de campos de velocidades da fase gasosa na região do *spray*. Um desses resultados está mostrado na Figura 3.4.

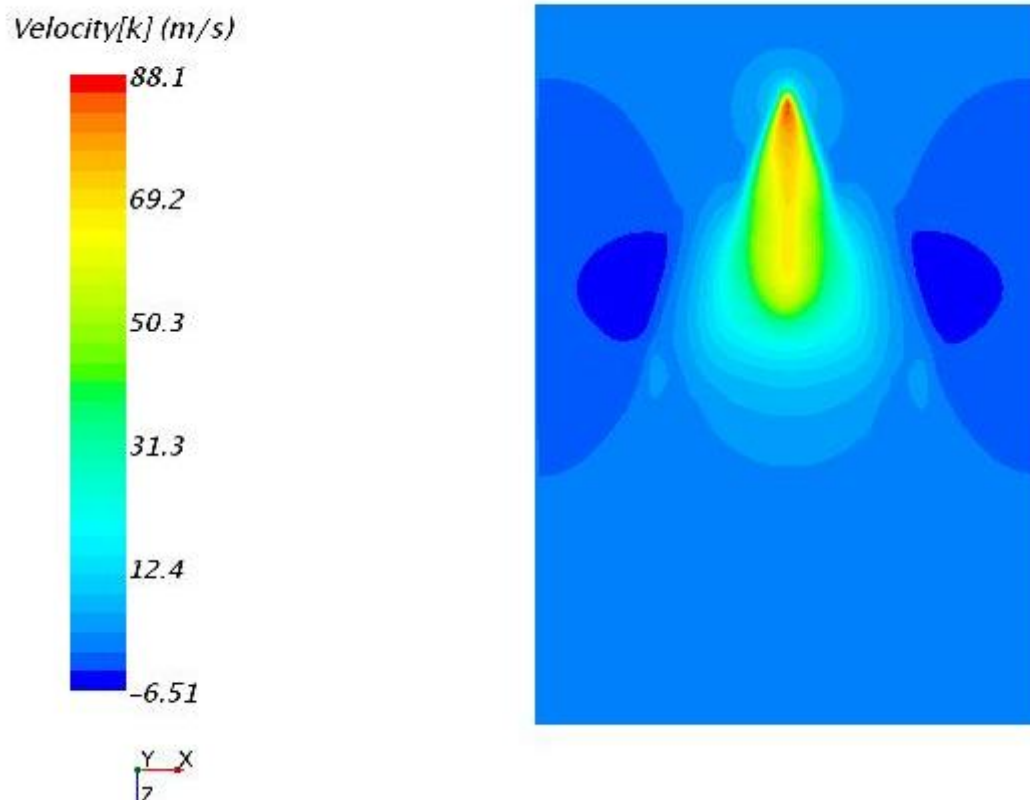


Figura 3.4 – Simulações do campo de velocidade da fase gasosa na região do *spray*. FONTE: REIS, 2015.

Em todas as simulações realizadas aparecem núcleos de velocidades negativas em sentido oposto ao da injeção que são coerentes com o escoamento secundário de gás mostrado na Figura 3.2 de BAUMGARTEN, 2006. Esse escoamento em sentido inverso provoca a formação dos vórtices nas extremidades das bordas dos *sprays*.

A Figura 3.5 mostra as geometrias mais comuns de injetores de injeção direta (ZHAO; LAI; HARRINGTON, 1999) para aplicação em motores do ciclo Otto. Na Figura 3.5 (a) está representado o injetor com múltiplos orifícios. Nesse injetor, *sprays* no formato de um cone sólido emergem dos orifícios. O injetor do tipo *outwardly-opening* na Figura 3.5 (b) assim

como o injetor *inwardly-opening pressure-swirl* da Figura 3.5 (c) produz *sprays* no formato de um cone oco, mas diferentemente deste, ele não forma a estrutura do pré-*spray* no início da injeção.

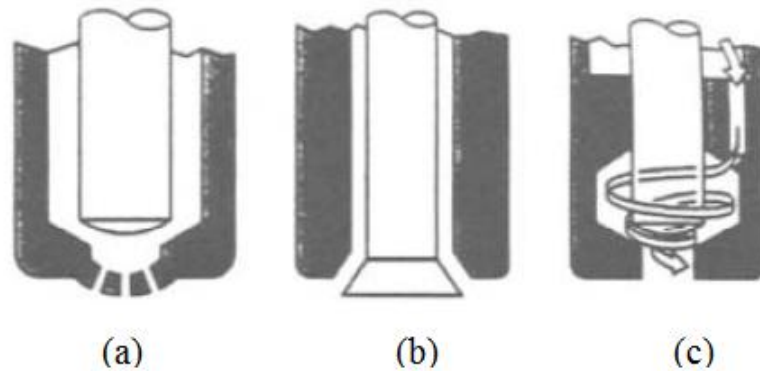


Figura 3.5 – (a) Injetor com múltiplos orifícios, (b) injetor do tipo *outwardly-opening* e (c) injetor do tipo *inwardly-opening pressure-swirl*. FONTE: (ZHAO; LAI; HARRINGTON, 1999).

Em ZHAO, 2010, são explicadas três diferentes configurações de injeção direta de combustível dentro do cilindro exemplificado na Figura 3.6. As configurações se valem da posição do injetor e da forma geométrica da extremidade do pistão.

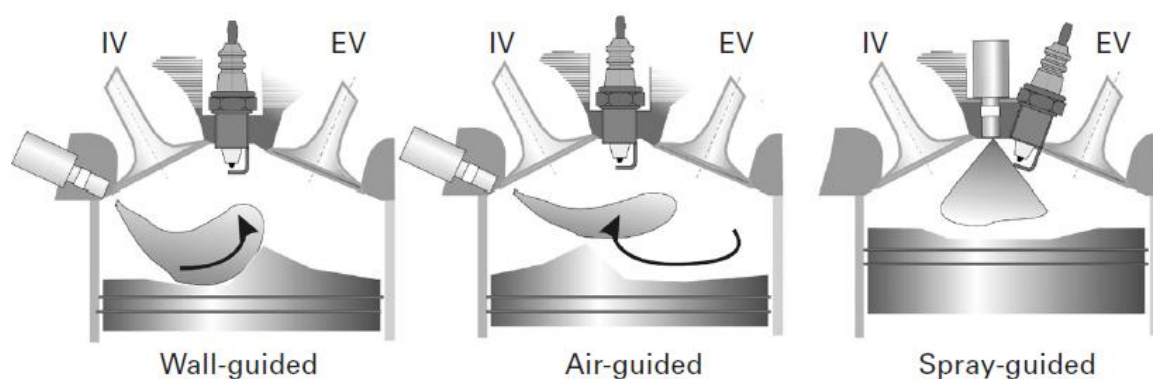


Figura 3.6 – Diferentes configurações na injeção direta: *Wall-guided*, *Air-guided* e *Spray-guided*. FONTE: ZHAO, 2010.

Na configuração *Wall-guided* a mistura é preparada e direcionada para a vela através de uma parede na câmara de combustão. Na maioria dos casos o formato modificado do pistão exerce

a função de direcionamento da mistura. Como o *spray* é direcionado diretamente para o pistão, pode ocorrer formação de filme fluido e emissão de hidrocarbonetos não queimados. Além disso, não existe flexibilidade para a determinação do momento de injeção uma vez que ela está associada ao posicionamento do pistão.

Na configuração *Air-guided* a formação da mistura e seu direcionamento para a vela de ignição ocorrem através do escoamento dentro do cilindro reduzindo tanto a formação de filme líquido nas paredes quanto a consequente emissão de hidrocarbonetos não queimados. A forma do pistão pode também ser modificada para induzir o escoamento necessário.

Na configuração *spray-guided*, o injetor é montado próximo da vela. O objetivo é assegurar uma mistura adequada na posição onde ocorre a centelha no momento da ignição. Nesta configuração o injetor deve apresentar boa repetibilidade no formato do *spray*.

ZHAO, 2010, também comenta sobre as duas formas de operação do motor de injeção direta quanto à carga: homogênea ou estratificada. Na operação com uma mistura homogênea a injeção direta acontece no tempo de admissão do motor conforme mostrado na Figura 3.7 (a). Dessa forma, no tempo posterior de compressão, a mistura formada é homogênea. A operação com carga estratificada ocorre com a injeção no tempo de compressão. A estratificação é desejável para misturas globais pobres, sendo necessária uma composição mais rica capaz de entrar em ignição na posição da centelha. Idealmente, a injeção direta para a operação do motor com carga estratificada, ocorreria com as válvulas fechadas como mostrado na Figura 3.7 (b).

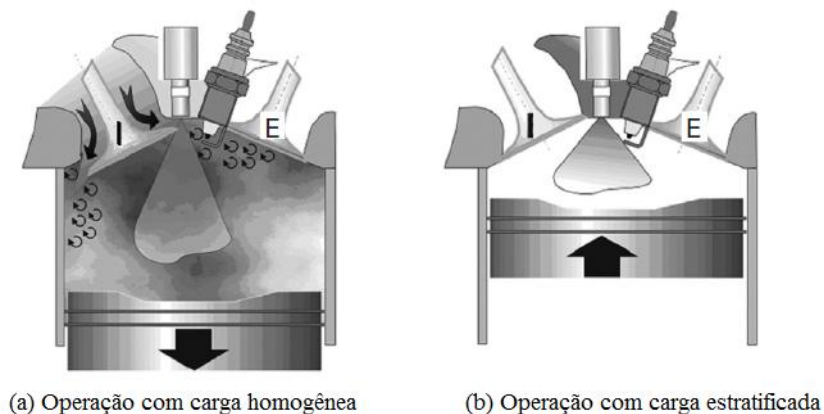


Figura 3.7 – Operação do motor em carga homogênea (a) e em carga estratificada (b). FONTE: adaptado de ZHAO, 2010.

3.3 Combustíveis nacionais

3.3.1 Gasolina

A gasolina é o segundo combustível mais utilizado no Brasil vindo logo atrás do óleo Diesel. É formada principalmente por misturas de hidrocarbonetos de 4 a 12 átomos de carbono com pontos de ebulição variando de 30°C a 215°C. A gasolina também possui alguns contaminantes como enxofre e compostos de oxigênio e nitrogênio. As gasolinas comercializadas no Brasil são classificadas como gasolina A, sem etanol, vendida pelos produtores e importadores de gasolina aos distribuidores e gasolina C ou gasolina comum com adição de etanol anidro, (ANP, 2016a), vendida aos consumidores. Há ainda a gasolina aditivada que é constituída da gasolina comum acrescida de detergentes ou dispersantes. A gasolina aditivada ajuda a conservar o sistema de combustão mantendo limpos os injetores e as válvulas do motor. As especificações atuais e as obrigações dos diversos agentes econômicos que comercializam o produto quanto ao controle de qualidade das gasolinas automotivas nacionais estão na Resolução N° 30 da ANP de 29 de junho de 2015 (ANP, 2015a).

A produção de derivados do petróleo, como é o caso da gasolina possui três etapas principais: a destilação para separar componentes de diferentes volatilidades, a conversão para transformar as partes mais pesadas e de menor valor comercial em moléculas mais leves e os tratamentos para cumprir as exigências de qualidade do mercado, (PETROBRAS, 2017).

O governo brasileiro estabeleceu a mudança de percentual de etanol anidro na gasolina C até então de 25% para 27% a partir de zero hora do dia 16 de março de 2015 por meio da portaria N° 75 de 5 de março de 2015, do Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2015) e Resolução N° 1, de 4 de março de 2015 do Conselho Interministerial do Açúcar e do Alcool, (CIMA, 2015). Determinação que vigora até os dias atuais. Segundo o Portal Brasil (BRASIL, 2015) a medida levou em consideração o abastecimento adequado de combustível em todo o território brasileiro, e a importância da maior utilização de combustível renovável.

Modelos termodinâmicos para a gasolina têm sido alvos de alguns estudos, mas no caso da gasolina brasileira, devido à adição do etanol anidro, os modelos devem levar em

consideração o efeito de mistura das moléculas de hidrocarbonetos de baixa polaridade presentes na gasolina com as moléculas de etanol de alta polaridade, (LANZER; VON MEIEN; YAMAMOTO, 2005).

O crescimento da participação dos veículos com tecnologia flex no Brasil, com motores que permitem a utilização da mistura da própria gasolina C com o etanol hidratado trouxe atenção especial para esse tipo de mistura sendo possível encontrar na literatura estudos a respeito das propriedades da gasolina C brasileira, misturada com etanol hidratado em diferentes proporções, como em DELGADO; ARAUJO; FERNANDES, 2007, que mostraram que a adição de etanol hidratado na gasolina C aumenta a massa específica, aumenta a condutividade elétrica, diminui o pH e dificulta a detonação. Na época do estudo, o percentual de etanol anidro na gasolina C era de 25%. Testes foram realizados com misturas de 20, 40, 60 e 80% em volume de etanol hidratado na gasolina C. A faixa entre 40 e 60% em volume de etanol seria a mais adequada para utilização em veículos flex segundo o estudo.

3.3.2 Etanol

O etanol é um combustível alternativo à utilização de gasolina em motores de combustão interna com ignição por centelha para reduzir a dependência destes com os combustíveis fósseis e também reduzir a emissão de gases de efeito estufa. São duas as formas de utilização do etanol combustível: como etanol anidro misturado à gasolina C ou como etanol hidratado comercializado em todo o Brasil como combustível acabado. O etanol combustível pode ser obtido a partir do processamento e fermentação de cana de açúcar, milho, beterraba entre outros. Na indústria brasileira a cana de açúcar é a matéria-prima mais utilizada (ANP, 2016b).

O principal processo de produção do etanol no Brasil é constituído das etapas de lavagem, moagem, eliminação de impurezas, fermentação, destilação, desidratação e armazenamento conforme descrito em NOVACANA.COM, 2017.

A etapa de lavagem consiste em fazer a cana passar por uma esteira rolante para ser lavada e retirar areia, poeira, terra e outros tipos de impurezas.

Na etapa de moagem ocorre conversão de cerca de 70% da cana em um caldo chamado melado e os 30% restantes em bagaço.

Na etapa de eliminação de impurezas o melado passa primeiro por uma peneira e posteriormente por tanques de decantação para separar resíduos sólidos. Há ainda uma etapa de esterilização para a eliminação de micro-organismos.

A fermentação é um processo onde o caldo é misturado com fermento com leveduras que quebram as moléculas de glicose produzindo gás carbônico e álcool.

A destilação separa o etanol do vinho fermentado em colunas de destilação.

A desidratação é um processo de eliminação de água do etanol hidratado para produção do etanol anidro.

Na última etapa o etanol anidro e o etanol hidratado são armazenados em enormes tanques até serem transportados para as distribuidoras.

A resolução nº 19 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis de 15 de abril de 2015 (ANP, 2015b), estabeleceu as especificações do Etanol Anidro Combustível e do Etanol Hidratado Combustível. A comercialização desses combustíveis com características fora das especificações do Regulamento Técnico parte integrante da Resolução ficou proibida no Brasil. As especificações impuseram limites para algumas características como a acidez, a condutividade, a massa específica, o potencial hidrogeniônico e também limites nos teores de diversos componentes químicos tais como hidrocarbonetos, sulfato, cloreto, ferro, sódio, cobre e enxofre.

O uso de etanol hidratado como combustível independente ocorreu no Brasil a partir de políticas de incentivo como resposta estratégica à crise do petróleo de 1973 e 1979, (ROSILLO-CALLE; CORTEZ, 1998), sendo o Brasil, o país pioneiro na sua utilização em larga escala.

O contínuo crescimento no consumo do etanol durante a década de 70 e ainda no início da década de 80 ocorreu muito devido aos subsídios tanto na indústria do álcool e do açúcar quanto na indústria automotiva. A queda no preço do petróleo levou ao declínio no uso do etanol entre o final da década de 80 e início da década de 90. Já no início dos anos 2000 o advento da tecnologia flex trouxe novo fôlego para o consumo do etanol (LABRUTO, 2014).

Durante o período 2003-2010 o etanol fortaleceu tanto a sua posição de combustível independente quanto sua posição de substituto da gasolina, sendo o advento da tecnologia flex no Brasil, como um dos principais fatores do crescimento da demanda. A demanda de etanol hidratado cresceu de 236,82 milhões de litros em março de 2003 para 1317,62 milhões de litros em julho de 2010 (DE FREITAS; KANEKO, 2011).

Em 2016 foram produzidos no Brasil um total de 28,7 bilhões de litros de etanol sendo 11,7 bilhões de litros de etanol anidro e 17 bilhões de litros de etanol hidratado (AMARAL et al., 2017). A Figura 3.8 mostra a produção total de etanol anidro e etanol hidratado entre 2012 e 2016.

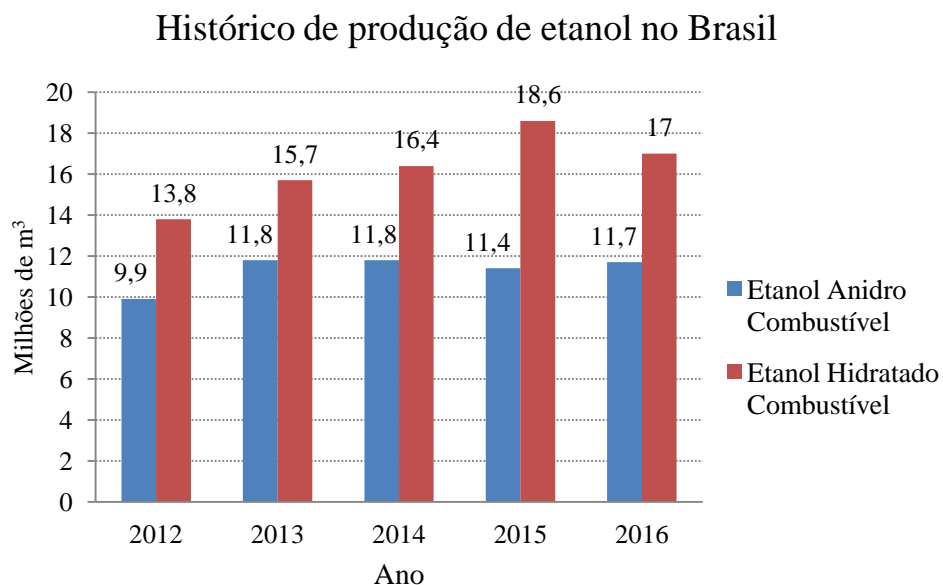


Figura 3.8 – Produção de etanol anidro combustível e etanol hidratado combustível no Brasil entre 2012 e 2016. Fonte: (AMARAL et al., 2017).

3.4 Visualização e técnicas ópticas aplicadas na análise dos sprays

3.4.1 Representação matemática de uma imagem

Uma imagem digital consiste na formatação de sua representação de modo que os computadores possam utilizá-la. Para o processamento, a imagem é convertida de contínua

real para uma representação discreta digital, podendo assim ter uso computacional. (CONCI; AZEVEDO; LETA, 2008).

Imagens contínuas podem ser modeladas matematicamente pela Equação (3.1).

$$f(x, y) = i(x, y) \cdot r(x, y) \quad (3.1)$$

Na Equação (3.1) x e y são números reais, $i(x,y)$ é função da iluminação e $r(x,y)$ é função da reflexão do objeto. A função $f(x,y)$ descreve a energia luminosa da imagem na coordenada espacial (x,y) . Em GONZALEZ; WOODS, 2000, são mostrados os limites teóricos das funções $i(x,y)$ e $r(x,y)$ na forma das equações (3.2) e (3.3).

$$0 < i(x, y) < \infty \quad (3.2)$$

$$0 < r(x, y) < 1 \quad (3.3)$$

A natureza da iluminação $i(x,y)$ é determinada pela fonte de luz, e $r(x,y)$ pelas características dos objetos estando limitada entre zero, absorção total e 1 (um), refletância total. Valores típicos de $i(x,y)$, relatados em GONZALEZ; WOODS, 2000, são de 9000 candelas por pé quadrado (96875 cd/m^2) que o sol pode produzir na superfície da terra em um dia ensolarado e 1000 candelas por pé quadrado (10764 cd/m^2) em um dia nublado. Para $r(x,y)$ valores médios típicos são 0,01 para veludo negro, 0,65 para aço inoxidável, 0,80 para uma parede branca e 0,90 para metal prateado.

As imagens digitais são formadas por subunidades de cor. A menor parte de uma imagem contendo uma informação de cor é denominada pixel (do inglês *picture element*). Pixels retangulares são casos comuns em composições de imagens e é o caso das imagens da presente Tese que possuem pixels em forma de quadrados.

Sistemas de coordenadas são associados às imagens para localização de um determinado pixel. A Figura 3.9 mostra o sistema considerado pelo conjunto de funções de processamento de imagens digitais do MATLAB (*Image Processing Toolbox*), (GONZALEZ; WOODS; EDDINS, 2010).

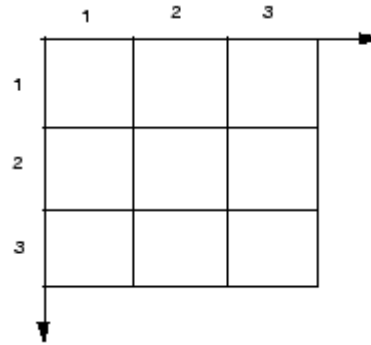


Figura 3.9 – Representação dos pixels de uma imagem como elementos retangulares em uma imagem digital.

Cada posição de um pixel da imagem pode, portanto, ser representada por coordenadas inteiras (i,j) , onde i corresponde à linha da matriz e j a sua coluna.

O pixel na parte superior e à esquerda da Figura 3.9, por exemplo, possui coordenadas $(1,1)$, o pixel abaixo deste na linha seguinte possui coordenadas $(2,1)$ e o pixel do lado direito possui coordenadas $(1,2)$ e assim sucessivamente. As imagens são então representadas de forma conveniente, na forma matricial em que cada pixel possui um valor numérico relacionado à sua cor. A representação de uma imagem por uma matriz $m \times n$, possibilita o uso de técnicas de álgebra linear no seu processamento.

Como exemplo, a Figura 3.10 é uma representação da matriz identidade com 300 linhas e 300 colunas em formato de imagem, totalizando 90000 elementos dos quais a diagonal principal tem valor um e determinam pixels claros e todos os demais elementos têm valor zero e determinam pixels escuros.

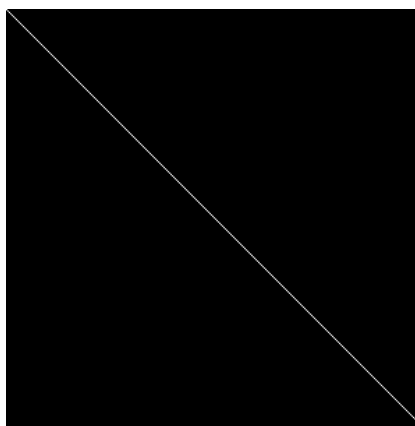


Figura 3.10 – Matriz identidade 300×300 representada como uma imagem. Os pixels brancos na diagonal principal tem valor um enquanto os demais pixels tem valor zero.

Imagens digitais que usam apenas duas cores como na Figura 3.10 são denominadas imagens binárias. Os algoritmos para obter propriedades de imagens binárias são mais simples, de menor custo e mais rápidos que sistemas que operam em níveis de cinza ou com imagens coloridas, (CONCI; AZEVEDO; LETA, 2008).

A Figura 3.11 mostra um exemplo de descrição matricial para uma imagem em escala de cinza de um *spray*. No lado direito da figura, temos a parte da matriz numérica correspondente à região retangular destacada na imagem da esquerda. Os pixels são quadrados e estão associados com valores numéricos que descrevem o nível de cinza. Essa é a representação usualmente empregada para formar a imagem nas memórias e telas dos computadores e na maioria dos dispositivos de saída gráficos como as impressoras e vídeos, (AZEVEDO; CONCI, 2003).

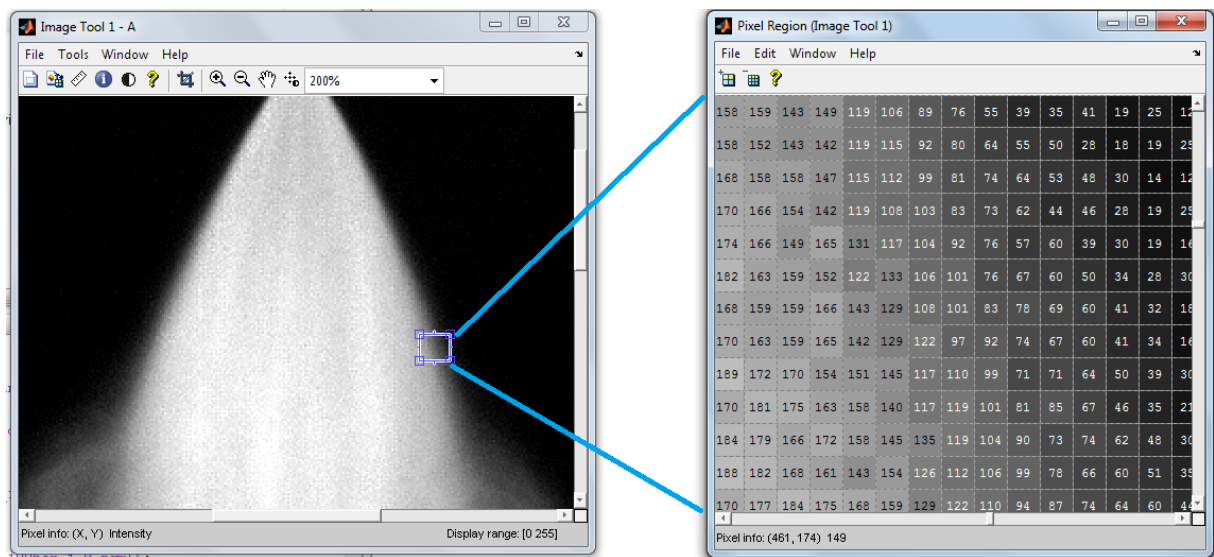


Figura 3.11 – Imagem de um *spray* em níveis de cinza e uma pequena parte de sua representação matricial à direita.

Algumas imagens necessitam de uma representação matricial tridimensional onde o primeiro plano da matriz é constituído no conjunto dos valores representativos das intensidades da cor vermelha, o segundo plano representa as intensidades de verde e o terceiro plano, as intensidades de azul. No entanto, nos casos em que a imagem é monocromática, um pixel pode convenientemente ser representado por um único valor numérico e uma matriz de apenas duas dimensões (um plano) é suficiente para a caracterização de uma imagem, (GOMES,

2002). Esse é o caso das imagens utilizadas para tratamento neste trabalho, que são representadas por uma escala monocromática que varia do branco absoluto (valor 255) ao preto absoluto (valor 0). Os valores inteiros intermediários representam escalas de cinza e as matrizes numéricas são bidimensionais.

A resolução vertical de uma imagem digital se refere ao número de linhas da sua representação matricial enquanto a resolução horizontal se refere ao número de colunas. A resolução espacial se refere ao produto da resolução horizontal pela resolução vertical. Imagens constituídas de 600 pixels na direção vertical (600 linhas) e 800 pixels na direção horizontal (800 colunas) como as imagens dos *sprays* da presente Tese possuem resolução espacial de 480000 pixels.

A resolução espacial dada em termos absolutos não fornece muita informação sobre a resolução real da imagem. Isso ocorre porque não é conhecido o tamanho físico do pixel. Uma medida com maior fidelidade à amostragem da imagem real é obtida pela densidade de resolução que é o número de *pixels* por unidade linear de medida de comprimento, (GOMES, 2002).

O conhecimento da densidade de resolução das imagens geradas neste trabalho foi um importante parâmetro para obtenção dos resultados, uma vez que tornou possível atribuir medidas de comprimento e definir sistemas de coordenadas de posição nas imagens.

3.4.2 Shadowgraph (Fotografia da sombra)

Shadowgraph é uma forma simples de visualização que se refere à observação da sombra do fenômeno. Em análises de *sprays* é comum a aplicação dessa técnica. Como mencionado em SETTLES, 2001, a técnica consiste essencialmente, em posicionar o fenômeno em estudo entre uma fonte luminosa e um sistema de captação de imagens, por exemplo, uma câmera.

Exemplos de uso da técnica e análises estão apresentados em CASTREJÓN-GARCÍA et al., 2011, que discute a sua aplicação em escoamento de jatos líquidos e gotículas. Três formas de utilização da técnica são apresentadas: a visualização de jato líquido contínuo com oscilações periódicas, medições de distribuições de tamanho de gotas em *sprays* e visualização de gotículas em impressoras comerciais de jato de tinta.

Outra aplicação da técnica está no trabalho de AFTAB; YOUNIS; AL-ATABI, 2012, que discute a técnica no caso específico da convecção natural da água no interior de cavidades quadradas quando uma de suas faces é aquecida e a face oposta é rapidamente resfriada. A técnica permite a visualização de ondas induzidas pelo empuxo no fluido.

No presente trabalho a técnica *shadowgraph* foi aplicada, para visualização da injeção direta, tanto em câmara atmosférica quanto na injeção no interior de um motor com acesso óptico.

3.4.3 Velocimetria por Imagens de Partículas (PIV)

A Velocimetria por Imagens de Partículas ou no inglês *Particle Image Velocimetry* – PIV – é uma técnica ótica não intrusiva com objetivo principal de obter campos de velocidades de escoamento de fluidos. Faz-se necessário a adição de partículas ao fluido. Em aplicações envolvendo *sprays*, no entanto, frequentemente a adição de partículas é desnecessária devido à atomização do jato líquido. Assim as partículas são as próprias gotículas. Os trabalhos de GUZZO et al., 2012, e DA ROCHA et al., 2014, realizados no laboratório de combustíveis e combustão do departamento de Engenharia Mecânica da UFMG, se valeram da própria atomização do fluido para obtenção das partículas necessárias para a aplicação da técnica.

As partículas devem ser iluminadas, em um plano do escoamento pelo menos por duas vezes, em um curto intervalo de tempo. Parte da luz espalhada pelas partículas deve ser capturada para a obtenção de imagens do escoamento. O deslocamento das partículas entre os pulsos de luz é então posteriormente determinado.

Para o cálculo das velocidades, as imagens são divididas em áreas de interrogação onde os vetores deslocamento são determinados por meio de métodos estatísticos. O operador determina a dimensão dessas áreas e a correlação desejada através do programa computacional de aquisição das imagens e dos dados. Considera-se que todas as partículas dentro da área de interrogação se movam homoganeamente durante o intervalo de tempo entre dois pulsos de iluminação. As velocidades são calculadas levando em consideração o intervalo de tempo entre as duas iluminações, (RAFFEL; WILLERT; KOMPENHANS, 2007).

A Figura 3.12 mostra o esquema básico de montagem para determinar o campo de velocidade em um experimento para a obtenção de dois quadros correspondentes aos dois pulsos do laser e a aquisição de dados com base no deslocamento das partículas entre os quadros.

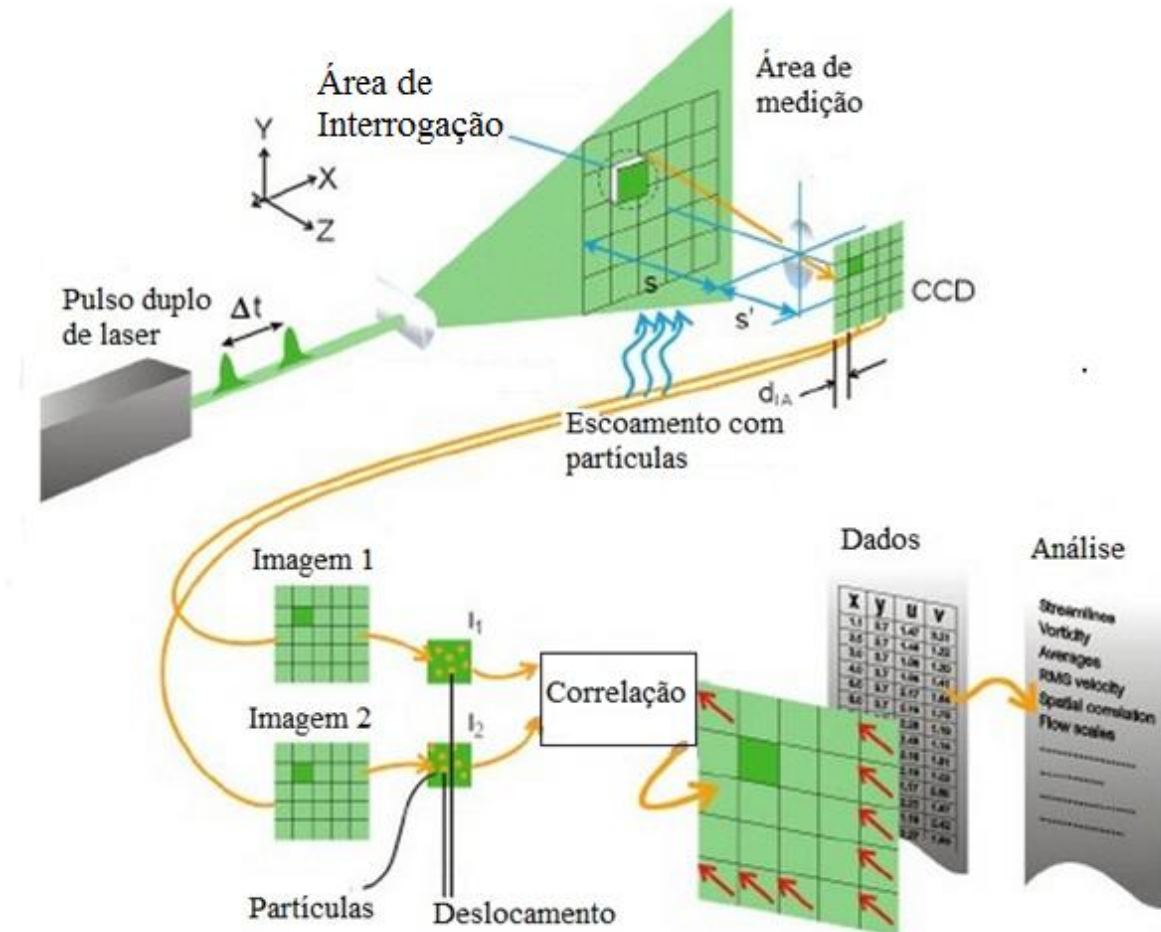


Figura 3.12 – Características da técnica PIV de obtenção de campos de velocidades, FONTE: adaptado de DANTEC DYNAMICS, 2015.

Como exemplo de resultado obtido com esta técnica, na dissertação de GUZZO, 2012, a velocimetria por imagens de partículas foi utilizada para obter campos de velocidades dos *sprays* de gasolina, etanol e água de um injetor com orifício único, do tipo *pressure-swirl*, usado em injeção direta, com baixa pressão de injeção. A Figura 3.13 mostra o campo de velocidade da injeção de gasolina com 7 bar de pressão, obtido com as médias das velocidades calculadas para 30 pares de imagens, mostrando velocidades mais elevadas representadas pelos tons mais avermelhados próximo ao orifício do injetor e também próximo às bordas do *spray*.

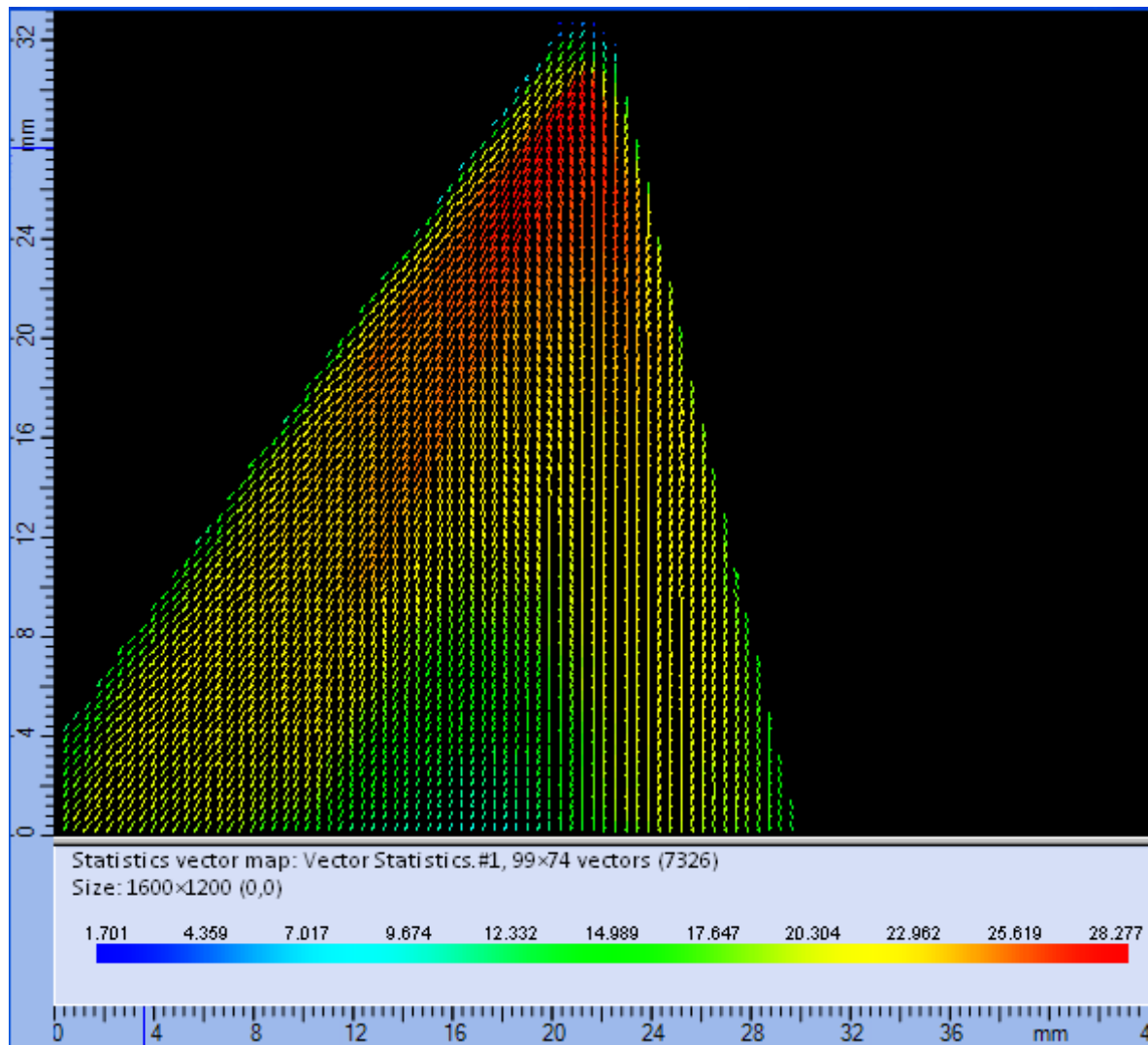


Figura 3.13 – Campo vetorial para velocidade resultante no *spray* de gasolina. FONTE: (GUZZO, 2012).

Como a medição do campo de velocidade do fluido é realizada de forma indireta, através das partículas contidas no fluido, é necessária uma criteriosa escolha de tais partículas de forma que elas consigam seguir o escoamento do fluido, (PACÍFICO et al., 2015). As partículas devem ter dimensões adequadas e massa específica próxima à massa específica do fluido (ÇENGEL; CIMBALA, 2007). O movimento da partícula em relação ao fluido deve ser desprezado. Além disso, partículas muito pequenas demandam o uso de fontes luminosas com alta potência, pois a intensidade da luz espalhada é diretamente proporcional ao tamanho das partículas. A diferença entre a velocidade da partícula u_p e a velocidade do fluido u_f obtida a partir da lei de Stokes, para um escoamento com aceleração a constante e para uma partícula esférica é dada pela Equação (3.4).

$$\vec{u}_p - \vec{u}_f = D_p^2 \left(\frac{\rho_p - \rho_f}{18\mu} \right) \vec{a} \quad (3.4)$$

Na Equação (3.4) D_p é o diâmetro da partícula, ρ_p é a sua massa específica, ρ_f é a massa específica e μ é a viscosidade do fluido. Pela equação, é possível observar que quanto menor a diferença das massas específicas da partícula e do fluido, menor será a velocidade da partícula relativa ao fluido. Velocidade relativa zero significa que partícula e fluido têm a mesma velocidade absoluta e esta é a situação ideal para as medições de campos de velocidades pela técnica PIV.

A exatidão, flexibilidade e versatilidade dos sistemas PIV, com sua capacidade de capturar imagens de campo inteiro, com tempo de exposição da ordem de microssegundos, os tornaram ferramentas úteis no estudo de escoamentos supersônicos, explosões, propagação de chamas, crescimento e colapso de bolhas, turbulência e escoamentos não estacionários, (ÇENGEL; CIMBALA, 2007).

Os avanços recentes na tecnologia PIV possibilitaram a obtenção de perfis de velocidade tridimensionais em uma seção transversal de um escoamento utilizando duas câmeras da forma esquematizada na Figura 3.14. Os processamentos de informações obtidas em dois diferentes ângulos geram dois mapas bidimensionais que permitem a obtenção de um campo de velocidade tridimensional instantâneo, (ÇENGEL; CIMBALA, 2007).

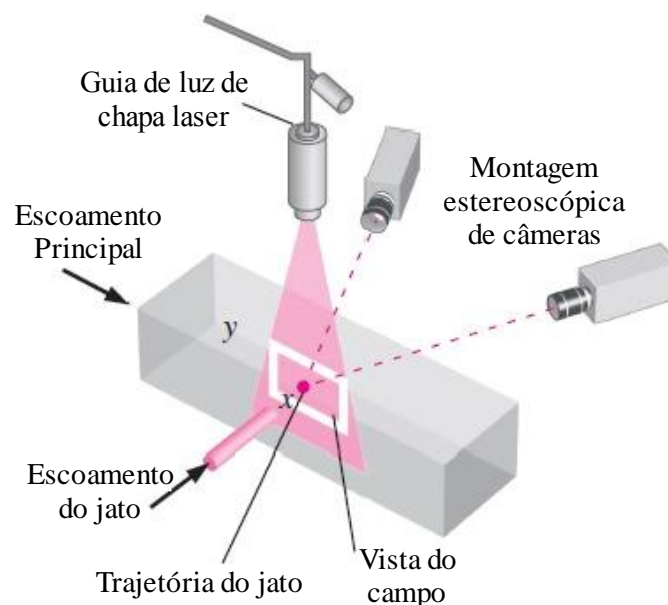


Figura 3.14 – Montagem para determinação tridimensional de um campo de velocidade. FONTE: (ÇENGEL; CIMBALA, 2007).

3.4.4 Anemometria Laser Doppler (LDA)

A Anemometria Laser Doppler ou LDA (do inglês, *Laser Doppler Anemometry*) é uma técnica ótica não intrusiva para medições das velocidades de partículas em um escoamento fluido. Enquanto na Velocimetria por Imagens de Partículas a medição é comumente realizada em um plano para a obtenção de um campo de velocidades, a medição por Anemometria Laser Doppler é pontual ou de forma mais exata, realizada em pequeno volume dentro do domínio do escoamento. Assim, como na técnica PIV, são necessárias pequenas partículas no escoamento.

Como ressaltado em ÇENGEL; CIMBALA, 2007, a técnica teve ampla aceitação a partir do seu desenvolvimento, na metade dos anos 1960, devido à exatidão que fornece na medição de escoamento de gases e líquidos, alta resolução espacial e, devido à tecnologia disponível nos últimos anos, pela sua capacidade de medir todas as componentes da velocidade. Quanto às desvantagens, pode-se citar o alto custo, a dificuldade para o alinhamento cuidadoso dos raios emitidos pelo equipamento, o requisito de transparência entre a fonte de laser, o local alvo do escoamento ou ponto de medição e a necessidade de usar um detector fotossensível tornam seu uso restrito.

Um sistema básico de medição LDA de raio duplo é mostrado na Figura 3.15.

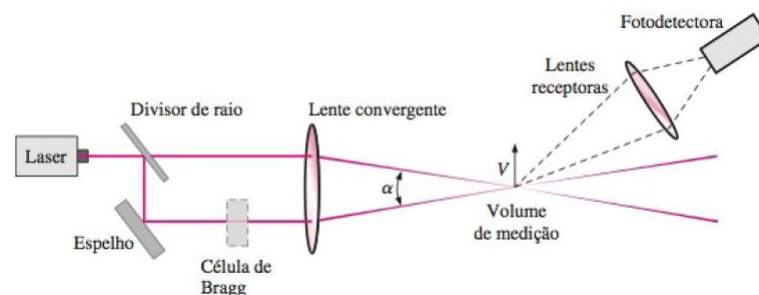


Figura 3.15 – Um sistema LDA de raio duplo. Fonte: Adaptado pelo Autor de (ÇENGEL; CIMBALA, 2007).

O Laser é emitido de uma fonte e dividido em dois raios paralelos com igual intensidade. Um dos feixes passa pela célula de Bragg para variação da frequência. Os raios passam através de uma lente convergente e se cruzam em um ponto onde é realizada a medição da velocidade. O

volume formado pela interseção dos raios é o volume de medição do experimento e tem o formato próximo de um elipsoide. As luzes espalhadas pelas partículas que passam no volume de medição na direção do fotodetector são transformadas em um sinal elétrico, processada, e com base na frequência da luz espalhada, as velocidades das partículas são determinadas. As partículas espalham luzes em todas as direções, mas são consideradas apenas, as luzes espalhadas na direção do detector fotossensível.

As ondas dos dois raios lasers que se cruzam no volume de medição são mostradas esquematicamente na Figura 3.16.

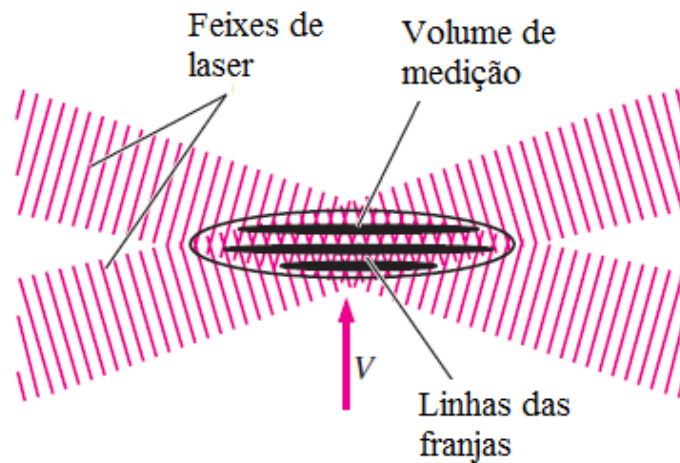


Figura 3.16 – Cruzamento dos dois raios Laser e volume de medição. Fonte (ÇENGEL; CIMBALA, 2007).

Na Figura 3.16 o padrão de linhas vermelhas dos dois feixes pode ser interpretado como cristas ou vales das ondas do laser.

Como explicado em WALKER; RESNICK; HALLIDAY, 2008, quando duas ondas sofrem superposições, ocorre o efeito de interferência construtiva ou destrutiva que pode aumentar ou diminuir respectivamente as amplitudes das ondas. A Figura 3.17 mostra exemplos de interferências construtiva e destrutiva entre duas ondas de mesma frequência, mas propagando em sentidos opostos.

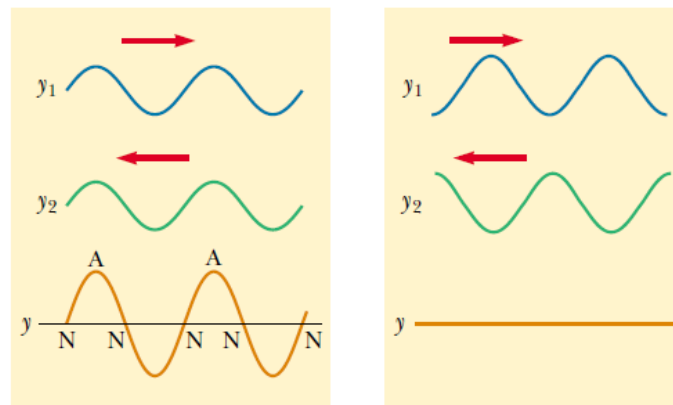


Figura 3.17 – Interferência de ondas: construtiva à esquerda e destrutiva à direita. Fonte: (WALKER; RESNICK; HALLIDAY, 2008).

Na Figura 3.17 y_1 e y_2 são as funções da onda 1 e 2 respectivamente, y é a função da onda resultante da interferência que é a soma de y_1 e y_2 entre as duas ondas e os N's são os pontos nodais.

No volume de medição ocorrem interferências ou superposições que criam padrões, ou franjas de interferência, claras, quando as interferências são construtivas e escuras para as interferências destrutivas. Esses padrões estão na Figura 3.18 onde elementos triangulares entre duas franjas estão destacados.

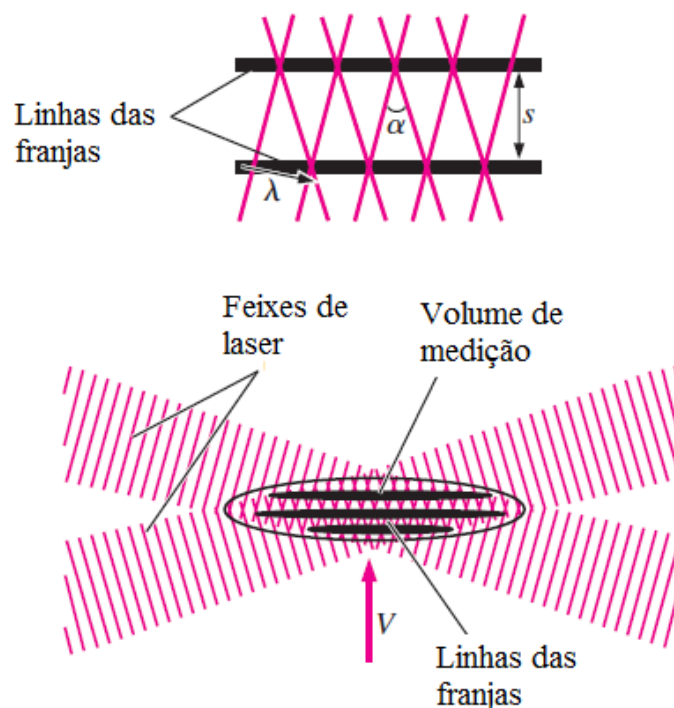


Figura 3.18 – Cruzamento entre dois feixes de laser. Fonte: (ÇENGEL; CIMBALA, 2007).

Por trigonometria, a distância s entre duas franjas, que também pode ser considerada a altura de um elemento triangular isósceles, é calculada pela Equação (3.5).

$$s = \frac{\lambda}{2\text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (3.5)$$

Onde λ é o comprimento de onda do laser que corresponde à base do elemento triangular e α é o ângulo entre os dois raios laser. Quando uma partícula atravessa essas linhas, a frequência Doppler, f_D , das linhas de franja, geradas pelas ondas espalhadas pode ser calculada pela Equação (3.6).

$$f_D = \frac{v_p}{s} = \frac{2v_p\text{sen}(\alpha/2)}{\lambda} \quad (3.6)$$

A medição da frequência da luz espalhada determina a velocidade V_p das partículas que produziram a refração.

Diversos trabalhos relacionados com a aplicação da Anemometria Laser Doppler em análises de *sprays* têm sido publicados. Os trabalhos de WIGLEY et al., 2004; ISMAILOV et al., 1999 e ALFUSO et al., 2008, são exemplos dessa aplicação.

No próprio CTM existe infraestrutura para trabalhos de análises de *sprays* usando LDA. Como exemplo de resultado fornecido pela técnica, o trabalho de GOMES et al., 2015 realizado no CTM, apresenta dados da medição pela técnica LDA das velocidades das gotículas a 8 mm de distância vertical do orifício do injetor. Esta distância vertical é equivalente a $14,3 D_0$ em que D_0 equivale ao diâmetro do orifício. O injetor utilizado foi do tipo *pressure-swirl*, o mesmo utilizado neste trabalho para os testes de injeção em condições estáticas. O gráfico da Figura 3.19 mostra o resultado da medição temporal da velocidade das gotículas.

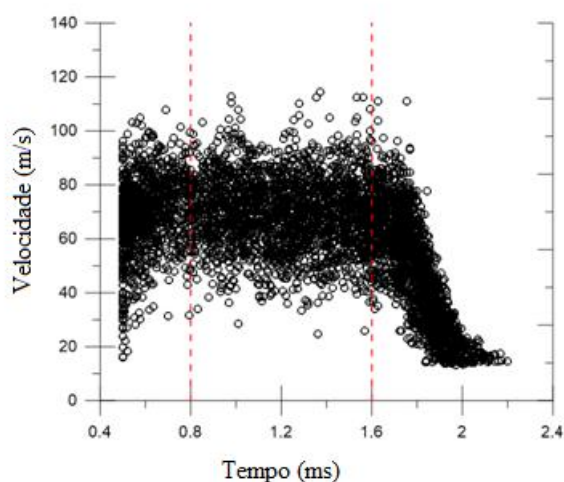


Figura 3.19 – Velocidade das gotículas em função do tempo. FONTE:(GOMES et al., 2015).

Em GOMES et al., 2015, foi verificado claramente por meio da técnica LDA que a injeção tem três fases distintas. Uma primeira fase, onde os dados de velocidades são aparentemente crescentes. Essa fase dura cerca de 0,8 milissegundos e corresponde ao início da injeção; uma segunda fase, em que as gotículas mantêm uma velocidade máxima aproximadamente constante; uma terceira fase, com diminuição da velocidade, associada ao fim da injeção. Existe então um período pseudopermanente de operação do injetor que, para as condições de teste do trabalho, ocorreu aproximadamente entre 0,8 e 1,6 milissegundos após o início da injeção. A técnica também pode fornecer histogramas de distribuição de velocidades das partículas.

3.4.5 Interferometria por Efeito Doppler

A interferometria por efeito Doppler PDI (do inglês, *Phase Doppler Interferometry*) também chamada PDPA – *Phase Doppler Particle Analyzer* – ou ainda PDA – *Phase Doppler Anemometry* – é uma técnica ótica, não intrusiva utilizada na medição de tamanhos de partículas. Também é frequente a aplicação da técnica em análises de *sprays*, tendo como alguns exemplos os trabalhos de PAYRI et al., 2008, para *spray* Diesel, KAY et al., 2012, para um injetor de injeção direta com orifício único e ZIGAN et al., 2010, para injetor de injeção direta com múltiplos orifícios.

A montagem experimental para aplicação dessa técnica é semelhante à configuração utilizada para as medições pela técnica LDA. A Figura 3.20 mostra dois módulos emissores de feixe e um receptor e representa o esquema simplificado para a medição.

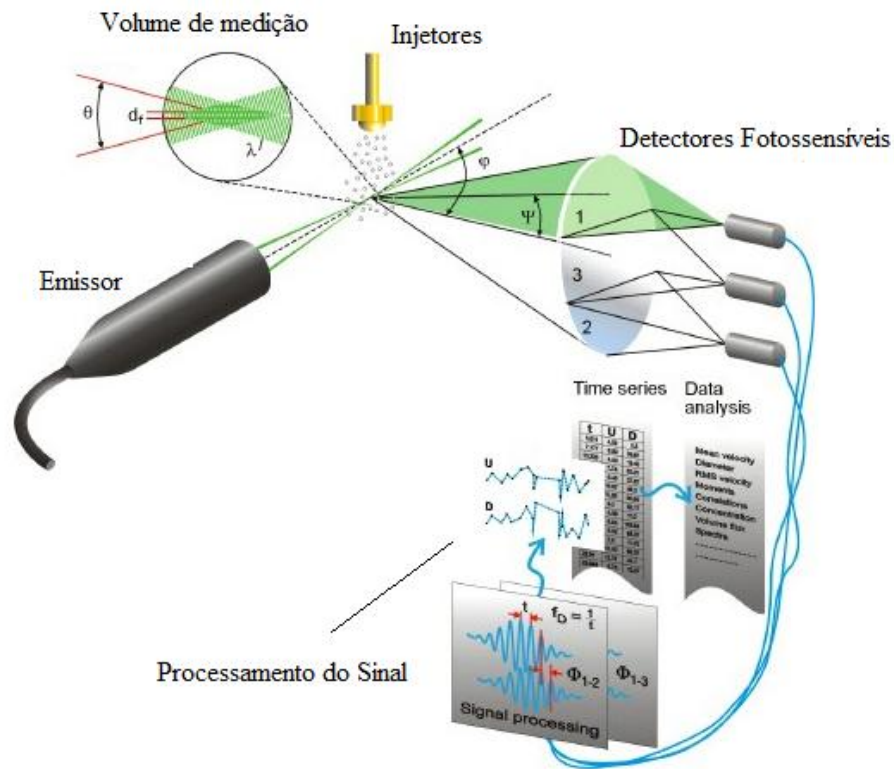


Figura 3.20 – Disposição espacial de um sistema PDA. Fonte: Adaptado de (DANTEC DYNAMICS, 2015).

Como explicado no manual DANTEC DYNAMICS, 2011, a técnica PDA é uma extensão da técnica LDA e difere desta pela necessidade de mais de um detector fotossensível. A diferença de fase das ondas espalhadas pelas partículas, mostradas na Figura 3.21 para duas diferentes direções onde estão posicionados os detectores fotossensíveis, corresponde à medida do tamanho da partícula.

O Centro de Tecnologia da Mobilidade da UFMG dispõe de infraestrutura necessária para aplicação dessa técnica. O trabalho de GOMES et al., 2015, é um exemplo da aplicação de PDA para o mesmo injetor de injeção direta de orifício único analisado nesta Tese. No trabalho GOMES et al., 2015, foi obtido o Diâmetro Médio de Sauter D_{32} (item 3.6.1) que representa a razão de volume pela área superficial de uma gotícula representativa de todo o *spray* e o diâmetro médio D_{10} das gotículas em função das pressões de injeção de dois fluidos: o EXXSOL D40 e o EXXSOL D60. Os resultados estão no gráfico da Figura 3.22 onde se

verifica existir pouca diferença entre os tamanhos das partículas dos dois fluidos, com a esperada redução do diâmetro com o aumento da pressão de injeção.

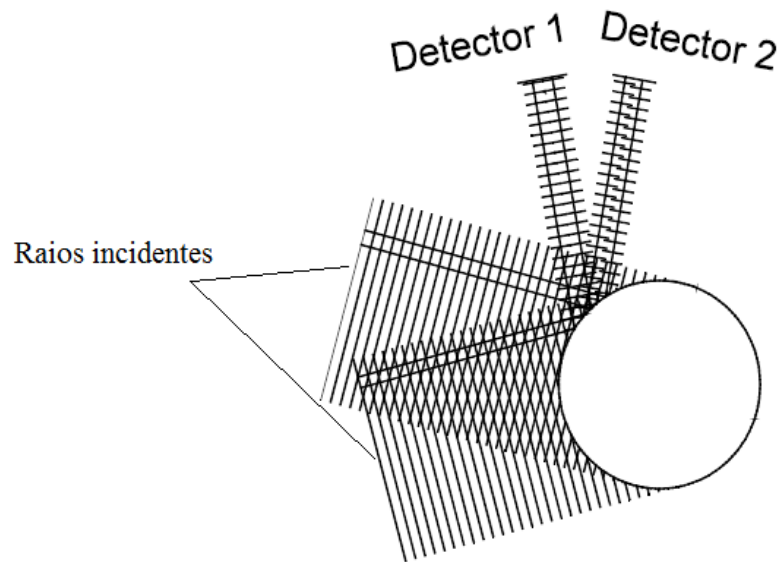


Figura 3.21 – Luz espalhada em duas diferentes direções por uma partícula esférica. Fonte: (DANTEC DYNAMICS, 2011).

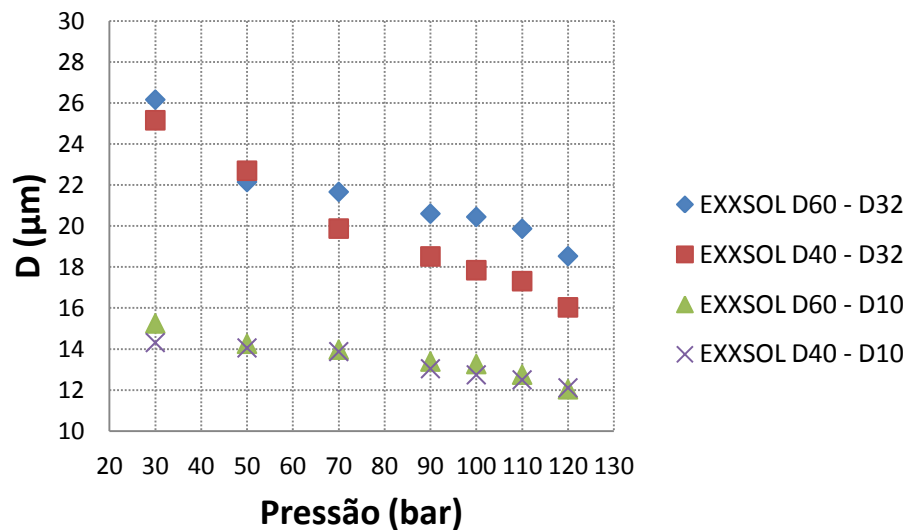


Figura 3.22 – Diâmetro de Sauter em função da pressão de injeção. FONTE: (GOMES et al., 2015).

3.5 Características macroscópicas dos *sprays*

3.5.1 Dispersão

A dispersão de uma atomização pode ser expressa quantitativamente se, em determinado instante, o volume de líquido dentro do cone for conhecido. O grau de dispersão poderá então ser expresso como a razão do volume do *spray* pelo volume de líquido nele contido.

A vantagem de um bom grau de dispersão é que o líquido mistura rapidamente com a atmosfera gasosa e as subseqüentes taxas de evaporação são elevadas. Os atomizadores com orifício plano produzem *sprays* com ângulos de cone estreitos e assim possuem pequenas dispersões. Com atomizadores com vórtice ou *swirl* a dispersão é provocada principalmente por características como o ângulo do cone, o diâmetro médio das gotículas, a distribuição de tamanho das gotículas e em uma menor extensão, pelas características físicas do líquido e da atmosfera gasosa. De uma forma geral, os fatores que influenciam no aumento do ângulo do cone também tendem a aumentar a dispersão do *spray*, LEFEBVRE, 1989.

(DELACOURT; DESMET; BESSON, 2005) definem o coeficiente de dispersão no estudo de *sprays* Diesel através da expressão mostrada na Equação (3.7):

$$\varphi(t) = \frac{V(t)}{\int_0^t q_v(t) dt} \quad (3.7)$$

Na Equação (3.7) $\varphi(t)$ fornece o coeficiente de dispersão instantâneo que é dado pela razão do volume do *spray* $V(t)$ pelo volume do líquido contido no *spray*. O volume de líquido contido no *spray* é calculado pela integral no tempo da vazão volumétrica instantânea do líquido $q_v(t)$. O coeficiente de dispersão é um parâmetro quantitativo que descreve a fase inicial de mistura do combustível com o ar.

3.5.2 Ângulo de cone

As características do escoamento em atomizadores têm sido amplamente estudadas por diversos autores. Os resultados têm demonstrado que o ângulo do *spray* é principalmente influenciado pelas dimensões do injetor, pelas propriedades do líquido e pela densidade do meio ao qual o *spray* é descarregado, (LEFEBVRE, 1989).

Como os ângulos do *spray* cônico variam em função das condições de pressão ambiente, existe uma dificuldade inerente na definição e correlação deles, (ZHAO; LAI; HARRINGTON, 1999), imagens de *sprays*, em um instante de tempo específico, são usualmente utilizadas para a definição do ângulo de cone próximo ao orifício do injetor. Nas medições desta variável são utilizadas diferentes metodologias. Usualmente uma linha horizontal é traçada a uma distância especificada do orifício do injetor e os pontos de intersecções, determinados pelas bordas direita e esquerda, podem ser tangenciados com linhas retas partindo do orifício. Dessa forma o ângulo compreendido entre as retas partindo do orifício, caracteriza o ângulo de cone.

Se não houver a definição de um instante específico do desenvolvimento do *spray* e pontos do espaço específicos para a medição, fica virtualmente impossível verificar um valor representativo para o ângulo de cone (ZHAO; LAI; HARRINGTON, 1999).

Nesta Tese foi obtida uma correlação para o ângulo de cone θ dependente tanto do tempo t quanto da posição da medição Δy relativa ao orifício do injetor. Houve assim o cuidado de definir os instantes de tempo t e as posições no espaço como discutido em (ZHAO; LAI; HARRINGTON, 1999).

3.5.3 Penetração

A penetração pode ser definida como a máxima distância alcançada quando o *spray* é injetado em atmosfera estática. Dois efeitos opostos interferem na penetração. (1) A energia cinética inicial do jato líquido e (2) a resistência aerodinâmica da atmosfera gasosa. A energia cinética inicial é elevada, mas na medida em que a atomização prossegue e a área superficial do

líquido aumenta, o *spray* passa a sofrer maior efeito do atrito com a atmosfera gasosa. Quando a maior parte da energia cinética inicial é dissipada pelo atrito, a trajetória subsequente é conduzida principalmente pela gravidade e pelo movimento da atmosfera gasosa, (LEFEBVRE, 1989).

Em todos os sistemas de combustão com injeção direta de combustível as características de penetração dos *sprays* são muito importantes e em alguns sistemas tais características são críticas à combinação com a geometria da câmara, (ZHAO; LAI; HARRINGTON, 1999).

As características de penetração dos injetores usados em sistemas com injeção direta de combustível são influenciadas por muitas variáveis operacionais, entre as principais estão a pressão e massa específica dos gases no interior da câmara de combustão, a pressão de injeção, a temperatura do injetor e a volatilidade do combustível, (ZHAO; LAI; HARRINGTON, 1999).

Outros parâmetros operacionais exercem pouca influência na penetração produzida por injetores usados em injeção direta e geralmente podem ser negligenciados. Um deles é a taxa de pulsos do injetor, que é o período de tempo entre as injeções para as mesmas quantidades de combustíveis. Se a taxa de repetição é 100 ms, 50 ms ou 33 ms, que corresponde a 10 Hz, 20 Hz ou 30 Hz, a curva de penetração do *spray* é apenas levemente alterada. Outro parâmetro é a duração do pulso de injeção que pode ter um efeito significativo na distância máxima de penetração e na quantidade de combustível injetado, mas um efeito pequeno na taxa máxima de penetração ou velocidade de penetração. A taxa máxima de penetração é alterada apenas por durações de pulsos pequenas, geralmente menor que 1 milissegundo. Isso porque a taxa máxima de penetração ocorre próxima do atomizador e normalmente no início da injeção, (ZHAO; LAI; HARRINGTON, 1999).

A penetração tem importância significativa em motores Diesel e em motores do ciclo Otto com injeção direta. Penetrações elevadas podem provocar o impacto do combustível nas paredes da câmara de combustão. Isso é aceitável se as paredes estão aquecidas e uma quantidade suficiente de ar esteja presente, caso contrário ocorrerá aumento no consumo de combustível e formação de hidrocarbonetos não queimados. Por outro lado, quando a penetração é curta, a mistura ar e combustível pode se tornar insatisfatória. O desempenho ótimo do motor é alcançado quando a penetração é combinada adequadamente com tamanho e geometria da câmara de combustão, (LEFEBVRE, 1989).

Em geral, quanto mais estreito é o ângulo do cone, maior é a penetração, enquanto que um *spray* com grau maior de atomização, com ângulo de cone aberto, sofre maior efeito da resistência do ar resultando em menor penetração, (LEFEBVRE, 1989).

3.5.4 Comprimento de quebra (*break-up*)

O comprimento de quebra ou, no inglês *break-up*, é usualmente definido como a distância entre uma determinada referência, geralmente o orifício do injetor, e o ponto onde o jato líquido começa a se fragmentar em porções menores. BAUMGARTEN, 2006, cita a desintegração do jato líquido em gotículas em duas etapas. A primeira delas, inicialmente próxima ao injetor, chamada de quebra primária, e uma posterior, caracterizada pela quebra das gotículas formadas em gotículas menores, chamada de quebra secundária, que ocorre em posição mais afastada do injetor. A Figura 3.23 mostra um esquema dos dois processos, bem como a penetração e o ângulo de cone.

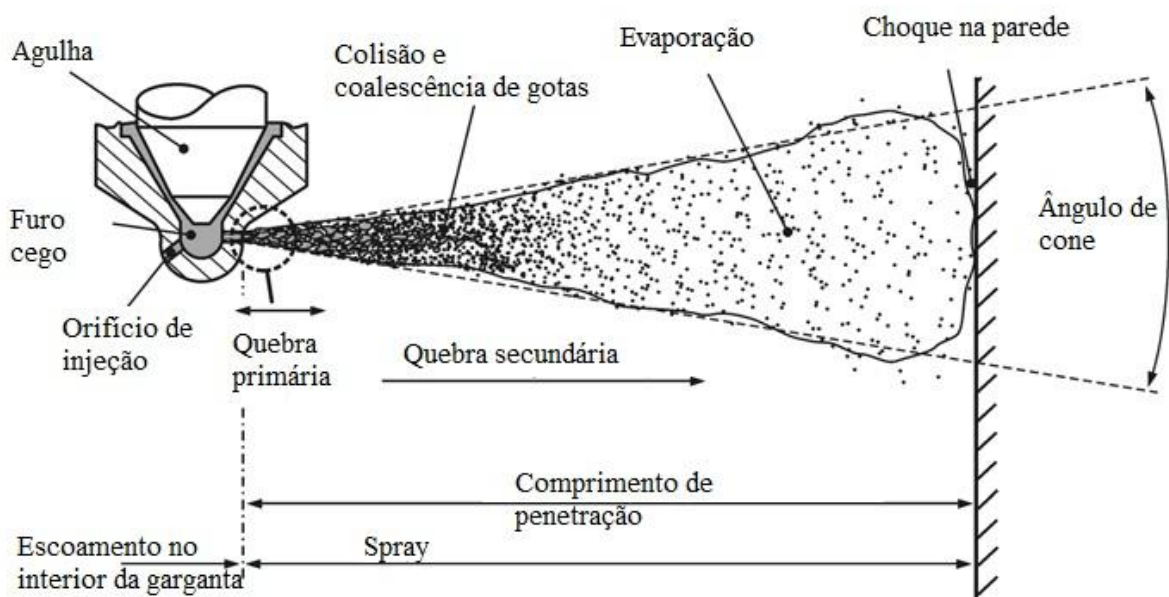


Figura 3.23 – Esquema de um *spray* mostrando a penetração, o ângulo de cone, e as desintegrações primária e secundária. FONTE: adaptado de BAUMGARTEN, 2006.

Está discutido, em LEFEBVRE, 1989, no capítulo 2, a forma mais elementar de atomização em quase-equilíbrio, usando como exemplo o gotejamento lento de um líquido a partir da extremidade de uma pipeta. O gotejamento ocorre quando a força da gravidade supera a força de coesão da tensão superficial. Considerando a descarga de um líquido através de um tubo fino disposto verticalmente e com orifício de diâmetro D_0 na sua parte inferior, a massa da gota formada m_g pode ser calculada por meio do equilíbrio das forças gravitacional e de tensão superficial σ . O resultado é a Equação (3.8).

$$m_g = \frac{\pi D_0 \sigma}{g} \quad (3.8)$$

Na Equação (3.8) g é a aceleração local da gravidade. O diâmetro D_g correspondente da gotícula é dado pela Equação (3.9) em que ρ_L é a massa específica do líquido.

$$D_g = \left(\frac{6D_0 \sigma}{\rho_L g} \right)^{1/3} \quad (3.9)$$

BAUMGARTEN, 2006, comenta sobre os diferentes mecanismos de quebra dos jatos líquidos. Tais mecanismos dependem das propriedades do líquido e do gás e são exemplificados através da Figura 3.24 para três diferentes regimes de atomização.

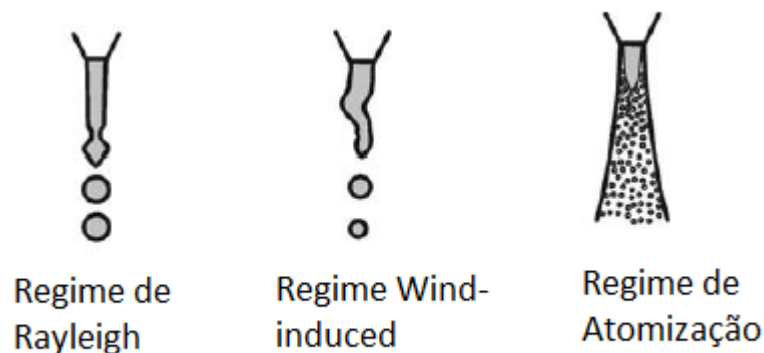


Figura 3.24 – Regimes de Rayleigh, *Wind-induced* e Atomização. Adaptado de BAUMGARTEN, 2006.

Para velocidades muito pequenas observa-se gotejamento e nenhum jato é formado. Aumentando um pouco a velocidade do líquido chega-se ao regime de Rayleigh onde um aumento da velocidade do líquido aumenta o comprimento do jato intacto. As gotículas formadas têm diâmetro da ordem do diâmetro do orifício do injetor. A desintegração do jato em gotas ocorre devido às oscilações ocasionadas pela inércia do jato líquido e sua tensão superficial.

O regime subsequente é o *wind-induced*. REITZ; BRACCO, 1986, classificam esse regime em duas etapas. Na primeira, o aumento da velocidade do líquido provoca um decréscimo do comprimento do jato intacto e o comportamento do *spray* é influenciado, principalmente, pelas condições do gás ambiente. O diâmetro das gotículas formadas ainda é comparável com o diâmetro do orifício do injetor. Na segunda etapa, o aumento da velocidade do líquido provoca escoamento turbulento dentro do injetor, o que por sua vez gera instabilidades no jato líquido que posteriormente são amplificadas, devido às interações com o gás ambiente. O resultado é a ruptura do jato líquido e a formação de gotículas menores que o orifício do injetor.

O regime de atomização é aquele no qual o comprimento do jato intacto se aproxima de zero na superfície do líquido, porém, um núcleo denso com comprimento diferente de zero pode ainda estar presente.

O número de Weber (We) e o número de Reynolds (Re) são dois números adimensionais que descrevem de forma quantitativa o mecanismo de quebra dos jatos líquidos. O número de Weber representa a inércia do fluido relativa à sua tensão superficial enquanto o número de Reynolds representa a inércia do fluido relativa à sua resistência ao escoamento. As Equações (3.10) e (3.11) representam esses dois importantes adimensionais.

$$We = \frac{\rho_L u^2 D_0}{\sigma} \quad (3.10)$$

$$Re = \frac{\rho_L u D_0}{\mu_L} \quad (3.11)$$

Nas Equações (3.10) e (3.11) ρ_L , μ_L representam a massa específica e a viscosidade absoluta na fase líquida, σ é a tensão superficial enquanto D_0 é um comprimento característico tomado como o diâmetro do orifício de onde emerge o jato líquido.

O número de Weber é usado na mecânica dos fluidos na análise de escoamentos com interface entre fluidos diferentes, especialmente em escoamentos multifásicos com interfaces fortemente curvadas (COUTO, 2007), enquanto o número de Reynolds, que também é muito utilizado na mecânica dos fluidos, serve como critério para classificar os diferentes regimes de escoamento: laminar, transição e turbulento.

O número de Ohnesorge, definido pela razão entre a raiz do número de Weber e o número de Reynolds, reúne todas as propriedades físicas relevantes do líquido e elimina a velocidade do jato. Esse número adimensional está representado na Equação (3.12).

$$Z = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\mu_L}{\sqrt{\sigma \rho_L d_0}} \quad (3.12)$$

O número de Ohnesorge representa a razão das forças viscosas pelas forças de tensão superficial e é frequentemente utilizado na fluidodinâmica das superfícies livres, tais como a dispersão de líquidos em ambientes gasosos, (COUTO, 2007).

Os diferentes regimes de atomização podem então ser classificados quantitativamente no diagrama da Figura 3.25 que mostra o número de Ohnesorge no eixo vertical e o número de Reynolds no eixo horizontal, bem como as regiões para os diferentes regimes de atomização dos *sprays*.

A Figura 3.25 inclui somente as propriedades do líquido. No entanto, os mecanismos de quebra também são dependentes da fase gasosa. Um diagrama qualitativamente mais completo proposto por REITZ; BRACCO, 1986, estende o diagrama da Figura 3.25 incluindo a razão da massa específica do gás ambiente com a massa específica do líquido na forma do diagrama tridimensional da Figura 3.26.

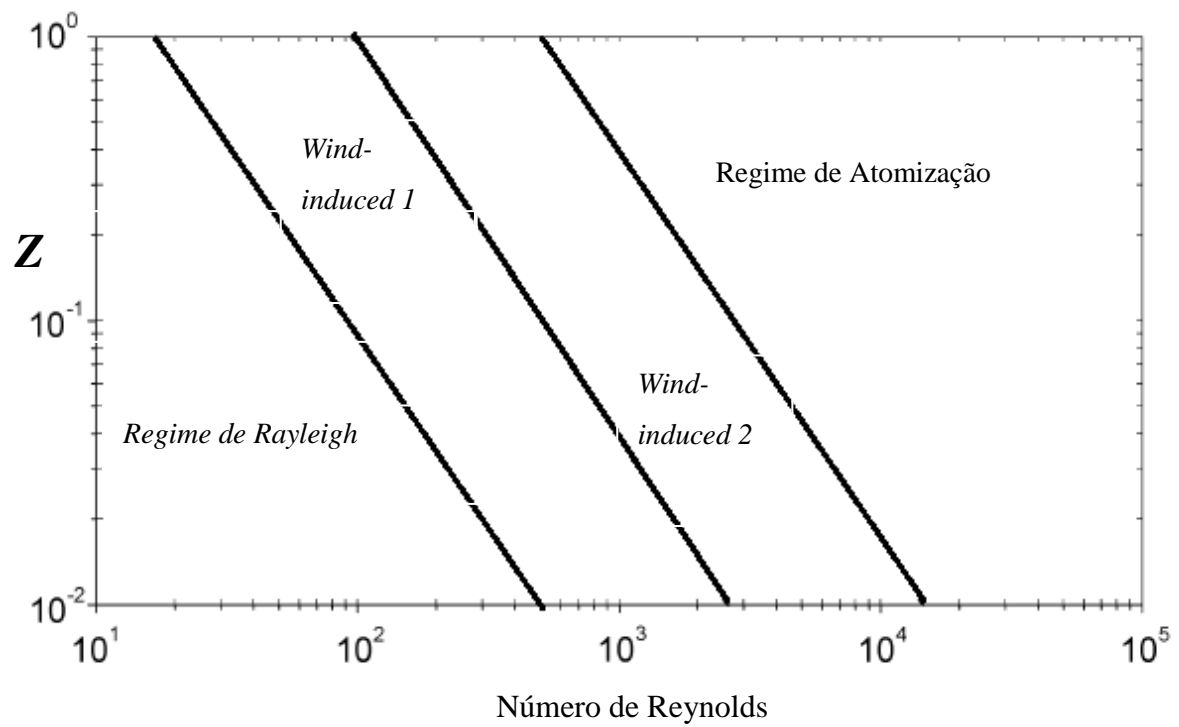


Figura 3.25 – Diferentes regimes de atomização dados pelos números adimensionais Ohnesorge Z e Reynolds. FONTE (BAUMGARTEN, 2006).

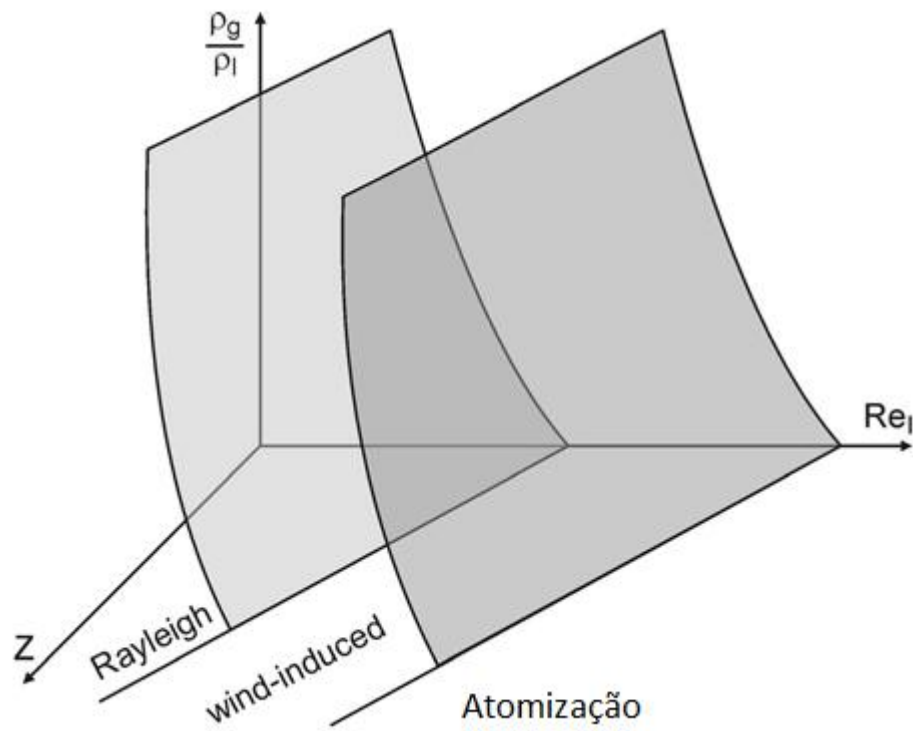


Figura 3.26 – Classificação dos regimes de atomização incluindo propriedades do gás ambiente. FONTE adaptado de (BAUMGARTEN, 2006).

BAUMGARTEN, 2006, também comenta sobre os diferentes mecanismos de quebra das gotas geradas pela ruptura primária dos jatos. Os mecanismos são dependentes do número de Weber da fase gasosa da Equação (3.13).

$$We = \frac{\rho_G u_{rel}^2 D_g}{\sigma} \quad (3.13)$$

A ruptura das gotas em gotículas menores é denominada quebra secundária. Na Equação (3.13) ρ_G , u_{rel} , D_g e σ são a massa específica da fase gasosa, a velocidade da gotícula em relação ao gás, o diâmetro da gotícula e a tensão superficial na interface da gotícula com o gás. Os diferentes mecanismos de quebra secundária são determinados por faixas diferentes do número de Weber da fase gasosa, no entanto, como discutido por BAUMGARTEN, 2006, não existe consistência nos dados para as faixas das transições observadas na literatura.

3.6 Características microscópicas dos *sprays*

As características microscópicas se referem às propriedades das partículas das quais os *sprays* são constituídos como os diâmetros médios e as distribuições de tamanhos.

3.6.1 Diâmetros médios

Como discutido em LEFEBVRE, 1989, em muitas aplicações é conveniente trabalhar somente com um valor médio dos diâmetros ao invés da completa distribuição de tamanhos. Os diâmetros médios podem ser caracterizados por diversas expressões, cada uma delas específicas para uma dada aplicação. A relação geral dessas expressões está representada pela Equação (3.14).

$$D_{ab} = \left[\frac{\sum N_i D_i^a}{\sum N_i D_i^b} \right]^{\frac{1}{(a-b)}} \quad (3.14)$$

Na Equação (3.14) o índice i denota a faixa de diâmetros considerada, N_i é o número de gotículas na faixa de diâmetros i e D_i é o valor médio da faixa i . A soma de a e b corresponde à ordem do diâmetro médio. Dessa forma D_{10} é o valor médio dos diâmetros de todas as gotículas consideradas, D_{30} é o diâmetro de uma gotícula cujo volume se multiplicado pelo número de gotas, terá como resultado, o volume total da amostra considerada e D_{32} é o diâmetro da gotícula cuja razão do volume pela área superficial é a mesma que aquela para todo o *spray* e recebe a denominação de Diâmetro Médio de Sauter. Estes e outros importantes diâmetros médios estão listados na Tabela 3.1.

LEFEBVRE, 1989, ressalta ainda que um único parâmetro não é capaz de definir a distribuição de tamanhos de gotículas. Por exemplo, dois *sprays* não são necessariamente similares por possuírem o mesmo diâmetro médio de Sauter. Em algumas aplicações práticas, é o conjunto das menores gotículas de um *spray* ou mesmo os maiores tamanhos de gotas que são de primordial importância na análise. Além disso, não existe uma correlação universal entre o diâmetro médio com a distribuição de tamanhos.

Tabela 3.1 – Diâmetros médios e suas aplicações, (LEFEBVRE, 1989).

a	b	Ordem	Símbolo	Nome	Expressão	Aplicação
1	0	1	D_{10}	Comprimento	$\frac{\sum N_i D_i}{\sum N_i}$	Comparações
2	0	2	D_{20}	Área superficial	$\left(\frac{\sum N_i D_i^2}{\sum N_i} \right)^{\frac{1}{2}}$	Controle de área superficial.
3	0	3	D_{30}	Volume	$\left(\frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i} \right)^{\frac{1}{3}}$	Controle de volume
2	1	3	D_{21}	Superfície área-comprimento.	$\frac{\sum N_i D_i^2}{\sum N_i D_i}$	Absorção
3	1	4	D_{31}	Volume-comprimento	$\left(\frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i D_i} \right)^{\frac{1}{2}}$	Evaporação, difusão
3	2	5	D_{32}	Sauter	$\frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i D_i^2}$	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.

3.6.2 Distribuições de tamanhos

Segundo GANESAN, 1995, atomizações com gotículas pequenas reduzem o atraso da ignição, devido ao aumento da área superficial do combustível. O autor comenta que menores tamanhos de gotas induzem a um menor grau de penetração devido à menor quantidade de movimento e menor velocidade relativa ao ar do qual o combustível deve encontrar o oxigênio após a vaporização.

HEYWOOD, 1988, também ressalta a importância da atomização do combustível em pequenas e numerosas gotículas para possibilitar uma grande área superficial e assim facilitar a evaporação, ao comentar sobre o comportamento dos *sprays* combustíveis em motores Diesel.

LEFEBVRE, 1989, explica que a maior parte dos atomizadores geram *sprays* com diâmetro de gotas dentro de uma faixa muito extensa de valores, podendo na prática variar de alguns poucos micrômetros até valores em torno de 500 μm . Cita ainda que um método instrutivo de estudo é a obtenção de um histograma representando a frequência de faixas de tamanhos. Tornando as faixas cada vez menores, o histograma passa a assumir o formato de uma curva de frequência característica de um determinado processo de atomização caso ela esteja baseada em uma amostra suficientemente significativa e representativa.

A Figura 3.27 mostra um exemplo qualitativo de um histograma de diâmetro de gotas típico e a Figura 3.28 mostra curvas de distribuição de frequências.

As Figuras 3.27 e 3.28 mostram que a substituição do histograma ou a curva de frequência referente ao número das gotas pelo volume das mesmas provoca um deslocamento dos dados para a direita. Isso ocorre devido ao maior efeito no volume das gotículas maiores já que o volume é proporcional ao cubo do diâmetro.

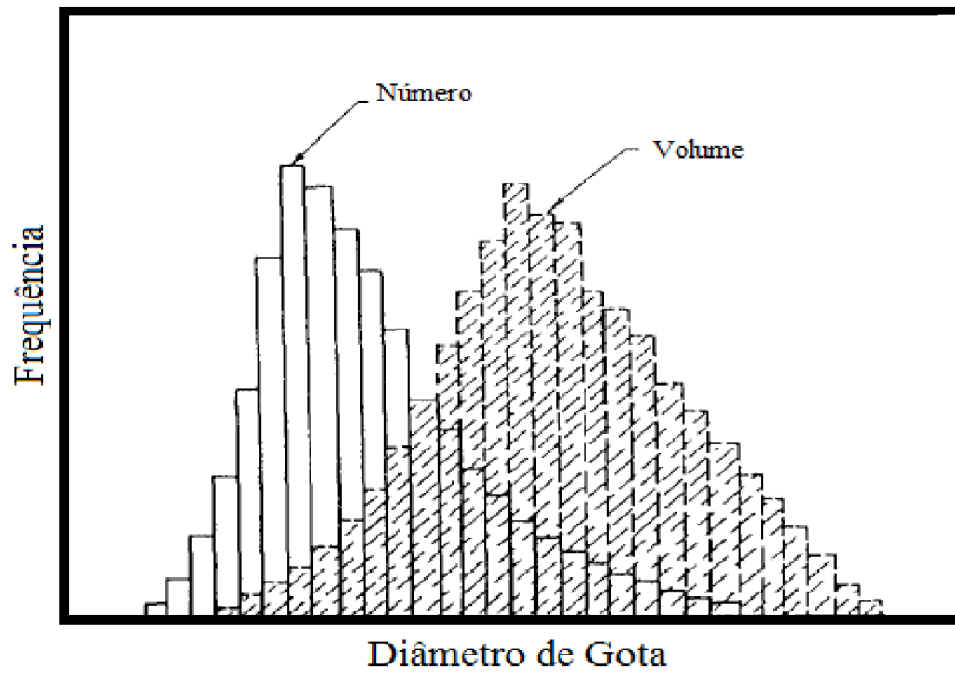


Figura 3.27 – Histogramas de gotículas baseados em número e volume, Adaptado de LEFEBVRE, 1989.

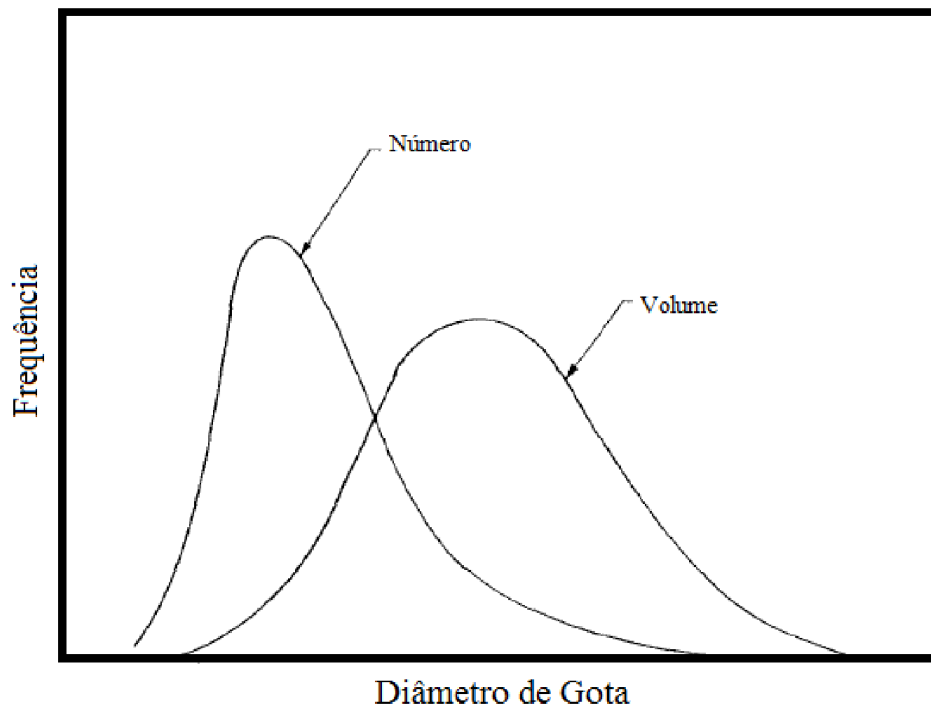


Figura 3.28 – Curvas de Frequência baseadas em número e volume. Adaptado de LEFEBVRE, 1989.

Em BAUMGARTEN, 2006, são citadas duas funções para modelagem da distribuição de tamanhos de gotículas em *sprays* com formato de cone oco. Uma delas é a qui-quadrado χ^2 cujo volume acumulativo é dado na Equação (3.15).

$$V_{X^2} = 1 - \exp\left(-\frac{D}{D_{X^2}}\right) \cdot \left[1 + \frac{D}{D_{X^2}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{D^2}{D_{X^2}^2} + \frac{1}{6} \cdot \frac{D^3}{D_{X^2}^3}\right], \quad D_{X^2} = \frac{D_{32}}{3} \quad (3.15)$$

Na Equação (3.15), V_{X^2} é a fração do volume total contida por gotículas com diâmetros menores que D . O outro modelo para *sprays* de cone oco citado por BAUMGARTEN, 2006, é o Rosin-Rammler, com a fração acumulada de volume por gotículas menores que D , dada pela Equação (3.16).

$$V_{RR} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{D}{D_{RR}}\right)^q\right] \quad (3.16)$$

Na Equação (3.16), o expoente q fornece uma medida do espalhamento dos tamanhos das gotículas e D_{RR} é função do diâmetro de Sauter D_{32} e é calculado através da expressão dada na Equação (3.17).

$$D_{RR} = D_{32} \cdot \gamma(1 - q^{-1}) \quad (3.17)$$

Na Equação (3.17), γ é a função definida pela expressão da Equação (3.18).

$$\gamma(x) = \int_0^\infty e^{-t} \cdot t^{x-1} \cdot dt \quad (3.18)$$

A Figura 3.29 mostra o resultado de medição realizado no CTM, através da técnica PDA, do volume acumulativo do *spray* de EXXSOL D60 injetado com pressão de 100 bar através do injetor de orifício único mostrado na Figura 4.8, junto com uma curva do modelo Rosin-Rammler da Equação (3.16) ajustada aos dados.

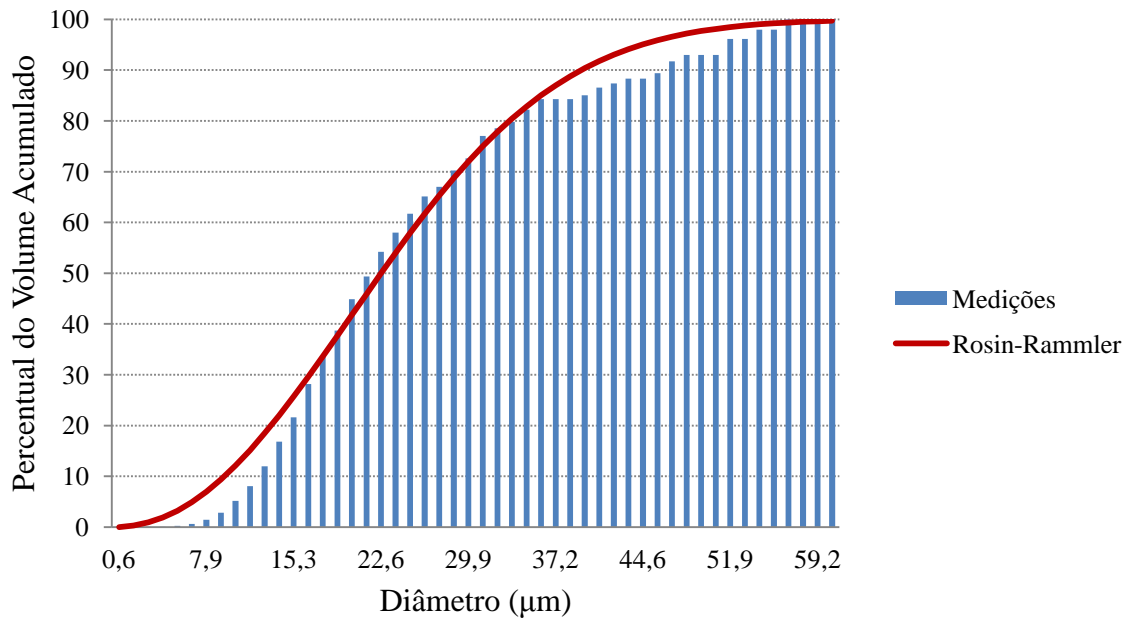


Figura 3.29 – Distribuição do volume acumulado do *spray* de EXXSOL D60 realizada a 8 mm de distância do orifício do injetor.

No caso específico mostrado na Figura 3.27, para a pressão de 100 bar de injeção, praticamente 100% do volume total das gotículas possuem diâmetro inferior a 60 μm . As medições foram realizadas a 14,3 diâmetros de orifício de distância vertical a partir da extremidade do injetor que é equivalente a 8 milímetros.

As equações das respectivas distribuições são dadas pelas derivadas das Equações (3.15) e (3.16) com relação ao diâmetro D . Essas equações representam funções de densidade de probabilidades. A Equação (3.19) representa a distribuição χ^2 e a Equação (3.20) a distribuição Rosin-Rammler.

$$\frac{dV_{\chi^2}}{dD} = \frac{D \cdot e^{-\frac{D}{D_{\chi^2}}}}{D_{\chi^2}^2} \cdot \left[\frac{1}{D_{\chi^2}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{D}{D_{\chi^2}^2} + \frac{1}{6} \cdot \frac{D^2}{D_{\chi^2}^3} - \frac{1}{2} \cdot D - \frac{1}{D_{\chi^2}} \right] \quad (3.19)$$

$$\frac{dV_{RR}}{dD} = \frac{q \cdot D^{q-1}}{D_{RR}^q} \cdot \exp \left[- \left(\frac{D}{D_{RR}} \right)^q \right] \quad (3.20)$$

A Figura 3.30 mostra a distribuição Rosin-Rammler dada pela Equação (3.20) para alguns diâmetros de Sauter mostrados na legenda, utilizando $q = 3,5$ que é o valor típico desse parâmetro relatado em BAUMGARTEN, 2006.

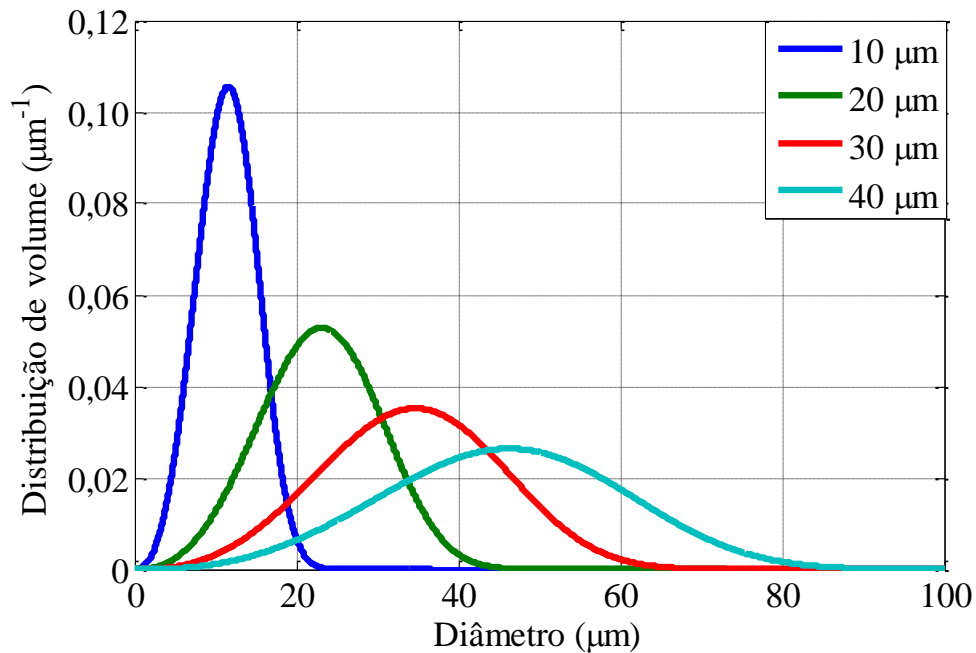


Figura 3.30 – Distribuição Rosin-Rammler para diâmetros de Sauter iguais a 10 μm, 20 μm, 30 μm e 40 μm.

O efeito do aumento do diâmetro D_{32} é ampliar a distribuição no sentido dos maiores tamanhos de gotas. De forma equivalente, quanto menor o diâmetro médio de Sauter, menor é a probabilidade de ocorrência de gotículas maiores, quando as distribuições possuem o mesmo parâmetro q .

A Figura 3.31 mostra a distribuição Rosin-Rammler para q variando em incrementos de 0,5 na faixa entre 2 e 4 e para $D_{32} = 20 \mu\text{m}$. O efeito do aumento do parâmetro q é concentrar uma porção maior da área sob a curva em uma faixa mais restrita de diâmetros.

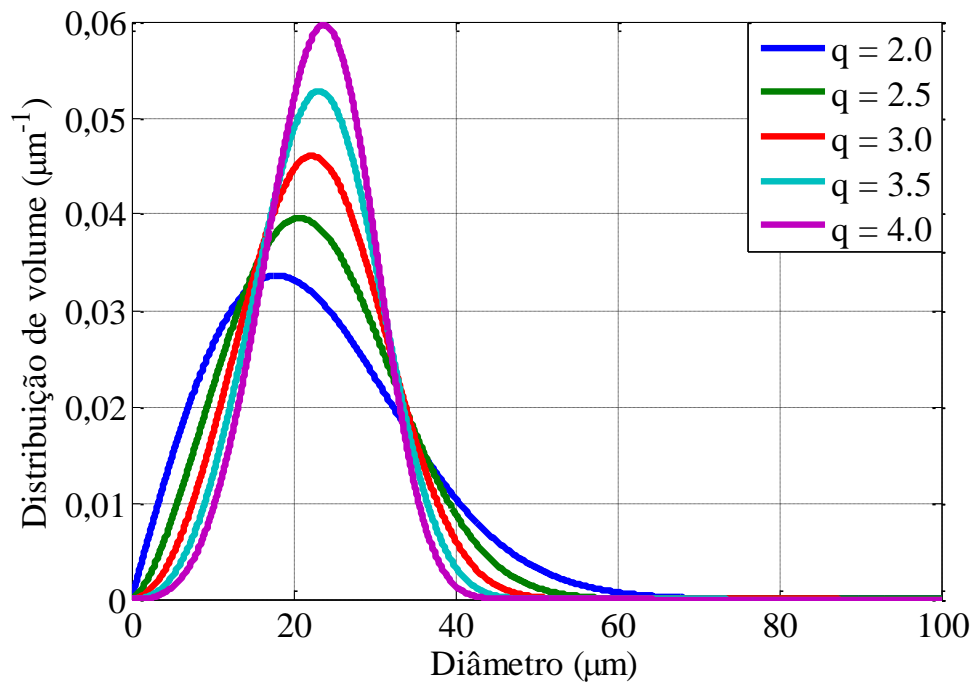


Figura 3.31 – Distribuição Rosin-Rammler para vários parâmetros q e para o diâmetro de Sauter D_{32} igual a $20 \mu\text{m}$.

3.6.3 Evaporação de gotículas

O pré-requisito para reações de combustão em motores com injeção direta é a formação de vapor de combustível a partir do combustível líquido já atomizado (BAUMGARTEN, 2006). Também SIRIGNANO, 1999, destaca que na combustão de combustíveis líquidos, a vaporização das gotículas pode ser a etapa de menor velocidade sendo, portanto, a etapa crítica determinante da velocidade global do processo de queima.

Em KUO, 2005, é explicado que na queima de uma única gotícula de combustível, em uma atmosfera oxidante, existe uma frente de chama que envolve totalmente a gotícula líquida como mostrado na Figura 3.32. Calor é transferido da frente de chama para a gotícula na direção radial enquanto um processo de transferência de massa ocorre no sentido oposto gerado pela evaporação do combustível líquido na superfície da gotícula. O vapor formado é transportado por difusão até a frente de chama. O oxigênio também se move da atmosfera até a frente de chama. A forma do envelope de chama ao redor da gotícula pode ser esférica Figura 3.32 (b) ou não, Figura 3.32 (a), dependendo das condições da vizinhança gasosa.

Chamas que não são esféricas estão associadas com convecção na vizinhança ou de forma equivalente, com o movimento relativo da gotícula com a atmosfera oxidante. Em SHARMA; MOHAN, 1984, também é comentado que a razão do raio da chama com o raio da gotícula aumenta durante a combustão.

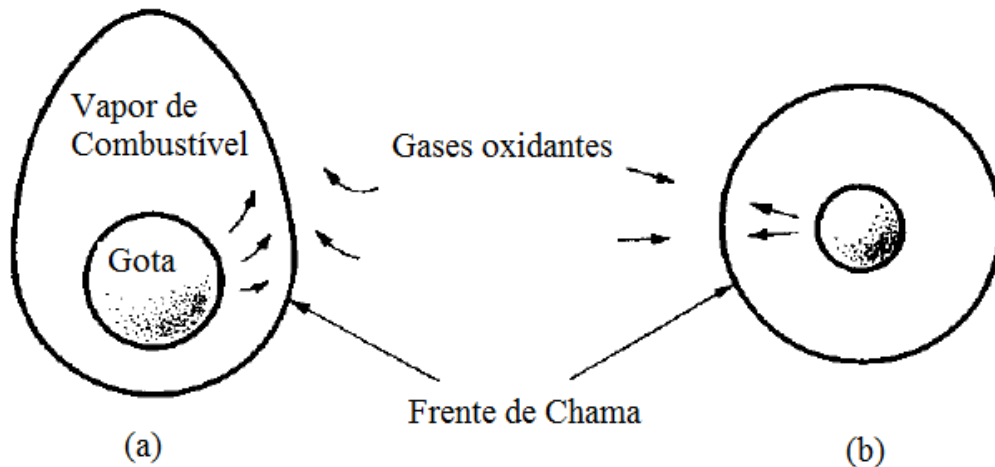


Figura 3.32 – Combustão de uma gotícula de combustível para (a) convecção na vizinhança e (b) sem convecção na vizinhança. FONTE: (KUO, 2005).

Um balanço de energia para a gotícula pode ser escrito na forma da Equação (3.21).

$$q|_{r+} = \rho_l \cdot h_v \cdot \frac{dr}{dt} + q|_{r-} \quad (3.21)$$

Na Equação (3.21), $q|_{r+}$ representa o fluxo de calor no lado do gás em direção à gotícula que pode ter contribuições dos mecanismos de condução e radiação de calor. Os parâmetros ρ_l e h_v representam respectivamente a massa específica do líquido e o seu calor latente de vaporização. O termo dr/dt representa a taxa de decréscimo do raio r da gotícula no tempo t . O último termo $q|_{r-}$ é o fluxo de calor por condução do lado da gotícula.

O balanço de energia expresso pela Equação (3.21) afirma que o fluxo de energia transferido do gás para a gotícula é igual à energia latente utilizada para evaporar sua superfície somada com a parcela de energia sensível utilizada para transferir calor para o interior da gotícula.

O efeito da evaporação da superfície da gotícula é a redução do seu diâmetro. Numerosos dados experimentais como relatado em KUO, 2005, sugerem a lei de decrescimento do diâmetro da gotícula na forma da Equação (3.22) pelo efeito da evaporação.

$$[D(t)]^2 = [D_{t=0}]^2 - \beta \cdot t \quad (3.22)$$

Na Equação (3.22) D é o diâmetro da gotícula no instante t , D_0 é o diâmetro inicial no instante de $t = 0$ e β é o coeficiente de evaporação. Em KUO, 2005, existe uma dedução de uma correlação para o coeficiente β . O resultado é a expressão dada pela Equação (3.23).

$$\beta = \frac{8 \cdot \rho_s \cdot \alpha_s}{\rho_l} \cdot \ln(1 + B) \quad (3.23)$$

Em que ρ_s e α_s se referem ao combustível na fase gasosa na interface gás/gotícula. Esses parâmetros são respectivamente a massa específica do combustível e a difusividade térmica. A difusividade térmica α_s é uma grandeza que representa a razão entre a condutividade térmica λ_s e a capacidade de armazenamento de energia térmica que é dada pelo produto da massa específica ρ_s com o calor específico c_p . Tal razão está representada na Equação (3.24).

$$\alpha_s = \frac{\lambda_s}{\rho_s c_p} \quad (3.24)$$

O parâmetro B é o número de Spalding e é calculado através da Equação (3.25), onde Y_{Fs} é a fração em massa do combustível na mistura gasosa na interface e $Y_{F\infty}$ é a fração em massa do combustível na fase gasosa longe da gotícula.

$$B = \frac{Y_{Fs} - Y_{F\infty}}{1 - Y_{Fs}} \quad (3.25)$$

As Equações (3.22) e (3.23) podem ser combinadas para o cálculo do tempo de vida de uma gotícula t_v , substituindo $D = 0$ na equação combinada. O resultado é a Equação (3.26).

$$t_v = \frac{[D_{t=0}]^2}{\beta} = \frac{\rho_l \cdot [D_{t=0}]^2}{8 \cdot \rho_s \cdot \alpha_s \cdot \ln(1 + B)} \quad (3.26)$$

A Equação (3.26) mostra que o tempo de vida da gotícula é maior para gotículas grandes e que combustíveis menos densos evaporam mais rápido. Além disso, o efeito da densidade do gás e da difusividade térmica da fase gasosa no tempo de vida da gotícula também está claro na Equação (3.26).

3.7 Trabalhos relacionados com análises de *sprays*

Nesta seção pretendeu-se fazer alguns comentários resumidos de trabalhos relacionados com análises de *sprays* que guardam alguma semelhança com o trabalho proposto na presente tese.

Em PARK et al., 2009, a atomização de três diferentes fluidos combustíveis em um injetor de injeção direta de gasolina foi analisada: etanol com 99,9% de pureza (E100), gasolina (G100) e uma mistura constituída de 85% de etanol com 15% de gasolina (E85). Características como as penetrações, as larguras dos *sprays* e o diâmetro médio de Sauter das gotículas, foram medidas experimentalmente e também obtidas por simulação numérica. Os resultados mostraram que as penetrações axiais dos *sprays* de cada fluido foram similares enquanto o ângulo de cone do E100 foi ligeiramente superior aos demais combustíveis. Os resultados numéricos do trabalho mostraram formas semelhantes quanto à geometria do *spray* comparados às geometrias experimentais observadas.

No trabalho de PASTOR et al., 2011, foram medidas as penetrações do jato líquido e do vapor dos *sprays* Diesel de um injetor com sete orifícios dentro de um motor com acesso óptico sem combustão. Um tratamento de imagens foi realizado para converter as imagens dos *sprays* em imagens binárias e os contornos dos *sprays* foram obtidos. As curvas de penetração de líquido e de vapor coincidiram no início das injeções. No entanto, com a posterior evolução dos *sprays*, a penetração do vapor continuou com comportamento crescente enquanto a do líquido

atingiu um patamar constante devido à evaporação do combustível. Um modelo unidimensional do *spray* também foi validado com as medidas experimentais obtidas.

Em ALEIFERIS; VAN ROMUNDE, 2013, o desenvolvimento de *sprays* de isoctano, n-pentano, gasolina, etanol e butanol oriundos de um injetor de injeção direta com múltiplos orifícios foi o objeto de estudo. As análises foram realizadas variando a temperatura do corpo do injetor (20, 50, 90 e 120°C) para pressões ambientes de 0,5 e 1,0 bar. A variação da temperatura do corpo do injetor foi motivada pela escassez de dados na literatura relativa ao efeito dessa variável no comportamento dos *sprays* combustíveis. As injeções ocorreram em uma câmara de pressão com acesso óptico. Filmagens foram realizadas a uma frequência de 9000 quadros por segundo utilizando *shadowgraph*. As características dos *sprays* quanto à forma e penetração foram similares para a condição de 20°C e 1,0 bar. Aumentando para 90°C a temperatura do injetor, as penetrações dos combustíveis aumentaram ligeiramente devido à diminuição da viscosidade do fluido com uma menor resistência ao escoamento interno no injetor fazendo os combustíveis serem descarregados com maior quantidade de movimento. Para a condição de 120°C e 0,5 bar a vaporização dos combustíveis com diferentes pontos de ebulição provocou mudanças nas penetrações medidas. Os combustíveis com menores pontos de ebulição e, portanto, significativas vaporizações apresentaram penetrações menores que aqueles com maiores pontos de ebulição. Outros parâmetros avaliados no trabalho foram os ângulos de cone e o tamanho das gotículas medidas utilizando PDA.

Em KIM; PARK; LEE, 2014 filmagens foram obtidas dos *sprays* de gasolina de quatro injetores de injeção direta com múltiplos orifícios e com diferentes disposições dos orifícios, denominados como hexagonal de seis orifícios, hexagonal de sete orifícios, hexagonal concentrado de seis orifícios (orifícios mais próximos) e triangular com seis orifícios (dispostos em formato de dois triângulos). As imagens foram processadas para análise de intensidade de luz em duas diferentes posições axiais 40 e 60 mm e para pressões de injeção de 4 e 10 MPa. As análises de intensidade de luz as quais o trabalho se refere constituiu em um procedimento semelhante a uma análise de perfis de intensidades de pixels na direção horizontal. A obtenção das bordas dos *sprays* da presente Tese utiliza a análise dos perfis horizontais como uma etapa dentro da metodologia do item 4.2. Os resultados mostraram intensidades de luz maiores para pressão mais alta de injeção de 10 MPa quando a comparação se referiu ao mesmo injetor e variando somente a pressão, devido à quantidade maior de fluido que é injetado. Também foi observada intensidade maior de luminosidade

para o injetor hexagonal de sete orifícios e injetor hexagonal concentrado para uma mesma pressão de injeção.

Em QIN; HUNG; XU, 2015, foi investigada a variação ciclo a ciclo das características do *spray* combustível dentro de um motor com acesso óptico, quatro válvulas e injeção direta. Um injetor com oito orifícios foi utilizado para injetar gasolina. Imagens dos *sprays* foram obtidas em 50 ciclos consecutivos, quatro diferentes condições de operação do motor quanto à temperatura do combustível e pressão de admissão, foram obtidas. Com o motor funcionando a 800 RPM a taxa de filmagem fornece duas imagens para cada grau de ângulo de eixo de manivelas. As estruturas dos *sprays* apresentaram significativas variações ciclo a ciclo influenciadas principalmente pelo escoamento dentro do cilindro.

Uma câmara de volume constante, com acesso óptico para estudar as características da combustão e do *spray* com três diferentes misturas de combustíveis, em diferentes temperaturas ambientes foi utilizada no trabalho de LIU; LI; JIN, 2015. A penetração do *spray* e a luminosidade da chama foram os parâmetros estudados e diretamente relacionados com a análise matemática das imagens. Um injetor de seis orifícios, operando com 134 MPa, foi utilizado para injetar misturas de butanol, Diesel e biodiesel de soja nas proporções (0% n-butanol / 20% biodiesel / 80% Diesel), (5% n-butanol/15% biodiesel/ 80% Diesel) e (10% n-butanol/10% biodiesel/80% Diesel). As paredes da câmara foram aquecidas a 380 K e filmagens com 15000 quadros por segundo e iluminação por laser de vapor de cobre, foram realizadas. Uma mistura dos gases nitrogênio, oxigênio e acetileno, foi adicionada à câmara e a combustão iniciada por centelha. O n-butanol, componente mais volátil da mistura, produz *sprays* com maior taxa de evaporação, e a consequência observada nos testes, foi a redução da penetração de líquido com o aumento do seu percentual na mistura. A luminosidade da chama foi avaliada por meio da soma de todas as intensidades dos pixels das imagens. Os resultados mostraram que o aumento da temperatura no interior da câmara resulta em aumento do tempo de autoignição e que a luminosidade natural da chama também cresce com a temperatura. Como destacado no trabalho, a luminosidade está diretamente relacionada com a formação de fuligem.

Em SONG; PARK, 2015, análises em filmagens de *sprays* de gasolina de um injetor com seis orifícios, foram realizadas em diferentes condições de pressão e atmosfera inicialmente estática, com pressões de injeção entre 5 e 30 MPa e com intervalos de 5 MPa. Também foram obtidas filmagens em motor com acesso óptico a 900 RPM para os momentos de

injeção de 90° , 180° e 300° onde 360° correspondeu ao PMS do tempo de compressão, e com pressões de injeção de 50, 150 e 250 MPa. Os cálculos dos números de Reynolds e Ohnesorge mostraram que todos os testes ocorreram no regime de atomização. Para os testes estáticos, os ângulos de cone medidos não apresentaram dependência com a pressão enquanto que as penetrações aumentaram com o aumento da pressão. No entanto as diferenças das penetrações reduzem na medida em que as pressões aumentam. Para as imagens da injeção direta no motor, uma análise mais qualitativa foi realizada e mostrou para o caso da injeção na admissão em 90° , que uma pressão mais elevada de injeção promove evaporação mais efetiva do *spray*.

RASHAD; YONG; ZEKUN, 2016, mediram diâmetros de Sauter e ângulos de cone de *sprays* produzidos por diferentes injetores do tipo *pressure-swirl* em duas pressões de injeção: 0,8 MPa e 1,2 MPa usando água como fluido de teste. O objetivo foi analisar a influência da geometria interna dos injetores nas grandezas mensuradas. A Figura 3.33 mostra os parâmetros geométricos internos considerados na análise. Os ângulos de cone foram medidos através do *software Photoshop* na imagem média de várias injeções para cada injetor. Os valores ótimos para os ângulos de cone (máximos valores) ocorreram para L_s/D_s igual a 3,75 e L_0/D_0 igual a 1,44. Na faixa analisada para a razão D_s/D_0 que foi de 3 até 7,50 o ângulo de cone decresceu continuamente. Os valores ótimos do diâmetro de Sauter (mínimos valores) ocorreram para D_s/D_0 igual 3,75 e L_0/D_0 igual a 1,44. Na faixa analisada de L_0/D_0 entre 0,81 e 2,69 o diâmetro de Sauter cresceu continuamente.

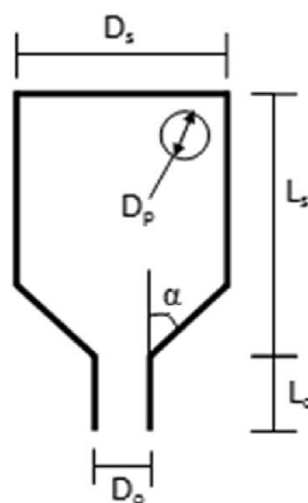


Figura 3.33 – Parâmetros geométricos internos do injetor considerados no trabalho de RASHAD; YONG; ZEKUN, 2016.

RASHAD; YONG; ZEKUN, 2016, realizaram experimentos para verificar a influência da geometria interna dos injetores *pressure-swirl* nas características dos *sprays* usando água como fluido de teste. O escoamento interno nesses injetores é geralmente formado por um filme líquido em escoamento rotativo na forma de um cilindro oco envolvendo um núcleo de ar. Existem trabalhos numéricos na literatura que analisam características do escoamento interno nesses injetores como a forma do escoamento do líquido, as características do núcleo de ar e a distribuição de pressão interna (CHINN, 2000) e (RIVAS; PIMENTA; RIVAS, 2014). Estudos teóricos envolvendo as equações diferenciais de continuidade e quantidade de movimento da mecânica dos fluidos com várias considerações a respeito do escoamento interno foram publicados por WIMMER; BRENN, 2013. e AMINI, 2016.

A presente Tese possui como principal contribuição para a literatura atual a proposição de metodologias não subjetivas e a obtenção de relações preditivas para o comportamento dos *sprays* produzidos por injetores do tipo *pressure-swirl* propondo inclusive relações matemáticas com conexões entre propriedades macroscópicas e microscópicas que não foram encontradas na literatura.

4 METODOLOGIA

4.1 Configurações dos testes experimentais

Os testes realizados neste trabalho ocorreram de duas formas distintas. A primeira delas com a injeção em atmosfera inicialmente estática, fora do motor, utilizando fluidos simulacros do etanol e da gasolina. Nesta Tese os fluidos simulacros são chamados de fluidos de teste. Os simulacros utilizados são fluidos menos inflamáveis e propiciam maior segurança que os combustíveis originais. Fez-se inicialmente a injeção de água através do injetor para acertar condições experimentais e testar correlações obtidas a partir dos simulacros para dados experimentais da injeção de água já que ela possui propriedades físicas bem diferentes dos fluidos de teste. A segunda forma ocorreu em condições dinâmicas dentro de um motor de pesquisa em funcionamento com a injeção do etanol hidratado.

A filmagem com 6504 quadros por segundo, da sombra do fenômeno em estudo (*shadowgraph*) foi realizada em ambos os casos. Com essa frequência é obtido um intervalo de tempo de aproximadamente 0,15 ms entre imagens sucessivas. Para a primeira imagem com *spray* é associado um instante de tempo igual à metade desse intervalo, para a segunda imagem um instante equivalente a três meios desse intervalo e assim sucessivamente. Utilizou-se uma câmera Phantom V7.3; Nikkor 105 mm lens f/2D. Fontes de iluminação alimentadas por corrente contínua serviram para evitar oscilações de luminosidade nas imagens.

Todas as imagens obtidas foram com resolução de 800 pixels na direção horizontal por 600 pixels na direção vertical e elas consistiram na principal fonte de informações para tratamento e obtenção dos resultados. A densidade de resolução ou fator de escala para os testes estáticos foi de $249,6 \pm 0,3$ pixels/cm para as filmagens próximas do injetor e $72,72 \pm 0,01$ pixels/cm para as filmagens em uma posição mais afastada. Para os testes dinâmicos, o fator de escala foi de $89,6 \pm 0,2$ pixels/cm.

Um esquema para *shadowgraph* (fotografia da sombra) do *spray* está mostrado na Figura 4.1 para os testes em condições dinâmicas.

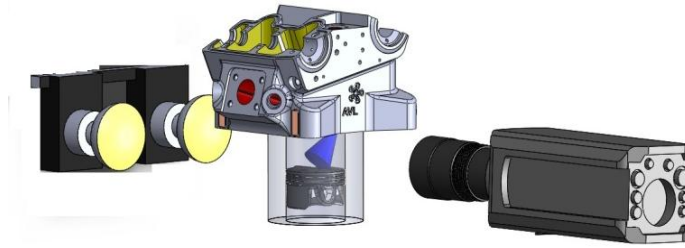


Figura 4.1 – Esquema experimental da técnica *Shadowgraph* (fotografia da sombra) para filmagem no motor.

As imagens obtidas com a técnica *Shadowgraph* passaram por um tratamento inicial que consistiu nas seguintes etapas:

- 1) conversão da imagem colorida para a imagem em escala de cinzas;
- 2) subtração da imagem com *spray* de outra imagem sem *spray*.
- 3) ajuste do histograma de pixels e filtragem.

A etapa 1 se fez necessária para simplificações das representações matemáticas das imagens. Imagens coloridas possuem matrizes tridimensionais enquanto a imagem em escala de cinzas é bidimensional e possui valores inteiros entre 0, correspondente à cor preta e 255 correspondente à cor branca. Valores inteiros intermediários a esses dois extremos representam escalas de cinza. As imagens em escala de cinzas são adequadas para aplicação das metodologias propostas neste trabalho. A Figura 4.2 (a) mostra uma imagem obtida da filmagem da injeção com pressão de 100 bar em atmosfera inicialmente estática de EXXSOL D60, simulacro do etanol combustível, em um instante próximo a 1,15 milissegundos após o início da injeção. O resultado da transformação para a escala de cinzas desta imagem está representado na Figura 4.2 (b).

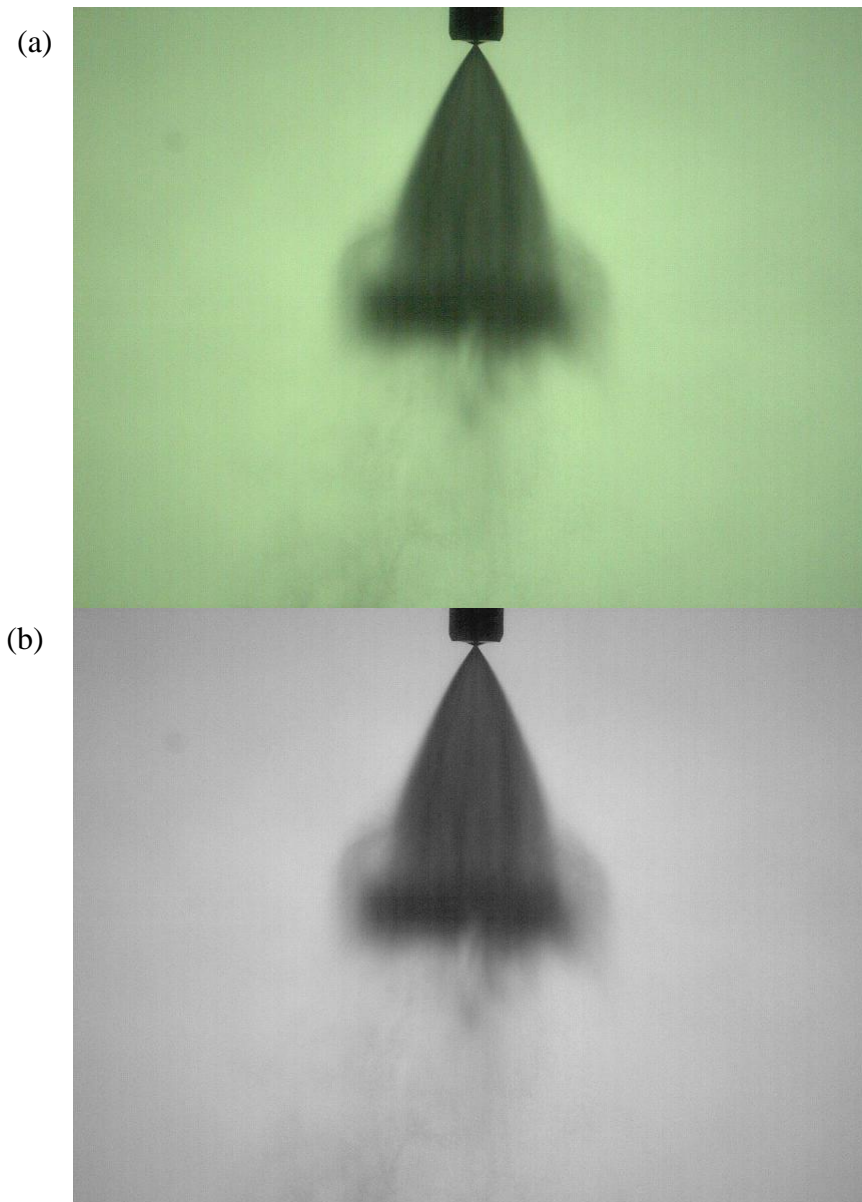


Figura 4.2 – (a) Imagem obtida da filmagem e (b) imagem obtida da filmagem convertida para a escala de cinza.

A etapa 2 consistiu em uma subtração termo a termo dos elementos da matriz de uma imagem com *spray* em escala de cinzas de outra imagem obtida pela média de várias imagens sem *spray*, também em escala de cinzas. A utilização da imagem média sem *spray* na subtração reduz a quantidade de ruídos na imagem subtraída. O resultado é uma imagem escura com uma região clara que evidencia somente o *spray*. A Figura 4.3 mostra o resultado da subtração da imagem em escala de cinzas da Figura 4.2.

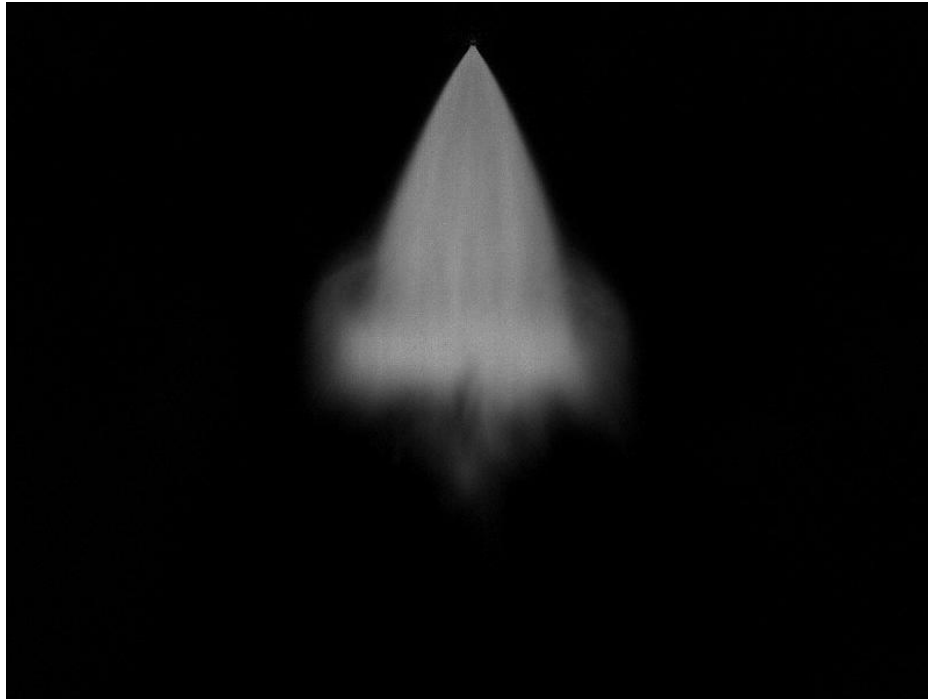


Figura 4.3 – Resultado da subtração de uma imagem em escala de cinza do *spray* com uma imagem média também em escala de cinza sem *spray*.

A etapa 3 consistiu em ajustar o histograma de intensidade dos pixels e filtrar a imagem. O ajuste do histograma consiste em associar o maior valor de intensidade de pixel da imagem subtraída para 255 correspondente à cor branca e o menor valor de intensidade de pixel para 0 correspondente à cor preta. Todos os outros valores intermediários são também redefinidos. Assim, o contraste das imagens é melhorado e a diferença das regiões com presença e ausência dos *sprays* é evidenciada.

A filtragem da imagem é um processo para a redução de ruídos. Os ruídos são alguns pixels mais claros que permanecem na parte escura da imagem e dificultam a análise posterior de identificação das bordas. Se as imagens possuírem ruídos com intensidades de pixels elevadas os ruídos são erroneamente identificados como bordas dos *sprays*

A Figura 4.4 mostra o resultado do ajuste e filtragem aplicados à imagem da Figura 4.3 onde é perceptível a melhoria do contraste. A identificação das bordas dos *sprays* é favorecida pela metodologia aplicada nesta Tese, quando as diferenças das intensidades das regiões de *spray* (claras) com as regiões fora do *spray* (escuras) são acentuadas.

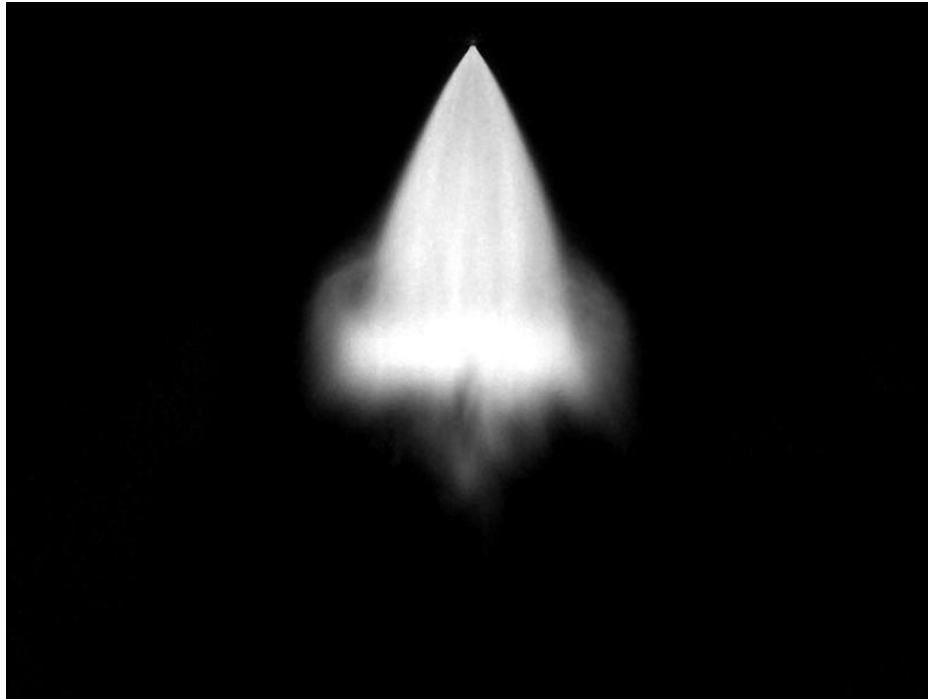


Figura 4.4 – Imagem subtraída do *spray* após ajuste do histograma de pixels para melhoria do contraste.

A Figura 4.5 mostra o histograma antes do ajuste que é referente à Figura 4.3, e a Figura 4.6 mostra o histograma de intensidade dos pixels após o ajuste e é referente à Figura 4.4.

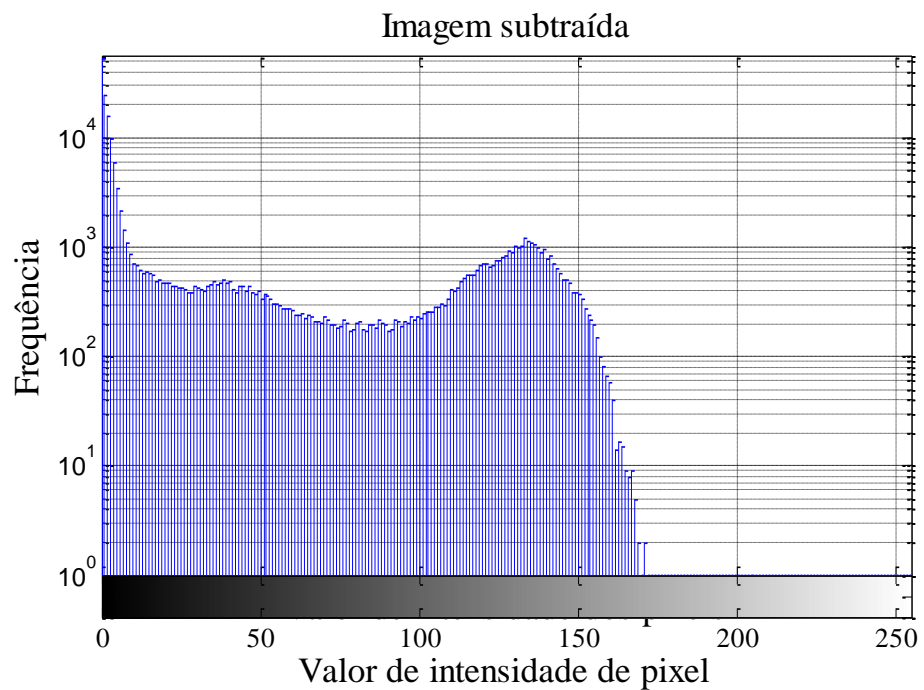


Figura 4.5 – Histograma das intensidades dos pixels da imagem subtraída da Figura 4.3 sem ajuste de contraste.

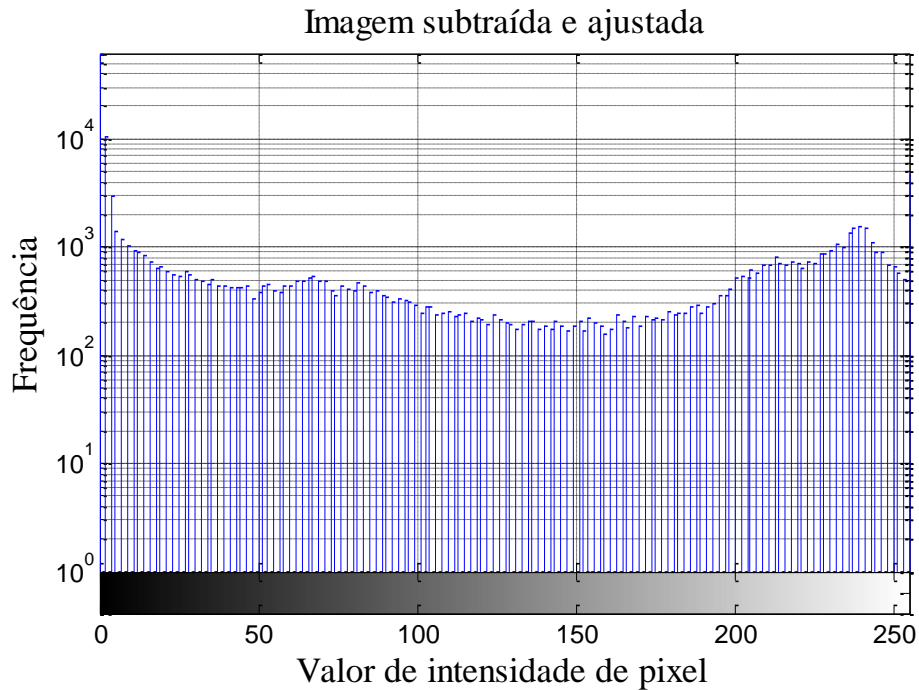


Figura 4.6 – Histograma de intensidade de pixels da imagem da Figura 4.4 subtraída e ajustada que compreende toda a faixa de valores possíveis.

A distribuição das intensidades dos pixels compreende toda a faixa entre 0 e 255 na imagem ajustada e filtrada (Figura 4.4). Tal fato não é observado para a distribuição da imagem subtraída sem o ajuste (Figura 4.3).

Este pré-tratamento constituído nas três etapas, foi realizado em todas as imagens para os testes estáticos e dinâmicos e as imagens resultantes foram utilizadas para os tratamentos subsequentes. Subtração, ajuste e filtragem são realizados por meio de funções específicas do MATLAB para imagens (*Image Processing Toolbox*).

A filmagem em escala conhecida de comprimento, na posição do foco da câmera, também se fez necessária antes de todas as filmagens. O objetivo foi a obtenção de um fator de escala ou densidade de resolução, em pixels/cm. Com o conhecimento do fator de escala, foi possível criar um sistema de coordenadas que associa a qualquer ponto da imagem, coordenadas de posição. A medição do fator de escala se faz manualmente no ambiente MATLAB que permite a obtenção de distâncias em pixels. A Figura 4.7 mostra um exemplo de medição para a obtenção da densidade de resolução.

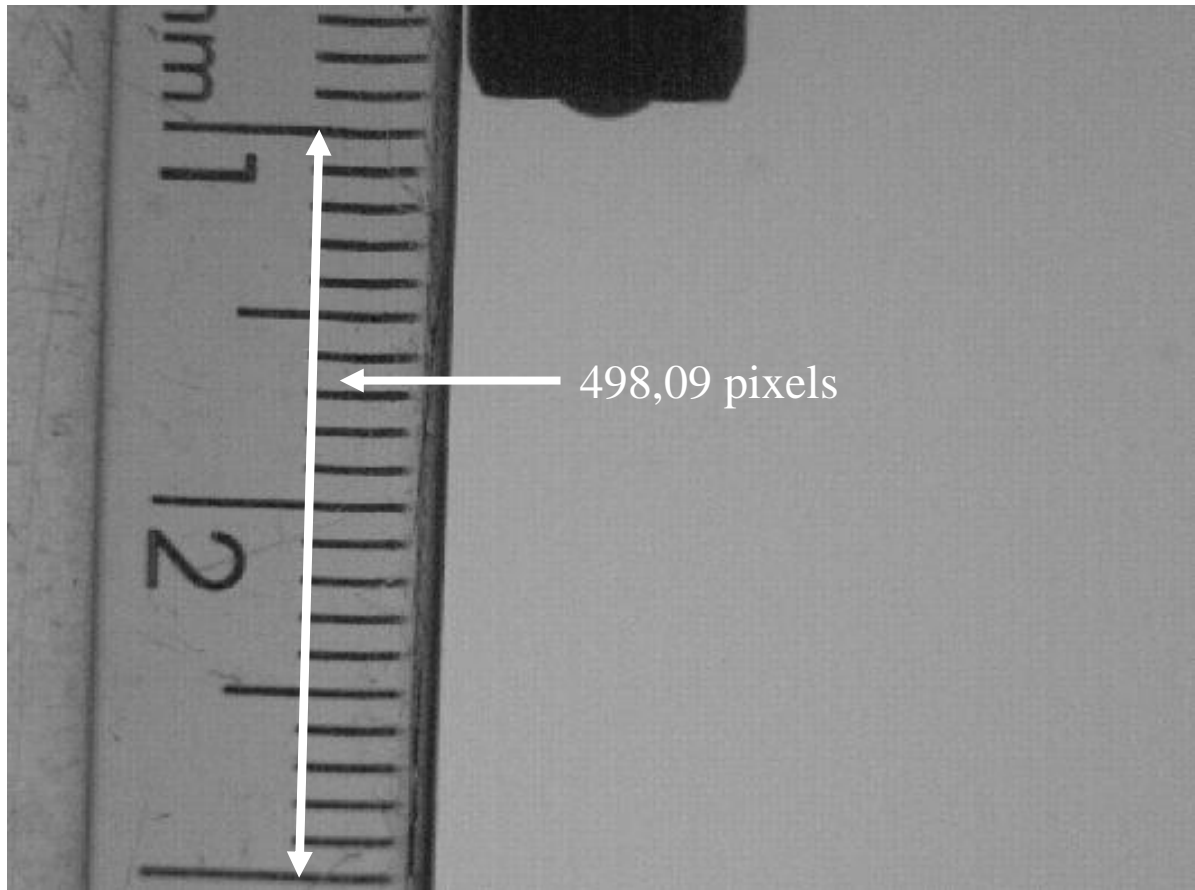


Figura 4.7 – Medição de distância em pixels para cálculo da densidade de resolução ou fator de escala.

Uma distância igual a 2,0 centímetros na Figura 4.7 equivale a 498,09 pixels na imagem. O fator de escala correspondente é, então, 249,045 pixels/cm. Se a origem de um sistema de coordenadas for definida no centro de algum pixel, os centros de todos os demais pixels são então associados com coordenadas de posição $x(cm)$ e $y(cm)$ utilizando as distâncias horizontal e vertical da origem e o fator de escala.

4.1.1 Injeções em condições estáticas

Os testes de injeção para análise do *spray* em condições estáticas foram realizados utilizando um injetor de injeção direta com único orifício, da Magneti Marelli modelo, IWD3+ 193. A Figura 4.8 mostra a imagem do injetor utilizado nos testes. Esse injetor é do tipo *pressure-*

swirl e, portanto, produz *sprays* cônicos com maior concentração de gotículas na periferia do cone após o estágio inicial de injeção do pré-*spray*.



Figura 4.8 – Injetor de Injeção direta de um único orifício do tipo *pressure-swirl* utilizado nos testes estáticos.

O Fluido EXXSOL D60 com massa específica medida de $782,6 \text{ kg/m}^3$ a 25°C foi utilizado nos testes para simular as propriedades do etanol combustível e o fluido EXXSOL D40 com massa específica de $780,5 \text{ kg/m}^3$ também a 25°C para simular as propriedades da gasolina.

Os fluidos da família EXXSOL são solventes de hidrocarbonetos alifáticos e não aromatizados comercializados pela ExxonMobil que entram em ebulição na faixa de 159 a 316°C e se caracterizam por possuírem baixa tensão superficial e baixa taxa de evaporação, (CHEREMISINOFF, 2003).

A utilização desses simulacros se fez necessária devido à natureza dos testes realizados. Os fluidos foram injetados no ar ambiente com pressões de injeção relativamente altas, de forma que a utilização dos combustíveis gasolina e etanol em laboratório, não ocorreria com a segurança desejada. Assim, optou-se pela realização dos testes com fluidos menos inflamáveis que os combustíveis e que possuíssem propriedades semelhantes. A viscosidade absoluta em Pa.s e a tensão superficial em N/m dos fluidos simulacros utilizados, foram medidos no Laboratório de Combustão do CTM/UFMG e estão na Tabela 4.1.

A Tabela 4.2 também mostra os valores medidos de viscosidade absoluta em Pa.s e tensão superficial em N/m no Laboratório de Combustão do CTM/UFMG para o etanol hidratado, a gasolina A e a gasolina C.

Tabela 4.1 – Viscosidade absoluta e Tensão superficial dos fluidos de teste.

Temperatura (°C)	Viscosidade absoluta (Pa.s)		Tensão superficial (N/m)	
	EXXSOL D40	EXXSOL D60	EXXSOL D40	EXXSOL D60
10	$1,54 \times 10^{-3}$	$1,92 \times 10^{-3}$	$2,45 \times 10^{-2}$	$2,54 \times 10^{-2}$
20	$1,36 \times 10^{-3}$	$1,62 \times 10^{-3}$	$2,41 \times 10^{-2}$	$2,42 \times 10^{-2}$
30	$1,04 \times 10^{-3}$	$1,27 \times 10^{-3}$	$2,34 \times 10^{-2}$	$2,39 \times 10^{-2}$
40	$9,2 \times 10^{-4}$	$1,13 \times 10^{-3}$	$2,27 \times 10^{-2}$	$2,32 \times 10^{-2}$

Tabela 4.2 – Viscosidade absoluta e Tensão superficial dos combustíveis.

Temperatura (°C)	Viscosidade (Pa.s)			Tensão Superficial (N/m)		
	Etanol	Gasolina A	Gasolina C	Etanol	Gasolina A	Gasolina C
10	$2,23 \times 10^{-3}$	$0,89 \times 10^{-3}$	$0,87 \times 10^{-3}$	$2,465 \times 10^{-2}$	$2,354 \times 10^{-2}$	$2,249 \times 10^{-2}$
20	$1,77 \times 10^{-3}$	$0,79 \times 10^{-3}$	$0,79 \times 10^{-3}$	$2,352 \times 10^{-2}$	$2,267 \times 10^{-2}$	$2,192 \times 10^{-2}$
30	$1,44 \times 10^{-3}$	$0,73 \times 10^{-3}$	$0,65 \times 10^{-3}$	$2,294 \times 10^{-2}$	$2,201 \times 10^{-2}$	$2,082 \times 10^{-2}$
40	$1,15 \times 10^{-3}$	$0,60 \times 10^{-3}$	$0,61 \times 10^{-3}$	$2,231 \times 10^{-2}$	$2,084 \times 10^{-2}$	$1,938 \times 10^{-2}$

A comparação dos fluidos simulacros quanto aos combustíveis, relativa à viscosidade absoluta, encontra-se na Figura 4.9 e mostra a proximidade maior do EXXSOL D60 com o etanol combustível e do EXXSOL D40 com os dois tipos de gasolinas.

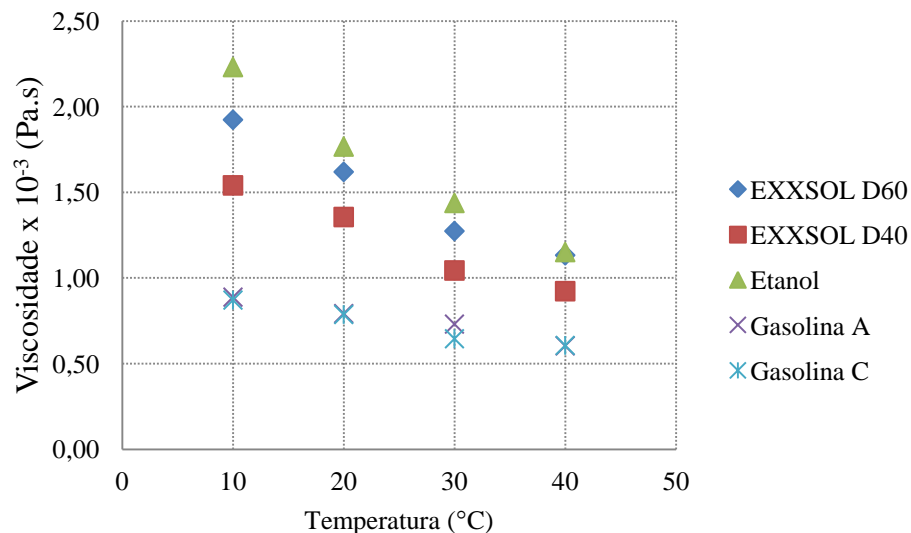


Figura 4.9 – Comparação dos fluidos simulacros EXXSOL D60 e EXXSOL D40 com o etanol, a gasolina A e a Gasolina C.

Para os testes estáticos, foi utilizada uma rotação simulada de 2400 RPM com *duty cycle* de 3%. Essas configurações foram colocadas como parâmetros de entrada em um módulo eletrônico Motec M400 associado com um módulo da Magneti Marelli capaz de fornecer as correntes elétricas necessárias para a operação do injetor. Assim em um período total de 50 milissegundos durante 3% ou 1,5 milissegundos, o injetor descarrega o fluido de teste na atmosfera da câmara de acrílico, alternando esse tempo com 48,5 milissegundos de injetor fechado, operando em forma de pulsos de injeção. O tempo de 50 milissegundos corresponde a um ciclo ou duas rotações. A frequência de injeção foi, portanto, de 1200 injeções por minuto.

Seis diferentes pressões de injeção foram testadas: 30 bar, 50 bar, 70 bar, 90 bar, 100 bar e 110 bar. As injeções ocorreram dentro de uma câmara retangular de acrílico, com pressão atmosférica e aberta na parte inferior para escoamento e descarte dos simulacros. Na parte superior da câmara foi instalado um flange para fixação do injetor. Uma escala angular de 0 até 180° foi também fixada ao flange para controle da posição da filmagem do *spray*. A Figura 4.10 mostra o flange com a escala angular criada.

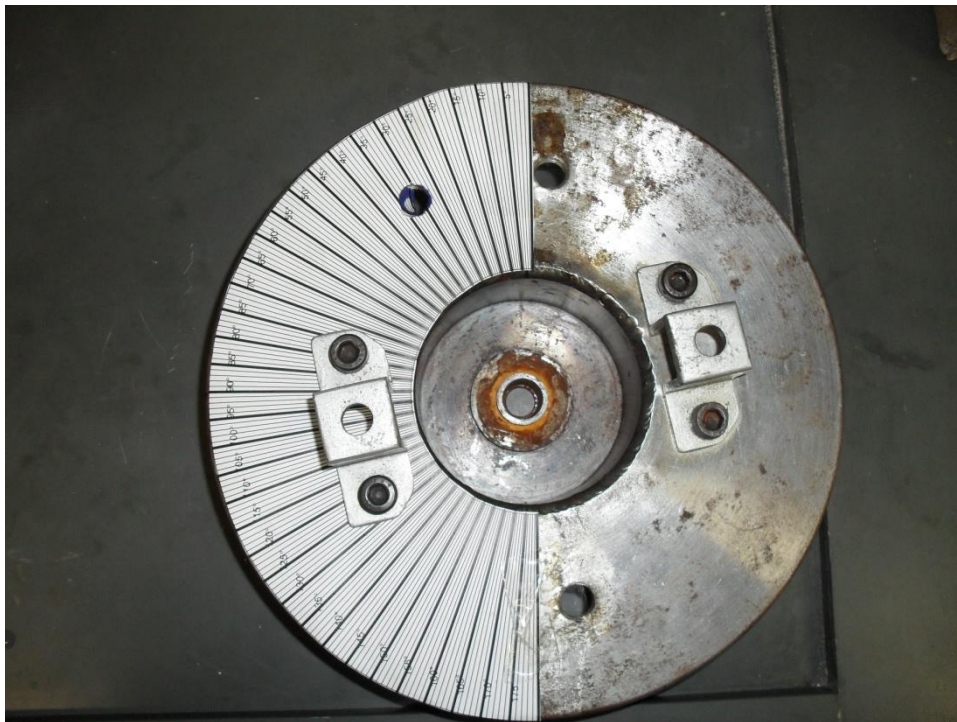


Figura 4.10 – Flange superior da câmara de acrílico com escala angular para medição do ângulo de observação.

O injetor foi posicionado no flange de forma que seu conector elétrico coincidissem com a posição 0° da escala e a câmera de alta frequência foi posicionada a 90° dessa referência. O esquema da Figura 4.11 mostra a orientação do injetor nessas condições com o ponto de referência da observação situado na câmera de alta frequência.

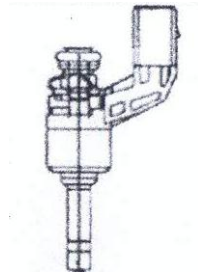


Figura 4.11 – Orientação do injetor visto da posição da câmera de alta frequência de filmagem.

Um vaso de pressão rígido, mostrado na Figura 4.12, foi utilizado para armazenamento dos fluidos testados. Um cilindro de nitrogênio conectado através de uma mangueira à parte superior do vaso foi utilizado para pressurização. A pressão de injeção foi controlada através de uma válvula no cilindro de nitrogênio. Uma mangueira conectada na parte inferior do vaso da Figura 4.12 conduziu os fluidos armazenados até o injetor.

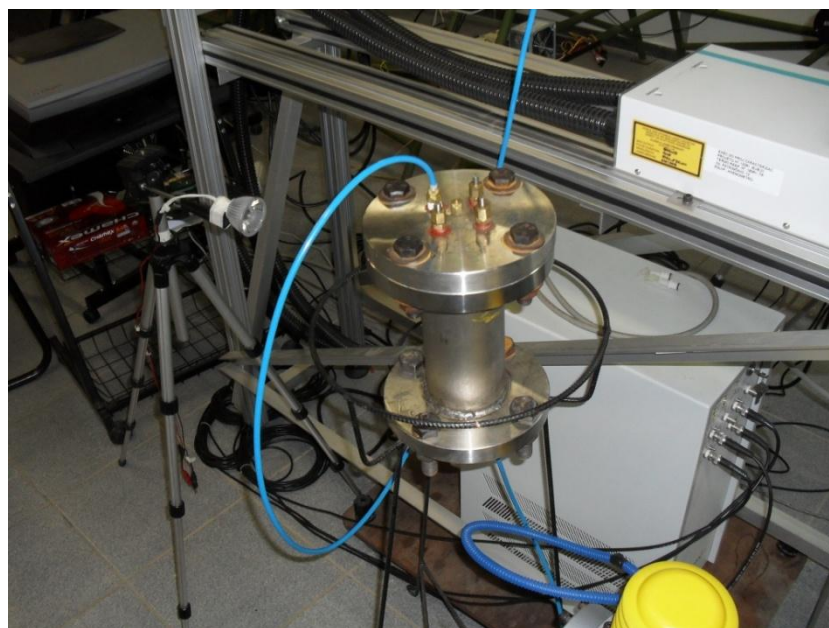


Figura 4.12 – Vaso de pressão utilizado nos testes para armazenamento e pressurização dos fluidos.

Uma vista esquemática para a bancada de testes para a análise experimental das injeções em condições estáticas está na Figura 4.13.

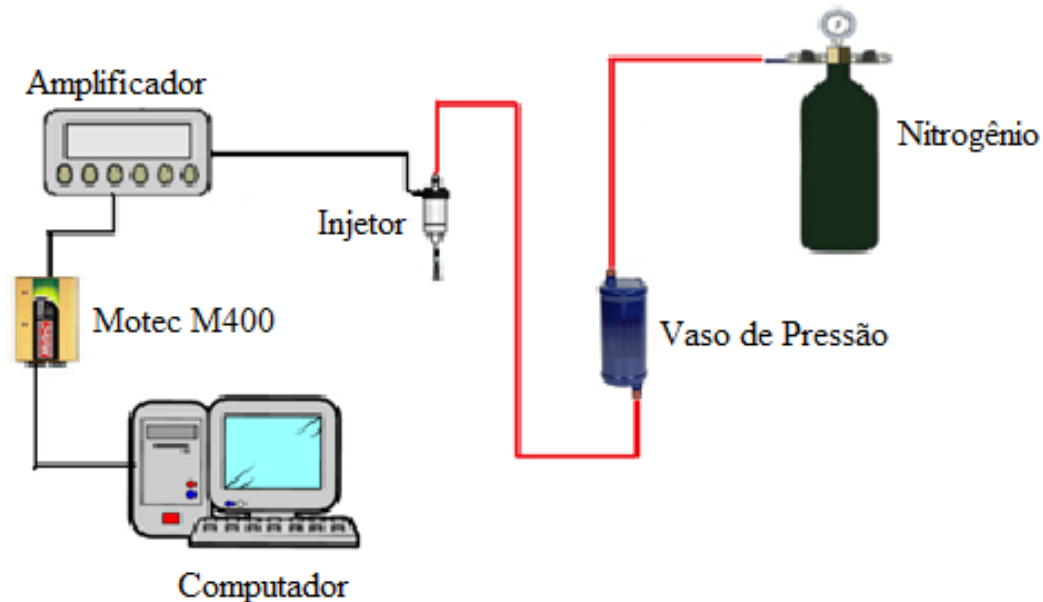


Figura 4.13 – Componentes da configuração experimental para as injeções em condições estáticas.

Dois diferentes tipos de imagens foram obtidos com os testes. O primeiro tipo com a câmera mais próxima do injetor para as medições dos ângulos de cone em pequenas distâncias do orifício e o segundo tipo obtido com a câmera mais afastada para obtenção da penetração, das bordas e dos volumes dos *sprays*. Exemplos de imagens dos dois tipos estão na Figura 4.14 (a) para as filmagens próximas do injetor e Figura 4.14 (b) para as filmagens mais afastadas do injetor. As imagens (a) e (b) da Figura 4.14 são referentes à injeção de EXXSOL D60 a 100 bar e aproximadamente a 1,15 milissegundos após o início da injeção ainda sem o tratamento inicial de três etapas explicado no item 4.1.

Para obtenção de uma descrição completa das bordas do *spray*, da penetração e do seu volume faz-se necessário localizar a posição da parte inferior do *spray* e assim a filmagem mais distante é conveniente para estudo desses parâmetros. Quanto ao ângulo de cone, o interesse maior é no ângulo próximo ao orifício do injetor, assim a filmagem próxima torna-se conveniente para essa finalidade.

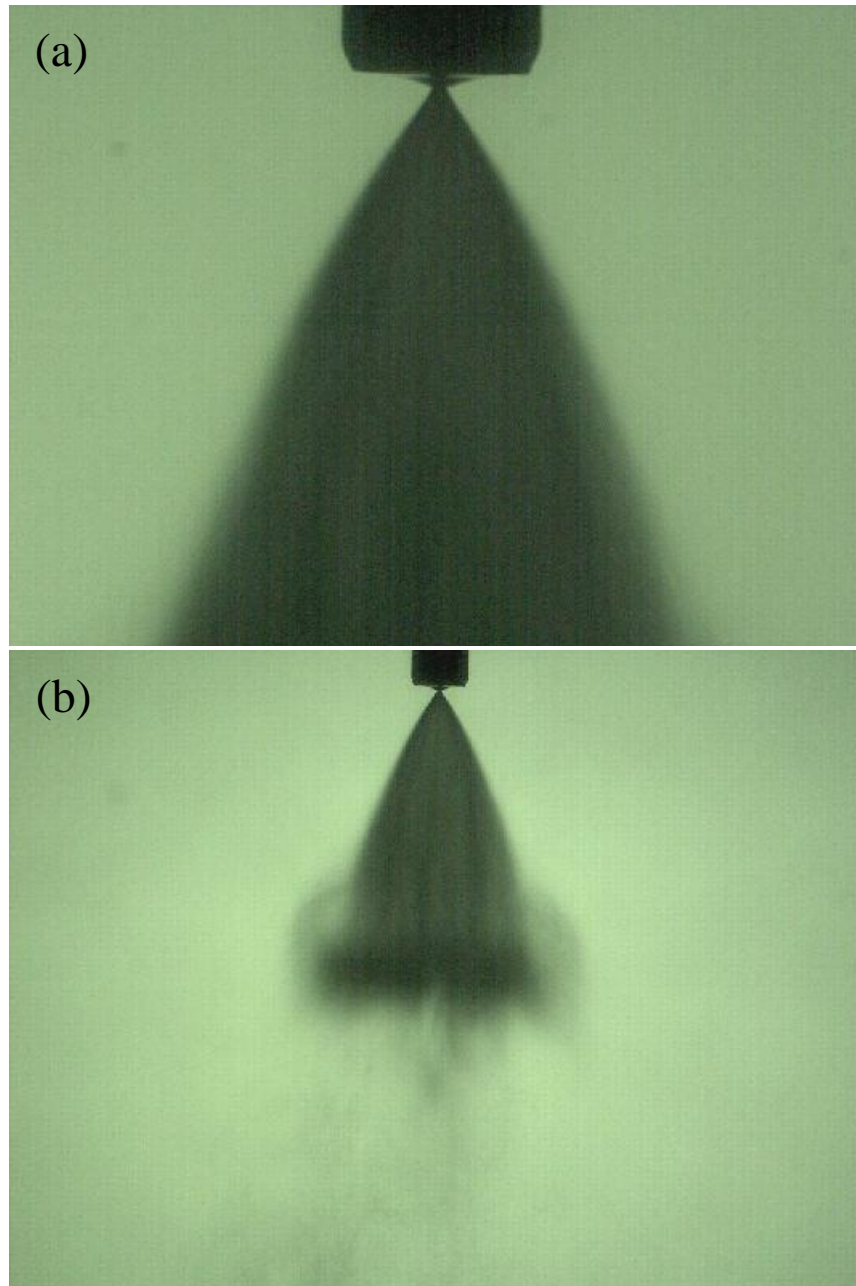


Figura 4.14 – Resultado da filmagem (a) próxima com fator de escala equivalente a 249,3 pixels/cm e (b) distante do injetor com fator de escala equivalente a 72,7 pixels/cm.

4.1.2 Injeções em condições dinâmicas

Para a análise da injeção em condições dinâmicas, foi utilizado um motor monocilíndro de pesquisa com acesso óptico, modelo AVL 5406, mostrado na Figura 4.15. O motor faz parte da infraestrutura do Centro de Tecnologia da Mobilidade e possui uma camisa de quartzo que

permite a visualização dos processos internos no cilindro do motor. O motor está acoplado a um dinamômetro ativo capaz de controlar a sua rotação. Algumas das especificações do motor estão resumidas na Tabela 4.3.

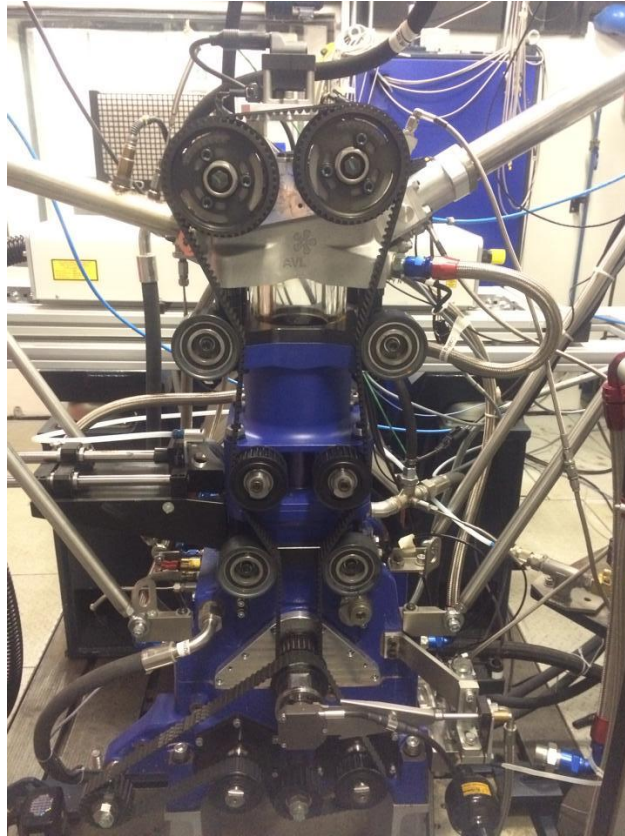


Figura 4.15 – Motor monocilindro com acesso óptico de pesquisa modelo AVL 5406 do Centro de Tecnologia da Mobilidade (CTM) da UFMG.

Tabela 4.3 – Algumas Especificações do Motor monocilindro de Pesquisa.

Modelo	AVL 5406
Tipo	Monocilindro com acesso óptico
Diâmetro do Pistão	82 mm
Curso do Pistão	86 mm
Comprimento da Biela	144 mm
Razão de Compressão	9:3:1
Número de válvulas	4

Alguns trabalhos publicados em congressos como GUZZO et al., 2014 e DA COSTA et al., 2015 foram realizados no Centro de Tecnologia da Mobilidade utilizando esse motor.

A injeção direta desse motor é realizada através de um injetor Bosch com sete orifícios. A Figura 4.16 mostra o injetor e o detalhe da sua parte inferior com os sete orifícios.



Figura 4.16 – Injetor de injeção direta Bosch se sete orifícios (modelo 0261500073) utilizado no motor de acesso óptico.

A câmera foi fixada de modo a capturar imagens da sombra da injeção do etanol, com o motor funcionando sem combustão. A iluminação contínua alimentada por uma bateria de 12 Volts ficou situada na posição oposta à câmera, da mesma forma esquematizada na Figura 4.1. A disposição do motor visto da posição da câmera é a mesma disposição mostrada na Figura 4.15, porém o foco de observação da câmera correspondeu somente à região da camisa de quartzo.

As injeções ocorreram no tempo de compressão do motor, com início no ângulo de 120° até o ângulo de 105° antes do ponto morto superior (APMS), abrangendo um intervalo de 15° de injeção. A penetração do *spray* de etanol e os ângulos de cone foram analisados para 1000 RPM, 2000 RPM e 3000 RPM com pressão de injeção de 100 bar. Nesta Tese o ângulo de virabrequim igual a zero correspondeu ao PMS de compressão. O tempo de compressão

compreendeu, portanto à faixa de -180° até 0° . Quando a menção do ângulo vir acompanhada da sigla (APMS) o ângulo será designado sem o sinal negativo. Assim a compressão no motor é iniciada em -180° de ângulo de virabrequim ou de forma equivalente em 180° APMS.

As imagens das injeções passaram pelo ajuste descrito no item 4.1 e em seguida foram processadas para a obtenção dos parâmetros referentes à localização das bordas, à penetração e ao ângulo de cone.

4.2 Bordas dos *sprays*

Para a medição automatizada das características macroscópicas dos *sprays* fez-se inicialmente necessário o desenvolvimento de uma metodologia de identificação das bordas.

O próprio MATLAB tem um conjunto de funções para detecção das bordas em imagens digitais. No entanto, para o melhor controle na obtenção dos dados e em coerência com as coordenadas espaciais definidas para a utilização das metodologias deste trabalho, tanto para posições na matriz (linha i e coluna j) quanto para as posições referidas a um sistema de coordenadas $x(\text{cm})$ e $y(\text{cm})$, optou-se pela programação de rotinas para a detecção e armazenamento de dados de posição das bordas, baseada no comportamento dos valores das intensidades dos pixels.

O primeiro passo da metodologia para identificação das bordas dos *sprays* é a escolha da origem de um sistema de coordenadas cartesiano para as imagens. Uma localização na imagem é associada ao ponto de posição $x = 0 \text{ cm}$ e $y = 0 \text{ cm}$.

O centro do pixel na extremidade superior esquerda da imagem foi escolhido para localizar a origem de um sistema de coordenadas cartesiano com valores positivos de x para a direita e valores negativos de y para baixo. A Figura 4.17 mostra a localização desse sistema em uma imagem obtida da injeção de EXXSOL D60 a 100 bar para um instante aproximado de 1,15 milissegundos após o início da injeção. A origem está situada no pixel da linha $i = 1$ e coluna $j = 1$.

Com a definição do sistema de coordenadas, os centros de todos os demais pixels da imagem ficam associados a um par de coordenadas $x(\text{cm})$ e $y(\text{cm})$ que são calculados utilizando a

densidade de resolução DR em pixels/cm. O cálculo das posições x_j e y_i para o centro do pixel situado na i -ésima linha e j -ésima coluna, são obtidos pelas Equações (4.1) e (4.2).

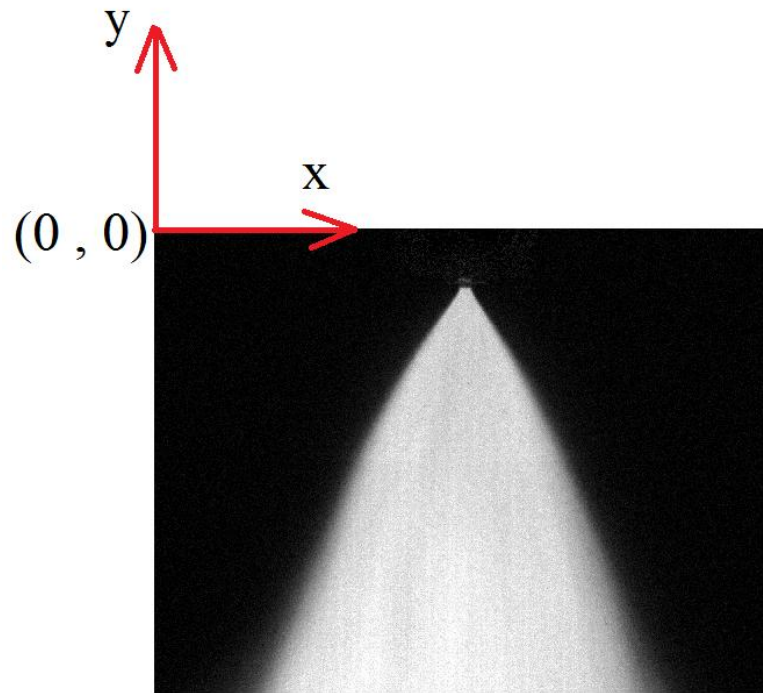


Figura 4.17 – Escolha da origem do sistema de coordenadas para as imagens da Injeção dos fluidos de teste.

$$y_i = \frac{(1 - i)}{DR} \quad i = 1, 2, 3, \dots, 600 \quad (4.1)$$

$$x_j = \frac{(j - 1)}{DR} \quad j = 1, 2, 3, \dots, 800 \quad (4.2)$$

Os numeradores das Equações (4.1) e (4.2) representam respectivamente o negativo da distância em linhas e a distância em colunas dos pixels da imagem ao pixel tomado como origem do sistema de coordenadas.

Para a identificação das bordas dos *sprays* o procedimento adotado foi a análise dos perfis lineares das intensidades dos *pixels*. O MATLAB permite a obtenção manual deste tipo de perfil. No entanto, para melhor controle do posicionamento do perfil na imagem, para

assegurar a sua exata direção horizontal ou vertical e para a obtenção dos perfis de maneira automatizada e em diferentes posições, mais uma vez, optou-se pela criação das rotinas computacionais deste trabalho.

A Figura 4.18 (a) e (b) mostra exemplos de três desses perfis onde as intensidades dos pixels foram coletadas para as posições $y = -0,25$ cm, $y = -0,50$ cm e $y = -0,75$ cm da matriz da coluna 1 até a coluna 800. As linhas brancas horizontais na imagem mostram a localização dos pixels e os valores originais das intensidades estão no gráfico da Figura 4.18 (b).

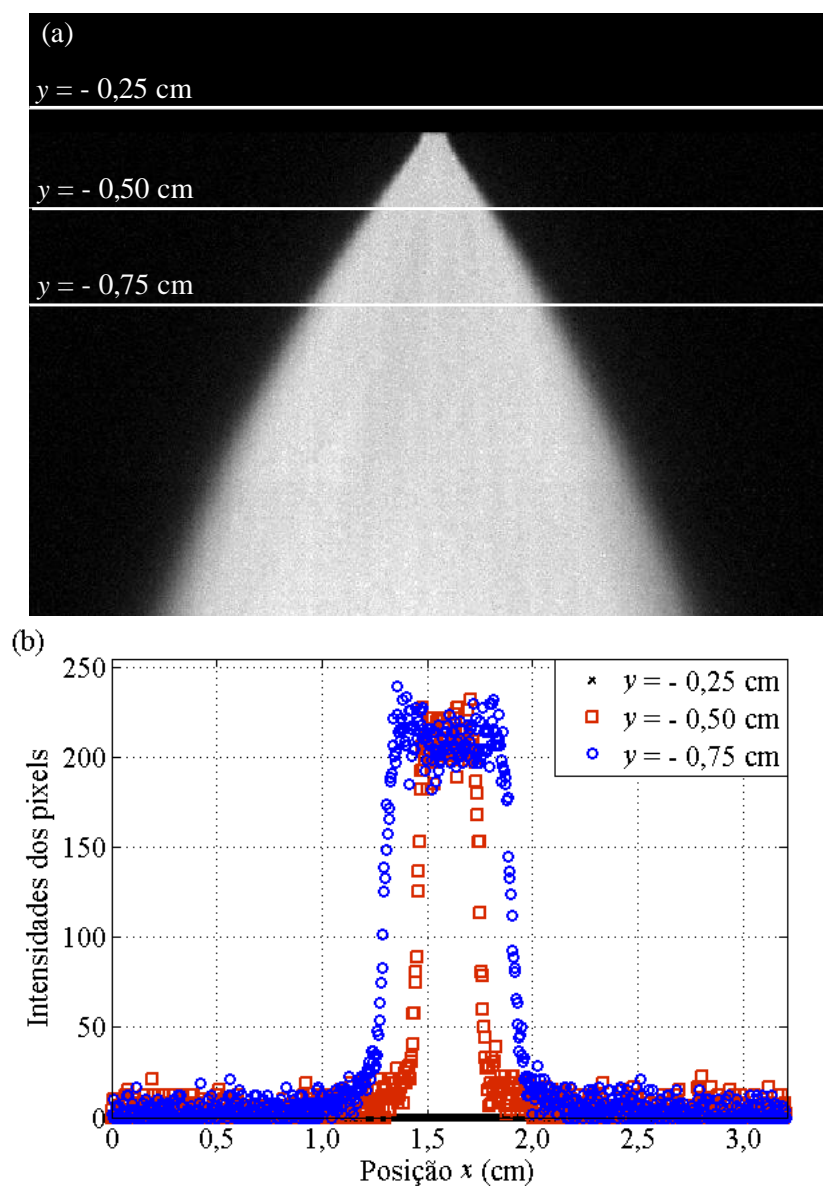


Figura 4.18 – (a) Imagem do *spray* de EXXSOL D60 e (b) representação gráfica de três perfis horizontais de intensidades de pixels para a identificação da posição das bordas do *spray* em termos das coordenadas de posição x (cm) e y (cm).

Na Figura 4.18 (b) as intensidades dos pixels na imagem estão traçadas em função da distância horizontal da posição de cada pixel até a extremidade esquerda da imagem ou de forma equivalente, em função da posição $x(\text{cm})$ do pixel.

Analisando a Figura 4.18 percebe-se que quando o pixel considerado está fora do *spray* o seu valor de intensidade é baixo e quando está dentro do *spray* o seu valor de intensidade é maior. Existe também uma região onde os dados estão dispostos quase verticalmente configurando as regiões das bordas para a transição do escuro para o claro. Com base nessa observação um critério baseado em um valor de corte de intensidade de pixel localiza a posição das bordas do *spray* quando este valor estiver na região de transição.

Através desse critério, escolhendo como 60 o valor de corte, as considerações realizadas são que os pixels fora do *spray*, ou na parte escura da imagem possuem intensidades menores que esse valor. Pixels com valores de intensidades maiores que 60 estarão localizados na região de *spray*, ou na parte mais clara da imagem e pixels com os valores próximos a 60 estarão próximos às bordas. A Tabela 4.4 mostra a localização das posições x para a borda direita e para a borda esquerda através dos três perfis da Figura 4.18. No primeiro perfil horizontal analisado onde $y = -0,25$ cm não existe valor de intensidade maior ou igual a 60 de forma que nenhuma borda é identificada. Este perfil claramente não passa pela região de *spray* como pode ser observado na Figura 4.18.

Tabela 4.4 – Identificação das bordas dos *sprays* para três perfis horizontais.

$y(\text{cm})$	Borda Esquerda $x(\text{cm})$	Borda Direita $x(\text{cm})$
- 0,25	----	----
- 0,50	1,44	1,77
- 0,75	1,27	1,93

Observando os perfis mostrados na Figura 4.18, se for trocado o valor de corte de 60 para 100 ou mesmo para 150, por exemplo, a mudança na identificação da posição das bordas seria pequena visto que nas regiões próximas delas, a disposição dos dados das intensidades dos pixels é quase vertical, indicando uma brusca variação em um intervalo de distância horizontal pequeno. Os valores 60, 100 e 150 ocorrem para pixels que já estão dispostos quase em uma direção vertical no perfil da Figura 4.18 e, portanto, na região das bordas.

Em alguns casos, no entanto, principalmente nas filmagens com a câmera mais afastada do injetor, existem imagens com partes do *spray* onde as regiões escuras e as regiões claras possuem diferenças menos bruscas de intensidades devido à baixa concentração de líquido. Por esse motivo, optou-se por escolher o menor valor de corte possível para identificar a maior região para o *spray*. O valor de corte de 60 foi o escolhido com base nesse critério. Ele foi obtido através de vários testes com valores de corte diferentes. Valores abaixo de 60 começaram a levar em consideração os ruídos das imagens na identificação das bordas, sendo, portanto inadequados.

Os valores das intensidades dos pixels são verificados começando da extremidade esquerda do perfil, a partir da coluna 1 da matriz e aumentando a distância horizontal $x(\text{cm})$, até encontrar um valor igual ou maior que o valor de corte. Assim que um valor igual ou maior que 60 é identificado, a posição $x(\text{cm})$ do pixel é armazenada e associada à borda esquerda do *spray*. O mesmo procedimento é realizado começando da extremidade direita da imagem a partir da coluna 800 e diminuindo a distância horizontal progressivamente, percorrendo os valores dos pixels até encontrar um valor maior ou igual a 60 para a localização da borda direita. Nesta etapa as posições x_{jd} e x_{je} das bordas direita e esquerda, são determinadas e a elas são associadas à ordenada y correspondente. Os subscritos jd e je nas posições x indicam respectivamente as colunas das localizações das bordas direita e esquerda.

O procedimento é realizado percorrendo linha por linha em toda a resolução da imagem desde a linha 1 em que a ordenada da posição é y_1 , até a última linha da matriz da imagem de posição y_{600} . Para todas as linhas onde existe o *spray*, a borda esquerda (x_{jd} , y_j) e direita (x_{je} , y_j) são identificadas.

Por fim, 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 e várias informações podem ser calculadas com os dados armazenados. A Figura 4.19 (a) e (b) mostra um exemplo da identificação das bordas de um *spray* de EXXSOL D60, injetado a 100 bar para um instante aproximado de 1,15 milissegundos após o início da injeção. A Figura 4.19 (a) mostra a imagem com a marcação de pixels brancos no local de identificação das bordas enquanto a Figura 4.19 (b) mostra a representação gráfica dos dados de posição $x(\text{cm})$ e $y(\text{cm})$ das bordas.

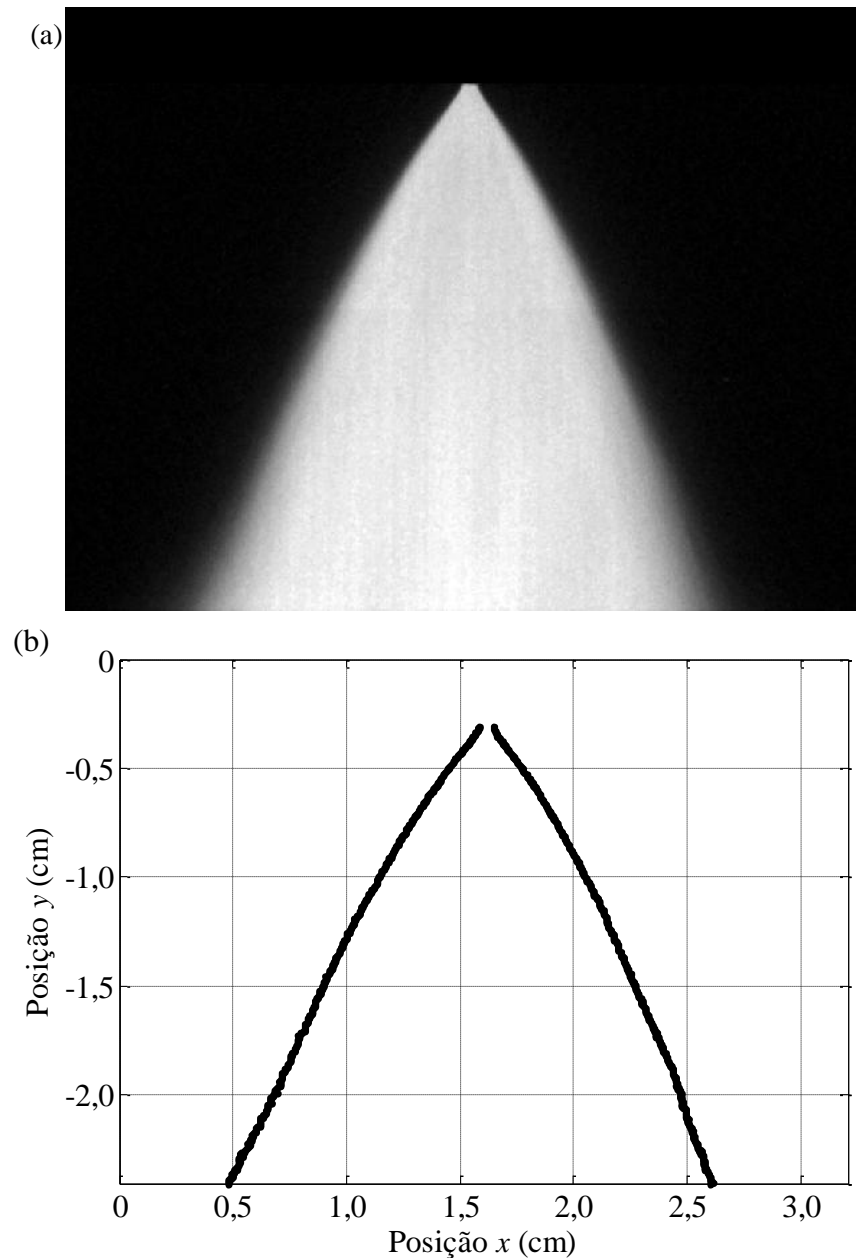


Figura 4.19 – Identificação das bordas de um *spray* de EXXSOL D60 injetado a 100 bar para 1,15 ms após o início da injeção.

No caso das imagens obtidas próximas do orifício do injetor os perfis horizontais são capazes de identificar a geometria geral do *spray*. A análise através dos perfis verticais também foi realizada para obter uma base de dados mais completa e ela torna-se conveniente para o caso das imagens mais afastadas, pois nelas o *spray* não ocupa totalmente a janela de observação. Nas imagens afastadas o *spray* possui uma borda inferior e não apenas as bordas direita e esquerda como mostrado na Figura 4.19. A borda inferior é mais bem identificada pelos perfis verticais.

Também para o caso das imagens com a câmera mais afastada ou com densidade de resolução menor, as medições foram realizadas a partir do tempo de 0,38 milissegundos que é correspondente ao terceiro quadro de imagem após o início da injeção. As duas primeiras imagens não entraram na análise por dois motivos. O primeiro porque bem no início da injeção, não existe uma distinção entre *pré-spray* e *spray* principal, o que existe é uma predominância do *pré-spray*. As medições de características realizadas sobre todo o intervalo de tempo de injeção iniciaria as medidas sobre o *pré-spray*. O *spray* principal e o *pré-spray* possuem características bem distintas, como já relatado em WIGLEY et al., 2004. O segundo motivo de não se utilizar as duas primeiras imagens, é que o processo de ajuste de histograma quando a imagem possui pouca quantidade de líquido produz imagens com muitos ruídos dificultando assim a análise.

Os dados das bordas são armazenados computacionalmente em matrizes multidimensionais conforme representado nas equações (4.3) e (4.4) para o caso específico das posições x_d e y_d da borda direita e testes estáticos deste trabalho.

$$x_d = x_d(k, c, l, n) \quad (4.3)$$

$$y_d = y_d(k, c, l, n) \quad (4.4)$$

Os índices k e c se referem às camadas de matrizes bidimensionais onde a linha k se refere à posição x ou y da borda e a coluna c ao tempo após o início da injeção. A terceira dimensão das matrizes l é um índice que se refere à pressão de injeção e vai de um até seis para designar respectivamente as pressões de 30, 50, 70, 90, 100 e 110 bar. A quarta dimensão se refere ao número do experimento. Para as cinco injeções analisadas em cada pressão, n varia de 1 até 5.

Para os testes dinâmicos o índice l referente à pressão de injeção não existe, pois, a pressão de injeção foi fixada no valor único de 100 bar e assim as matrizes são tridimensionais com n variando de 1 até 3 para designar cada uma das três injeções em cada condição de rotação do motor.

4.3 Penetração

São duas as metodologias da Tese para medir as penetrações dos *sprays* de cone oco. A primeira através da penetração vertical máxima ou penetração da extremidade que leva em consideração todo o *spray*. A segunda metodologia se refere à penetração do diâmetro máximo e diz respeito somente ao *spray* principal, pois elimina o efeito do pré-*spray*. Ambas as metodologias utilizam imagens das filmagens com a câmera mais afastada do injetor.

4.3.1 Penetração vertical máxima

A metodologia para avaliação da penetração vertical máxima ou penetração da extremidade do *spray* neste trabalho consistiu na observação de imagens sucessivas correspondentes ao início da injeção.

Com todos os dados de identificação das bordas, determinadas pela metodologia do item 4.2, calculou-se a diferença entre o máximo valor de posição y com o mínimo valor de posição y encontrado. O máximo valor y ocorre próximo do 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*.

A Figura 4.20 (a) mostra uma imagem da injeção de EXXSOL D60 a 100 bar e aproximadamente a 1,31 milissegundos após início da injeção. Os dados das posições das bordas encontram-se no gráfico da Figura 4.20 (b).

Para a Figura 4.20 o máximo valor y encontrado foi de - 0,51 cm próximo do orifício do injetor enquanto o mínimo valor y encontrado foi de - 6,06 cm. Assim a penetração vertical máxima para o tempo específico de 1,31 milissegundos da imagem, obtida subtraindo valor mínimo do valor máximo é 5,55 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 ser construído.

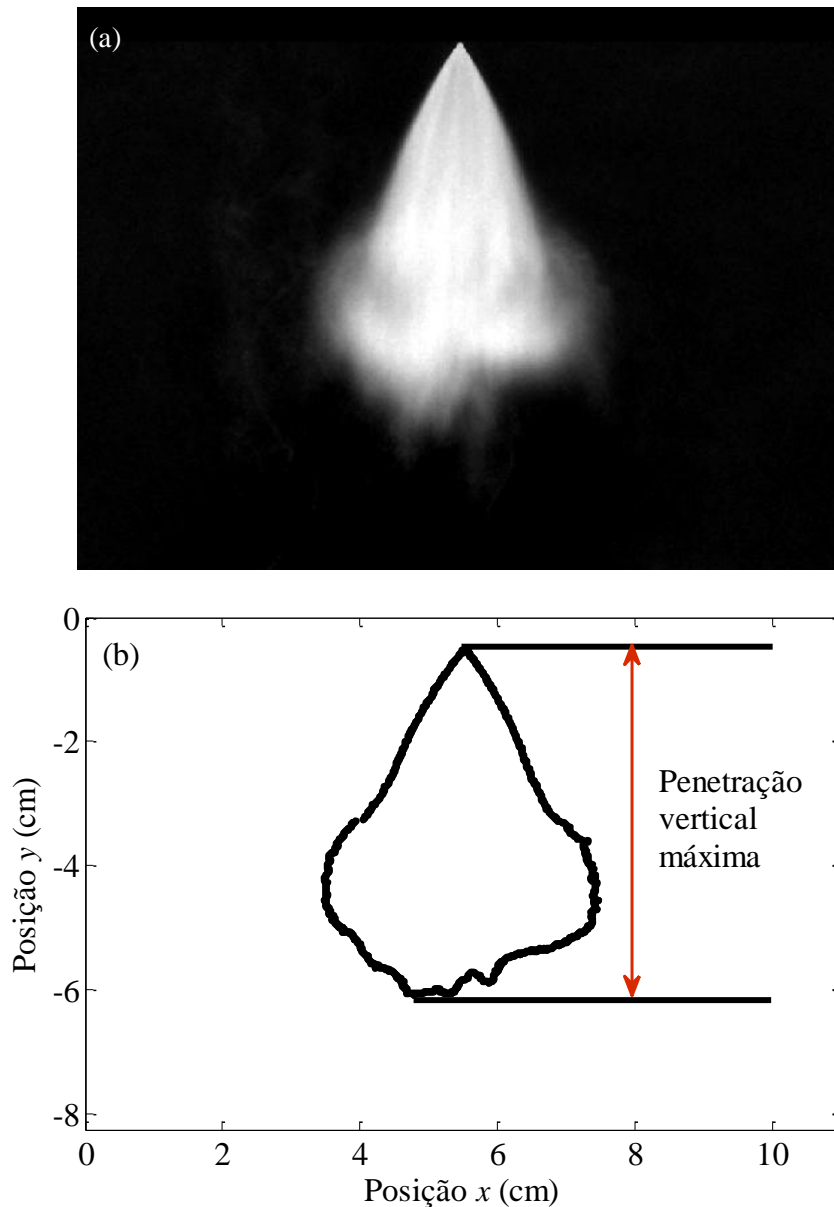


Figura 4.20 – Imagem da injeção de EXXSOL D60 e a identificação das bordas em um gráfico posição y por posição x .

No trabalho de GUZZO, 2012, foram obtidas as penetrações dos *sprays* injetados a baixa pressão (7 bar) através de um injetor de injeção direta de modelo diferente do presente trabalho, mas de forma manual, pela medição direta nas imagens obtidas das filmagens. A Figura 4.21 ilustra o procedimento com uma medida de distância em pixels. Para fazer a conversão em centímetros, foi utilizado o fator de escala de resolução em pixels por centímetros da imagem.

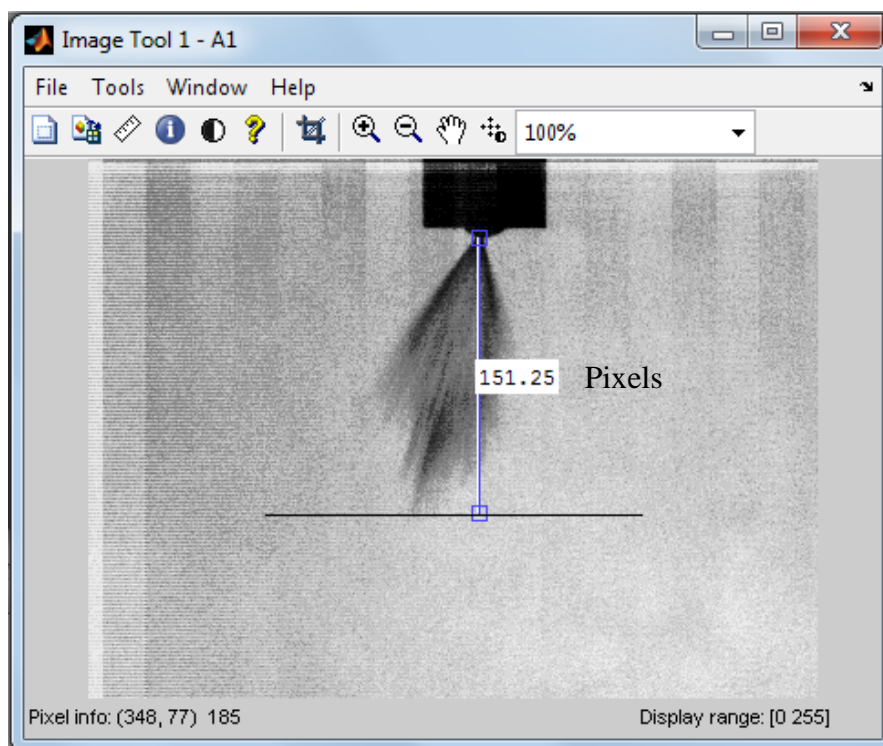


Figura 4.21 – Penetração obtida de forma manual por meio de medição de distância em pixels. FONTE: (GUZZO, 2012).

A nova metodologia descrita no presente trabalho representa uma melhoria na sistematização das medições ao estabelecer um critério único através do valor de corte na intensidade do pixel para localização da extremidade e assim eliminar certa subjetividade da medição realizada manualmente.

A Figura 4.22 mostra um exemplo do resultado de uma injeção a 100 bar de EXXSOL D60 obtido pela metodologia aqui proposta.

A Figura 4.22 representa a penetração medida em apenas uma injeção. No entanto, no item 5.1.3 serão apresentados os resultados médios da penetração para cinco diferentes injeções em todas as pressões testadas.

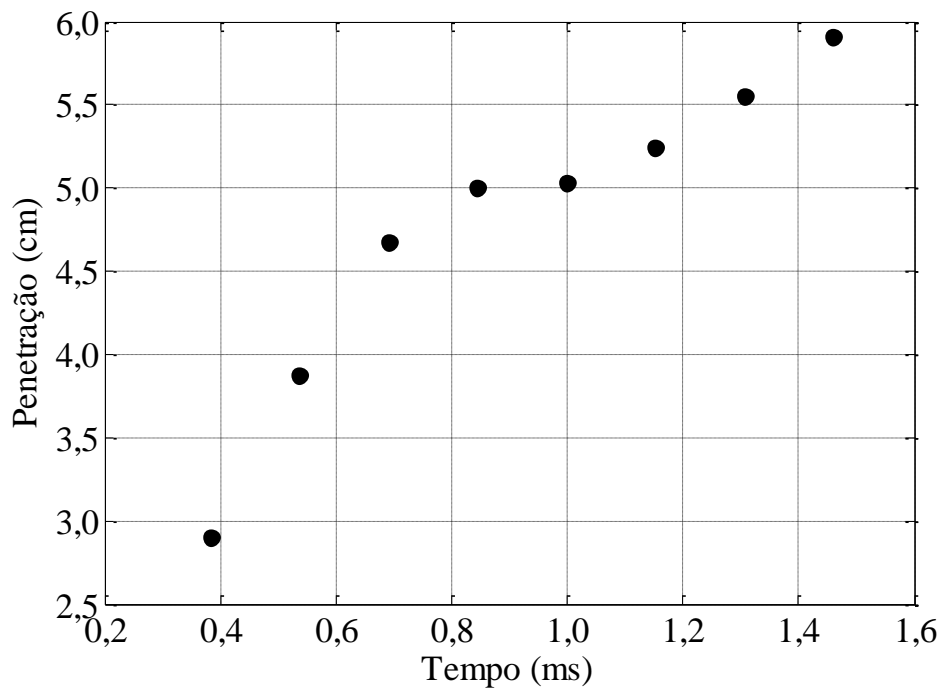


Figura 4.22 – Penetração calculada com base nos dados das bordas para a injeção de EXXSOL D60 na pressão de 100 bar.

4.3.2 Penetração do diâmetro máximo dos *sprays*

No item 4.3.1 com os dados de posição y das bordas foi possível medir automaticamente a penetração vertical máxima do *spray*. Todos os valores de posição y das bordas foram analisados para cada instante de tempo para selecionar os valores mínimo e máximo. Para achar o diâmetro máximo dos *sprays*, fez-se necessário aplicar procedimento semelhante para os dados de posição x .

O diâmetro do *spray* como definido para este trabalho correspondeu às distâncias entre as bordas direita e esquerda para uma mesma posição y . Como exemplo, o comprimento do segmento de reta horizontal traçado entre as bordas do *spray* da Figura 4.23 para a injeção de EXXSOL D60 a 100 bar e 1,15 milissegundos após início da injeção representa o diâmetro do *spray* para a posição vertical $y = -4$ cm.

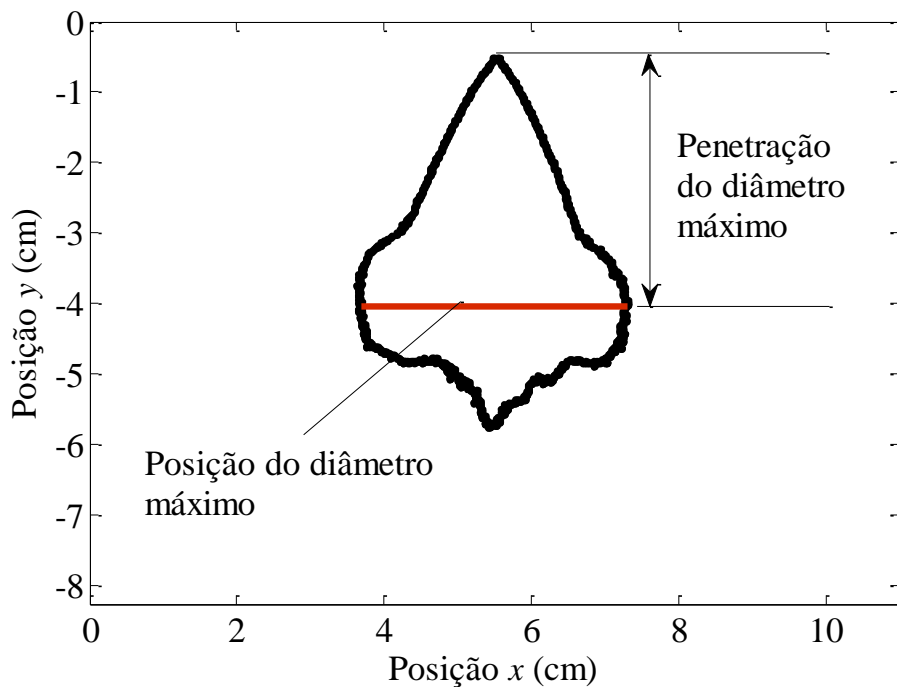


Figura 4.23– Segmento de reta mostrando o diâmetro máximo do *spray* na posição $y = -4$ cm e a penetração do diâmetro máximo definida neste trabalho.

Na Figura 4.23 o segmento de reta horizontal foi traçado em uma posição onde supostamente estaria o diâmetro máximo. Também pode ser verificado pela figura que a posição vertical do vértice do *spray* está próxima de $-0,5$ cm. Se essas suposições estiverem corretas, a penetração do diâmetro máximo para o momento específico da injeção da Figura 4.23 de 1,15 milissegundos corresponderia à subtração da posição do vértice com a posição do máximo diâmetro, que neste caso seria de 3,5 centímetros.

A rotina computacional criada no MATLAB calcula todas as diferenças da posição x das bordas direitas com as posições x das bordas esquerdas. Os valores dos diâmetros em todo o *spray* e a posição y exata do diâmetro máximo são então determinados. Assim a análise não fica baseada em apenas suposições.

Imagens dos *sprays* em instantes sucessivos são analisadas da mesma forma e assim é possível verificar a penetração do diâmetro máximo em função do tempo.

Uma comparação entre os dois fluidos de teste foi realizada com base na penetração do diâmetro máximo.

4.3.3 Correlações para a penetração do diâmetro máximo

Com o intuito de encontrar correlações preditivas para as penetrações dos *sprays*, procedeu-se primeiramente à obtenção de grupos adimensionais. As correlações foram obtidas a partir dos adimensionais utilizando os dados experimentais. Parâmetros medidos ou calculados como a penetração do diâmetro máximo S , a velocidade de saída do fluido do injetor V_0 ou a velocidade V_p das partículas obtidas pela técnica LDA do trabalho de (JÚNIOR; BARROS; HUEBNER, 2013) e dados de propriedades físicas dos fluidos testados como a massa específica, a tensão superficial e a viscosidade absoluta foram utilizados. O diâmetro do orifício do injetor D_0 , o diâmetro médio D_{10} e o diâmetro de Sauter D_{32} foram tomados como comprimentos característicos. Os diâmetros médios e de Sauter e as velocidades das gotículas foram obtidos em trabalho anterior (JÚNIOR; BARROS; HUEBNER, 2013) nas mesmas pressões testadas para este trabalho. Essas medições foram realizadas a 8 mm (14,3 diâmetros de orifício) de distância vertical do orifício do injetor. Cada comprimento característico foi utilizado separadamente para a obtenção de uma correlação.

O teorema PI de Buckingham determina a quantidade de números adimensionais que podem ser obtidos de um conjunto de parâmetros dimensionais. Uma metodologia para a obtenção desses números está detalhada em FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2014, e será a mesma utilizada na presente Tese.

A penetração do *spray* S tem possível dependência com um comprimento característico D , a massa específica do líquido ρ , a viscosidade absoluta do líquido μ , a tensão superficial σ , a velocidade V , a pressão de injeção ΔP e o tempo após o início da injeção t . Essa dependência está mostrada na Equação (4.5). A massa específica da atmosfera gasosa onde os *sprays* são injetados também possui influência na penetração, no entanto, a inclusão de tal parâmetro formaria um adimensional dado pela razão das massas específicas do líquido e do gás. Para os experimentos realizados somente em pressão ambiente atmosférica, existiriam apenas dois valores para tal razão. Um valor para cada fluido de teste.

$$S = S(D, \rho, \mu, \sigma, V, \Delta P, t) \quad (4.5)$$

A Equação (4.5) mostra que são oito os parâmetros de interesse: S , D , ρ , μ , σ , V , ΔP e t . As unidades de todos eles podem ser escritas como combinações das unidades das dimensões primárias de massa [M], comprimento [L] e tempo [t]. A Tabela 4.5 mostra as dimensões de todos os parâmetros envolvidos na análise.

Tabela 4.5 – Símbolos e dimensões de todos os parâmetros dos testes.

Parâmetro	Símbolo	Dimensão
Penetração	S	[L]
Comprimento Característico	$D_0, D_{10}, \text{ ou } D_{32}$	[L]
Massa Específica	ρ	[M/L ³]
Viscosidade Absoluta	μ	[M/(Lt)]
Tensão Superficial	σ	[M/t ²]
Velocidade	$V_0 \text{ ou } V_p$	[L/t]
Pressão de injeção	ΔP	[M/(Lt ²)]
Tempo após injeção	t	[t]

Por meio das dimensões da Tabela 4.5 a matriz dimensional da Tabela 4.6 é construída.

Tabela 4.6 – Matriz dimensional para os testes realizados.

	S	D	ρ	μ	σ	V	ΔP	t
[M]	0	0	1	1	1	0	1	0
[L]	1	1	-3	-1	0	1	-1	0
[t]	0	0	0	-1	-2	-1	-2	1

O próximo passo é escolher um subconjunto de parâmetros contendo todas as dimensões primárias, chamados parâmetros repetentes. O número de elementos desse subconjunto deve ser igual ao posto da matriz dimensional e geralmente é igual à quantidade de dimensões primárias necessárias para caracterizar as unidades de todos os parâmetros. Considerando o Sistema Internacional de Unidades, três dimensões caracterizam todos os parâmetros da Tabela 4.5 e três também é o posto da matriz dimensional da Tabela 4.6. Uma análise dimensional onde o posto da matriz é diferente do número de dimensões primárias envolvidas no problema é encontrada no Exemplo 4.3 de FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2014.

Uma forma de atender ao requisito de inclusão de todas as dimensões primárias em três parâmetros é selecionar o comprimento característico D , a massa específica ρ , e a velocidade

do *spray* V como parâmetros repetentes. Os parâmetros S , μ , σ , ΔP e t restantes são combinados separadamente com o conjunto selecionado para formar os grupos adimensionais. A Equação (4.6) mostra a combinação dos parâmetros repetentes com a penetração S para formar o primeiro adimensional Π_1 .

$$\Pi_1 = \rho^a \cdot V^b \cdot D^c \cdot S \quad (4.6)$$

A partir da Equação (4.7) obtida substituindo as dimensões de ρ , V , D e S da Tabela 4.5 na Equação (4.6) monta-se o sistema constituído das Equações (4.8), (4.9) e (4.10) para calcular os expoentes x_1 , x_2 e x_3 de forma que Π_1 seja adimensional.

$$(M \cdot L^{-3})^{x_1} \cdot (L \cdot t^{-1})^{x_2} \cdot (L)^{x_3} \cdot (L)^1 = M^0 \cdot L^0 \cdot t^0 \quad (4.7)$$

$$\text{M:} \quad x_1 = 0 \quad (4.8)$$

$$\text{L:} \quad -3x_1 + x_2 + x_3 + 1 = 0 \quad (4.9)$$

$$\text{t:} \quad -x_2 = 0 \quad (4.10)$$

A resolução do sistema constituído das equações (4.8), (4.9) e (4.10) tem como resultados: $x_1 = 0$, $x_2 = 0$ e $x_3 = -1$. Substituindo esses valores na Equação (4.6) é obtido o primeiro número adimensional que consiste na razão da penetração S com o comprimento característico D mostrado na Equação (4.11).

$$\Pi_1 = \frac{S}{D} \quad (4.11)$$

A combinação dos parâmetros μ , σ e ΔP com o subconjunto selecionado leva à formação de conhecidos grupos adimensionais da mecânica dos fluidos representados respectivamente nas equações (4.12), (4.13) e (4.14).

$$\Pi_2 = Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (4.12)$$

$$\Pi_3 = We = \frac{\rho V^2 D}{\sigma} \quad (4.13)$$

$$\Pi_4 = \frac{Eu}{2} = \frac{\Delta P}{\rho V^2} \quad (4.14)$$

Nas equações (4.12), (4.13) e (4.14), Re é o número de Reynolds, We é o número de Weber e Eu é o número de Euler. Este último representa a razão das forças de pressão pelas forças de inércia. O último número adimensional Π_5 , mostrado na Equação (4.15), é encontrado combinando o subconjunto ρ, V, D com o tempo t após o início da injeção.

$$\Pi_5 = \frac{Vt}{D} \quad (4.15)$$

Cada valor de penetração medido experimentalmente foi associado ao conjunto de adimensionais $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4$ e Π_5 . Procurou-se obter uma relação de Π_1 em função dos demais números adimensionais conforme mostrado na Equação (4.16).

$$\frac{S}{D} = f\left(\frac{\rho VD}{\mu}, \frac{\rho V^2 D}{\sigma}, \frac{\Delta P}{\rho V^2}, \frac{Vt}{D}\right) \quad (4.16)$$

A forma da função f foi considerada como sendo dada pelo produto de potências dos adimensionais Π_2, Π_3, Π_4 e Π_5 conforme mostrado na Equação (4.17).

$$\frac{S}{D} = \left(\frac{\rho VD}{\mu}\right)^a \cdot \left(\frac{\rho V^2 D}{\sigma}\right)^b \cdot \left(\frac{\Delta P}{\rho V^2}\right)^c \cdot \left(\frac{Vt}{D}\right)^d \quad (4.17)$$

Foi aplicada a função logaritmo natural em ambos os lados da igualdade da Equação (4.17), para obter a Equação (4.18) que é linearizada para os expoentes dos números adimensionais. Dessa forma os valores de a , b , c e d podem ser obtidos por meio de uma regressão linear multivariável.

$$\ln\left(\frac{S}{D}\right) = a \cdot \ln(Re) + b \cdot \ln(We) + c \cdot \ln\left(\frac{Eu}{2}\right) + d \cdot \ln\left(\frac{Vt}{D}\right) \quad (4.18)$$

Para a obtenção do ajuste aos dados, a Equação (4.18) é reescrita na notação matricial conforme mostrado na Equação (4.19).

$$Y = M \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Na Equação (4.19), Y é um vetor coluna contendo todos os dados do logaritmo natural da razão da penetração pelo comprimento característico Π_1 , M é uma matriz contendo todos os logaritmos naturais dos adimensionais de Π_2 na primeira coluna, Π_3 na segunda coluna, Π_4 na terceira coluna e Π_5 na quarta coluna. Com seis pressões de injeção, oito medições de penetração em cada pressão e dois fluidos testados Y torna-se um vetor coluna com 96 elementos e M uma matriz de 96 linhas por quatro colunas. O vetor Y e a matriz M são os parâmetros de entrada para o comando *regress* do Matlab para regressão multivariável que fornece como saída os valores a , b , c e d .

Para o caso onde o comprimento característico consistiu no diâmetro do orifício do injetor a velocidade média de saída do fluido através do orifício V_0 foi considerada nos grupos adimensionais Π_2 , Π_3 , Π_4 e Π_5 . Tal velocidade é calculada pela expressão da Equação (4.20) através da razão entre a vazão volumétrica média Q e a área do anel de líquido que emerge do orifício.

$$V_0 = \frac{Q}{\pi h(D_0 - h)} \quad (4.20)$$

Na Equação (4.20) D_0 é o diâmetro do orifício e h é a espessura do anel do jato no orifício do injetor que pode ser obtida pela expressão da Equação (4.21) encontrada em LEFEBVRE 1989, para injetores do tipo *pressure-swirl*.

$$h = \left[\frac{D_0 \dot{m} \mu_L}{\rho_L \Delta P} \right]^{(1/4)} \quad (4.21)$$

Na Equação (4.21) ΔP e \dot{m} representam respectivamente a pressão de injeção e a vazão mássica média do injetor e ρ_L e μ_L representam a massa específica e a viscosidade absoluta do fluido injetado. Para os casos onde os comprimentos característicos consistiram nos diâmetros médios D_{10} e de Sauter D_{32} , as velocidades médias das partículas em cada pressão obtidas utilizando LDA foram utilizadas nos adimensionais Π_2 , Π_3 , Π_4 e Π_5 .

A correlação para o diâmetro máximo com comprimento característico D_0 foi testada para o caso de injeção de água que é um fluido com propriedades diferentes dos fluidos de teste EXXSOL D60 e EXXSOL D40.

4.4 Medição do volume dos *sprays*

Os volumes dos *sprays* foram caracterizados de duas formas distintas. A primeira pelo cálculo do volume total realizado numericamente por meio da soma dos volumes de pequenos discos em toda a extensão do *spray*. Os resultados são valores numéricos. A segunda metodologia de cálculo não se refere ao volume total, se refere à parte do volume que é mais próxima do orifício do injetor, até uma distância de 2,1 cm. Os resultados da segunda metodologia são equações que mostram o volume acumulado do *spray*, desde o injetor até a distância axial x' .

4.4.1 Calculo do volume total através de elementos cilíndricos

Os dados de localização das bordas também permitiram a medição do diâmetro e do volume dos *sprays*. A Figura 4.24, por exemplo, mostra uma sequência referente à identificação das

bordas de um *spray* de EXXSOL D60 para a pressão de 100 bar obtida da filmagem de alta frequência. Os dados de posição x e de posição y das bordas direita e esquerda, identificadas pelos perfis horizontais, foram traçados no gráfico. Na legenda está mostrado o tempo aproximado após o início da injeção, que é determinado pelo quadro de imagem da filmagem.

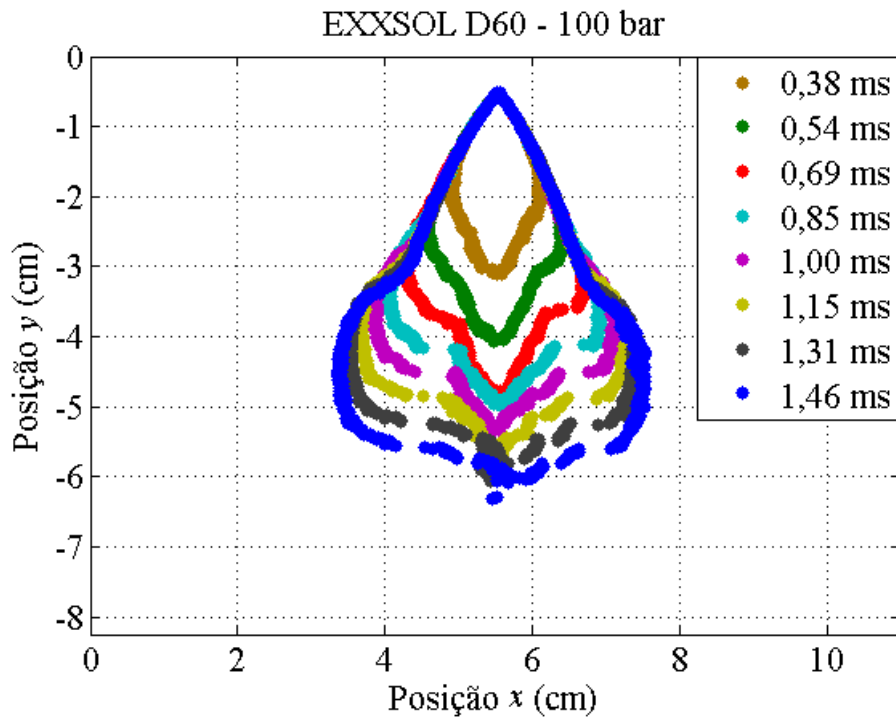


Figura 4.24 – Evolução das bordas do *spray* de EXXSOL D60 com pressão de injeção de 100 bar em vários tempos após o início da injeção.

Para as bordas mostradas na Figura 4.24 a diferença entre a abscissa da posição x referente à borda direita com a posição x da borda esquerda para uma mesma posição y foi tomada como uma estimativa do diâmetro local do *spray*. A medida do diâmetro é função da coordenada de posição y . O gráfico para o diâmetro do *spray* em função dessa posição y pode ser construído da forma mostrada na Figura 4.25, referente ao tempo específico de 0,69 milissegundos da Figura 4.24.

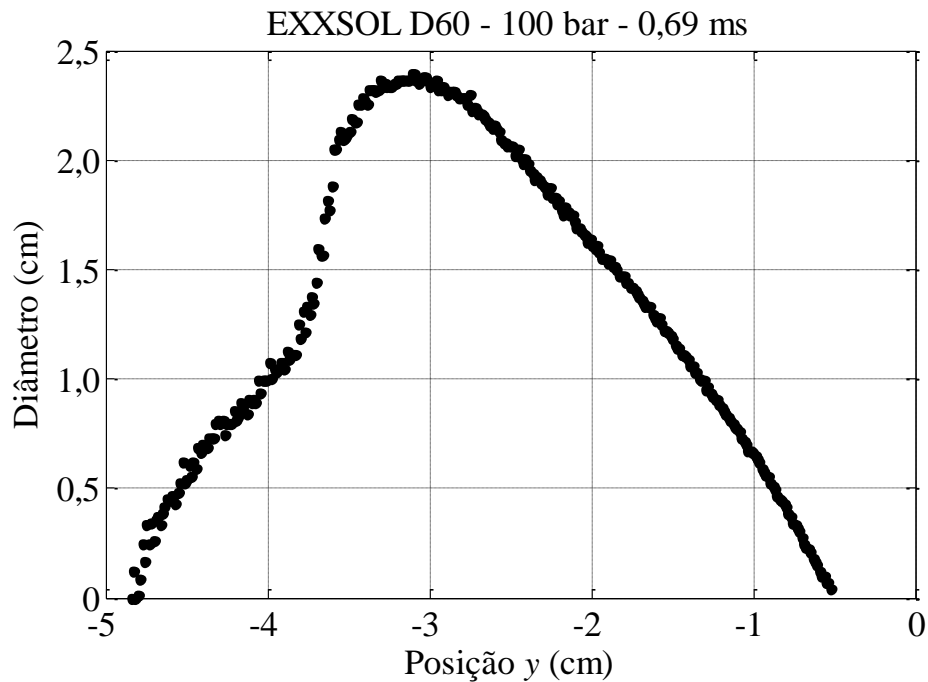


Figura 4.25 – Diâmetro do *spray* em função da posição y (cm) para injeção de EXXSOL D60 a 100 bar e 0,69 ms após o início da injeção.

Percorrer o eixo horizontal da Figura 4.25 da esquerda para a direita significa percorrer a imagem do *spray* de baixo para cima. O vértice do *spray* referente a 0,69 ms está aproximadamente na posição $y = -0,5$ cm com diâmetro equivalente bem próximo do diâmetro do orifício do injetor. O diâmetro aumenta do vértice até aproximadamente $y = -3,1$ cm e depois decresce até a extremidade do *spray* mais afastada do orifício do injetor. Além disso, como o diâmetro pode ser facilmente medido com os dados referentes às bordas, o volume do *spray* também pode ser estimado. Os *sprays* foram divididos em vários elementos em formato de pequenos cilindros. Um desses elementos está esquematizado na Figura 4.26 (a) para a injeção de EXXSOL D60 na pressão de 100 bar e tempo de 1,15 ms. Para cada linha da matriz da imagem do *spray* foi associado um elemento cilíndrico. O diâmetro de todos os elementos cilíndricos está na Figura 4.26 (b).

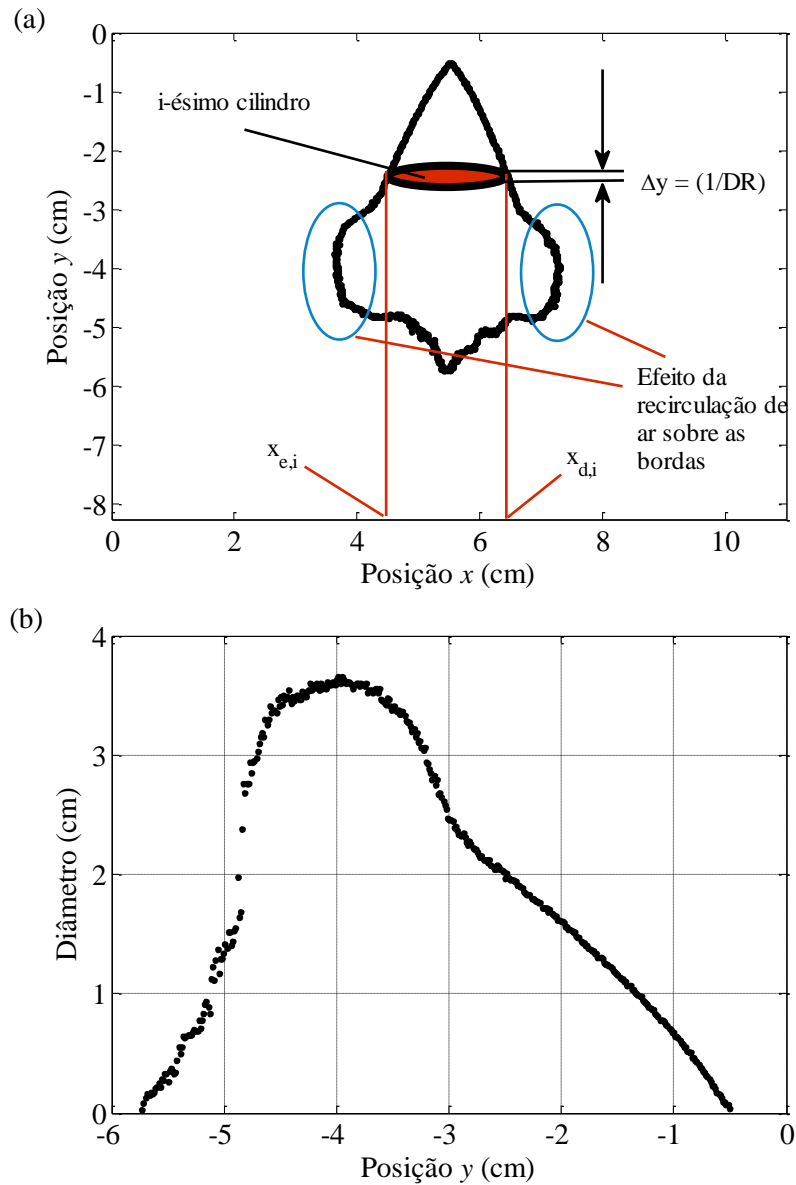


Figura 4.26 – (a) Elemento cilíndrico no interior do *spray*. (b) Diâmetro do *spray* em toda a sua extensão longitudinal.

O volume é calculado através do somatório de todos os volumes dos elementos em forma de cilindro dentro do *spray* através da Equação (4.22) onde $x_{d,i}$ e $x_{e,i}$ são respectivamente as posições x da borda direita e esquerda do elemento cilíndrico i (Figura 4.26) e $(1/DR)$ representa o comprimento na vertical de um pixel que é também a altura do elemento cilíndrico. As imagens com uma densidade de resolução DR de 72,7 pixels/cm fornecem uma altura de elemento cilíndrico equivalente a 0,014 cm.

$$V(t) = \frac{1}{DR} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \sum_i [x_{d,i} - x_{e,i}]^2 \quad (4.22)$$

A Equação (4.22) representa simplesmente o somatório dos volumes de todos os elementos cilíndricos dentro do *spray* como a área de uma circunferência, que é a base de um cilindro, multiplicada pela altura do elemento.

Para obter uma relação do volume em função do tempo, dados das bordas para instantes sucessivos são utilizados para esse cálculo e o tempo decorrido na evolução do *spray* foi determinado através da frequência utilizada na filmagem e do quadro de imagem considerado.

A análise foi estendida para todas as condições de testes. No item de resultados os volumes foram caracterizados pelas médias em cinco injeções. Os volumes dos dois diferentes fluidos testados foram comparados, na pressão de 100 bar, por meio de uma análise estatística.

4.4.2 Equações para os volumes acumulados dos *sprays* em função da posição axial

Os dados das bordas dos *sprays*, também foram utilizados para determinar equações para o cálculo do volume acumulado em função da posição axial para pequenas distâncias do orifício do injetor. Uma transformação de coordenadas foi inicialmente realizada para fazer coincidir a direção x de um sistema de coordenadas cartesiano com a direção axial ao longo do *spray*. A transformação consistiu em realizar as operações mostradas nas Equações (4.23) e (4.24), para as novas posições x' e y' das bordas. O *spray* também foi transladado para fazer coincidir $x' = 0$ para a posição do orifício do injetor.

$$x' = -(y_b - y_0) \quad (4.23)$$

$$y' = x_b \quad (4.24)$$

Nas Equações (4.23) e (4.24), x_b e y_b são as posições originais das bordas, antes da transformação e y_0 é a posição y referente ao orifício do injetor antes da transformação. O

efeito da transformação é equivalente a girar o *spray* 90° no sentido anti-horário. A Figura 4.27 mostra o efeito da transformação para o *spray* de EXXSOL D60 injetado com pressão de 100 bar em um instante próximo de 1,15 milissegundos após o início da injeção.

A Figura 4.27 também mostra um pequeno elemento em forma de disco de volume dV dentro do domínio do *spray* após a rotação de 90°.

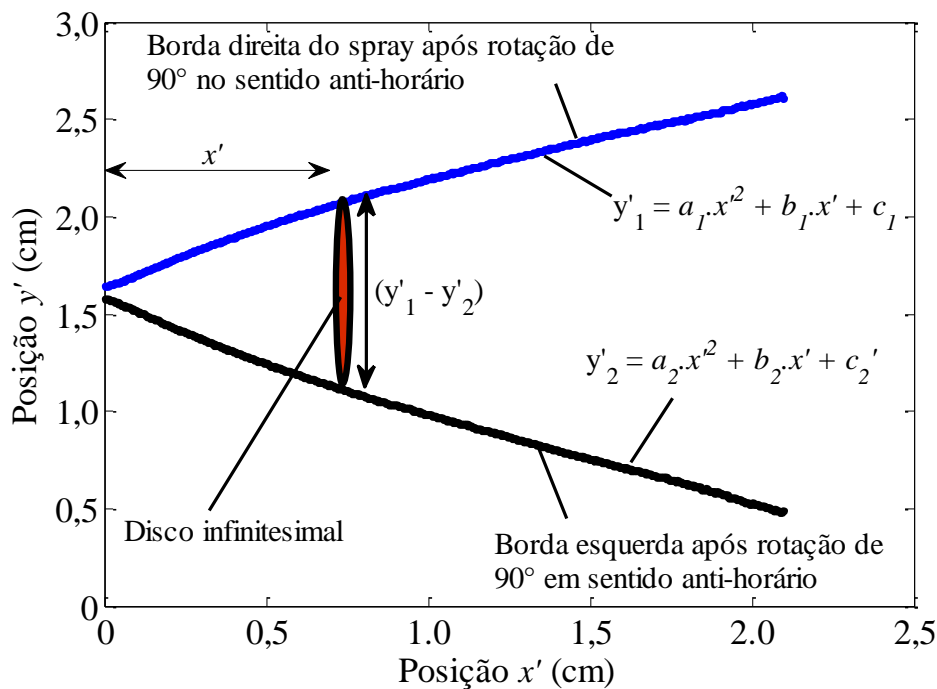


Figura 4.27 – Elemento em forma de disco infinitesimal dentro do domínio do *spray* para o cálculo do volume acumulado do *spray* até uma posição axial x' a partir do orifício do injetor.

O volume dV do disco, quando ele possui comprimento na direção axial x' infinitesimal é determinado pela Equação (4.25).

$$dV = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (y'_1 - y'_2)^2 dx' \quad (4.25)$$

Na Equação (4.25) y_1 e y_2 correspondem às equações ajustadas às bordas nas formas mostradas nas Equações (4.26) e (4.27).

$$y'_1 = a1 \cdot x'^2 + b1 \cdot x' + c1 \quad (4.26)$$

$$y'_2 = a2 \cdot x'^2 + b2 \cdot x' + c2 \quad (4.27)$$

Os ajustes polinomiais quadráticos foram escolhidos devido ao bom coeficiente de determinação R^2 em torno de 0,99 em todos os casos analisados. Ainda com relação à Equação (4.25) a diferença $(y'_1 - y'_2)$ representa o diâmetro do elemento cilíndrico na posição axial x' . O volume acumulado do *spray* em função da posição axial x' é então calculado integrando a Equação (4.25) desde x_0' correspondente à posição axial do orifício do injetor até x' na forma da Equação (4.28).

$$V(x') = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \int_{x_0'}^{x'} (y_1 - y_2)^2 dx' \quad (4.28)$$

Substituindo as equações (4.26) e (4.27) na Equação (4.28) e considerando a posição do orifício x_0' na origem ($x_0' = 0$) a Equação (4.29) é obtida após a resolução da integral da Equação (4.28).

$$V(x') = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \left[k1 \cdot x' + k2 \cdot \frac{x'^2}{2} + k3 \cdot \frac{x'^3}{3} + k4 \cdot \frac{x'^4}{4} + k5 \cdot \frac{x'^5}{5} \right] \quad (4.29)$$

Na Equação (4.29), $k1$, $k2$, $k3$, $k4$ e $k5$ são dados pelas relações mostradas nas equações (4.30), (4.31), (4.32), (4.33) e (4.34).

$$k1 = (c_1 - c_2)^2 \quad (4.30)$$

$$k2 = 2 \cdot (b_1 - b_2) \cdot (c_1 - c_2) \quad (4.31)$$

$$k3 = 2 \cdot (a_1 - a_2) \cdot (c_1 - c_2) + (b_1 - b_2)^2 \quad (4.32)$$

$$k4 = 2 \cdot (a_1 - a_2) \cdot (b_1 - b_2) \quad (4.33)$$

$$k5 = (a_1 - a_2)^2 \quad (4.34)$$

Assim, pelo conhecimento das constantes das duas equações de segundo grau ajustadas às bordas, foram obtidas equações para os volumes dos *sprays* em todas as pressões em função da coordenada axial x' . Os dados de posicionamento das bordas x_b e y_b utilizados foram referentes a uma média em cinco injeções em cada pressão.

4.5 Estimativas para a dispersão dos *sprays*

Para as estimativas das dispersões fez-se necessário o conhecimento do volume total médio ocupado pelo *spray* obtido da metodologia do item 4.4.1 ao final do tempo de injeção de 1,5 milissegundos, e o respectivo volume de líquido também ao final da injeção. A razão do volume ocupado pelo *spray* com o volume de líquido nele contido é o parâmetro que LEFEBVRE, 1989, comenta representar a dispersão. Em DELACOURT; DESMET; BESSON, 2005, essa razão para o caso do *spray* produzido por injetor Diesel é definida como coeficiente de dispersão.

Aos dados do volume total do *spray* em função do tempo foram realizados ajustes lineares. As inclinações desses ajustes representam a taxa de crescimento do volume total do *spray* em cm^3/s . Esse parâmetro multiplicado pelo tempo de 1,5 milissegundos representou uma estimativa do volume total ao final da injeção já que não existe o volume experimental para o tempo exato correspondente ao fim da injeção.

Para o cálculo do volume de líquido injetado, foram realizados testes de vazão que consistiram simplesmente na coleta do fluido em uma proveta durante um intervalo de tempo cronometrado de funcionamento do injetor. A razão da massa coletada obtida, com o tempo real de injeção (tempo total de teste multiplicado pelo percentual de *duty cycle* igual a 3%) representou a vazão mássica média do injetor, e a razão da massa pelo número de pulsos de injeção representou a massa de líquido ao final da injeção ou de forma equivalente a massa por pulso de injeção.

Com as massas específicas dos fluidos são então obtidas as respectivas vazões volumétricas e volumes de líquido ao final da injeção. A análise dimensional para o coeficiente de dispersão ao final do tempo de injeção, colocado como dependente dos parâmetros de massa específica do fluido ρ , viscosidade absoluta μ , velocidade média do fluido na saída do injetor V_0 , diâmetro do orifício D_0 , tensão superficial σ e pressão de injeção ΔP leva a obtenção de três

números adimensionais além do coeficiente de dispersão φ que também é um número adimensional por representar uma razão entre volumes. A Equação (4.35) foi tomada como modelo.

$$\varphi = \left(\frac{\rho V_0 D_0}{\mu}\right)^a \cdot \left(\frac{\rho V_0^2 D_0}{\sigma}\right)^b \cdot \left(\frac{\Delta P}{\rho V_0^2}\right)^c \quad (4.35)$$

4.6 Metodologias para medição do ângulo de cone

Uma forma de medir ângulos em *sprays* cônicos está exemplificada através da imagem da Figura 4.28.

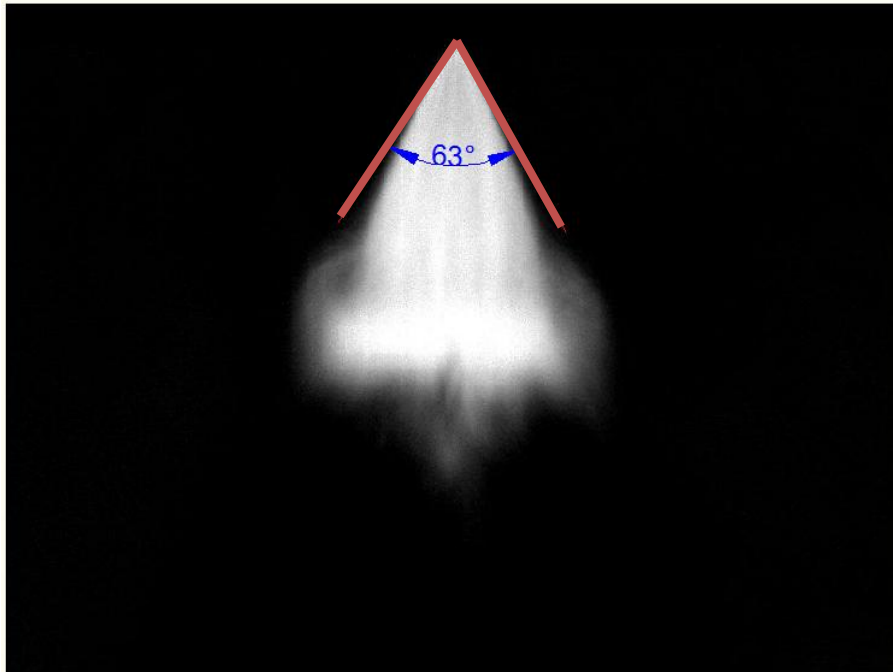


Figura 4.28 – Medição manual do ângulo de cone em uma imagem da injeção de EXXSOL D60 obtida através de um software de CAD.

Na Figura 4.28 o ângulo foi medido através de um software de CAD traçando retas coincidentes às bordas de um *spray* e que se cruzam no orifício do injetor. A imagem corresponde à injeção de EXXSOL D60 a 100 bar e 1,15 ms após o início da injeção.

LEFEBVRE, 1989, explica que uma das dificuldades na medição do ângulo de cone é que as bordas dos *sprays* possuem curvaturas e dessa forma, o procedimento exemplificado pela Figura 4.28 consiste em ajustar retas onde na verdade existem curvas.

Na própria imagem da Figura 4.28 é possível verificar que as bordas do *spray* não acompanham totalmente as retas traçadas em toda a sua extensão, apresentando assim uma curvatura para a parte interna.

O procedimento para medição de ângulo de cone descrito nos itens 4.6.2 e 4.6.3 leva em consideração as curvaturas das bordas dos *sprays* com o intuito de realizar uma caracterização da geometria do mesmo de forma mais completa próximo ao orifício do injetor.

4.6.1 Escolha do ponto de referência para medição dos ângulos

Para medir os ângulos dos *sprays*, com as duas metodologias propostas neste trabalho foi necessário primeiro determinar um ponto de referência próximo ao orifício do injetor e representativo do vértice do cone dos *sprays*. As duas metodologias necessitam da escolha desse ponto. A posição em coordenadas $x(\text{cm})$ e $y(\text{cm})$ na matriz numérica da imagem deve ser determinada.

A primeira metodologia para medição dos ângulos de cone é semelhante àquela que foi desenvolvida no trabalho de dissertação de GUZZO, 2012, e se refere à medição dos ângulos através dos perfis em arcos. No entanto, a nova metodologia aqui proposta melhora a resolução da análise. Ela está descrita item 4.6.2.

Para determinar a localização da referência pelas novas metodologias, procurou-se verificar onde a borda esquerda do *spray* intercepta por extrapolação a borda direita para constituir assim o vértice do cone. A Figura 4.29 mostra o procedimento para a injeção de EXXSOL D60 injetado com pressão de 100 bar e 1,15 milissegundos após o início da injeção para os dados das bordas direita e esquerda obtidas pela metodologia do item 4.2.

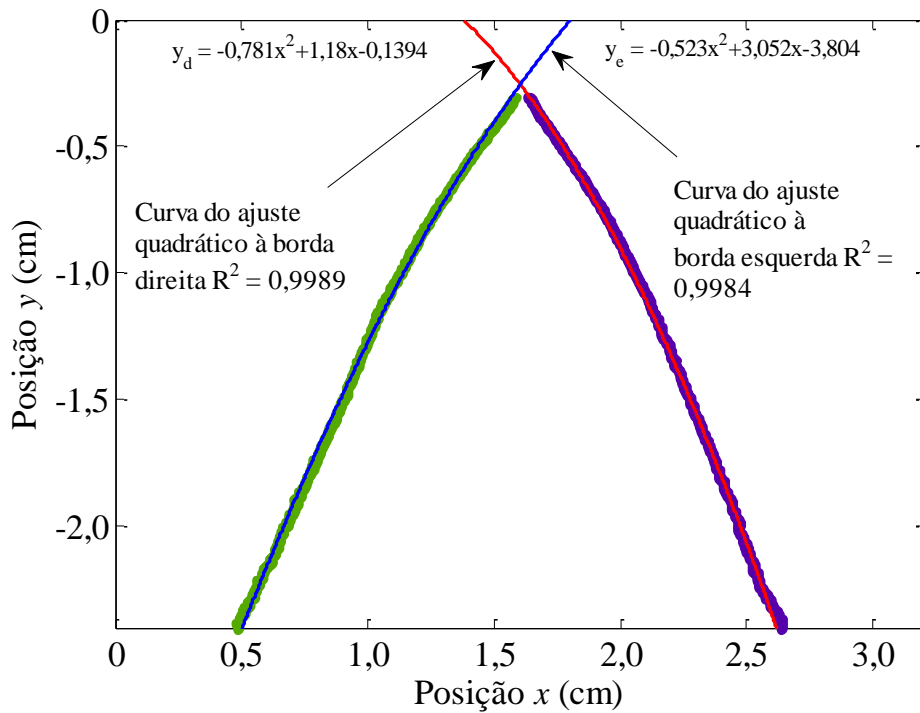


Figura 4.29 – Ajustes quadráticos nas bordas do *spray* de EXXSOL D60 para cálculo do ponto de referência situado no vértice do *spray*.

O próximo passo é realizar ajustes na forma de polinômios de segundo grau nas duas bordas e calcular em seguida a posição x_{Ref} e y_{Ref} em que as duas curvas se interceptam para localização do vértice do cone.

No caso específico da Figura 4.29 a posição onde as duas curvas se interceptam corresponde a $x_{Ref} = 1,6035$ cm e $y_{Ref} = -0,2549$ cm. A Figura 4.30 mostra a ampliação da Figura 4.29 próxima à posição de referência. A linha i_{Ref} e a coluna j_{Ref} da matriz da imagem correspondente a essa localização são associadas aos números inteiros mais próximos dos resultados dos cálculos das Equações (4.36) e (4.37) que utilizam a densidade de resolução DR em pixels/cm.

$$i_{Ref} = x_{ref} \cdot DR + 1 \quad (4.36)$$

$$j_{Ref} = -y_{ref} \cdot DR + 1 \quad (4.37)$$

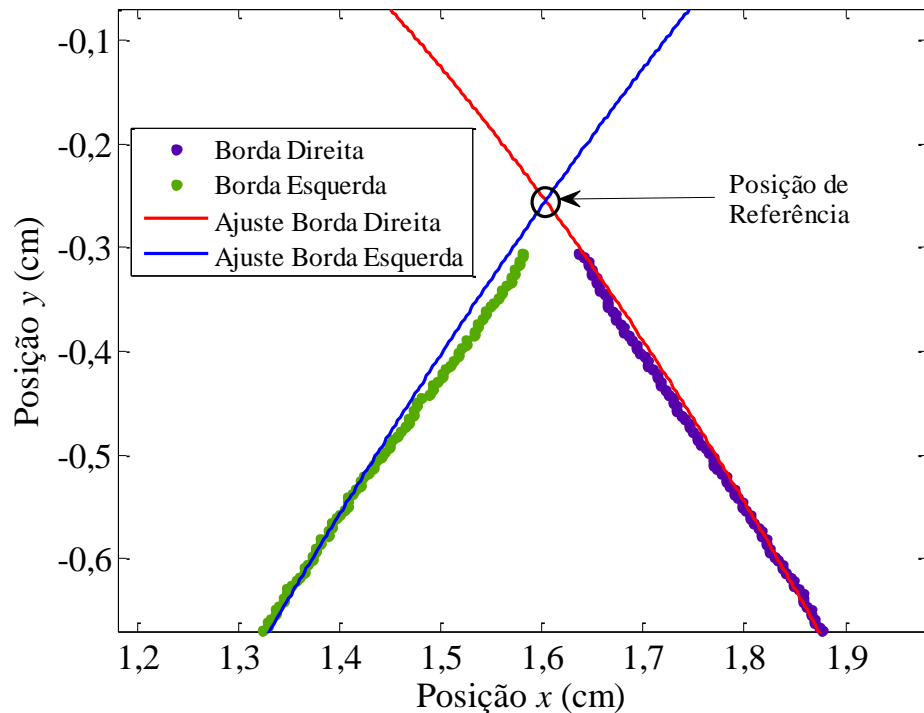


Figura 4.30 – Ponto de referência para um caso de um *spray* de EXXSOL D60 obtido a partir de ajustes quadráticos às bordas.

O procedimento foi realizado automaticamente para todas as imagens que entraram na análise e valores médios x_{ref} , y_{ref} , i_{ref} , e j_{ref} considerando todas as injeções são utilizados como posições de referência.

A definição dos instantes de tempo para a medição dos ângulos dos *sprays* foi determinada pela observação do processamento das bordas nas imagens mais próximas do orifício do injetor. A Figura 4.31 (a) mostra um exemplo desta análise para uma injeção de EXXSOL D60 e a Figura 4.31 (b) mostra a mesma análise para o EXXSOL D40 com pressão de injeção de 30 bar.

A pressão de 30 bar é aquela que possui a menor penetração dentre todas as condições testadas, assim, se o *spray* ocupar toda a janela de observação da imagem para um determinado instante, teremos que nesse mesmo instante os *sprays* para as outras pressões testadas também ocuparão toda a janela de observação.

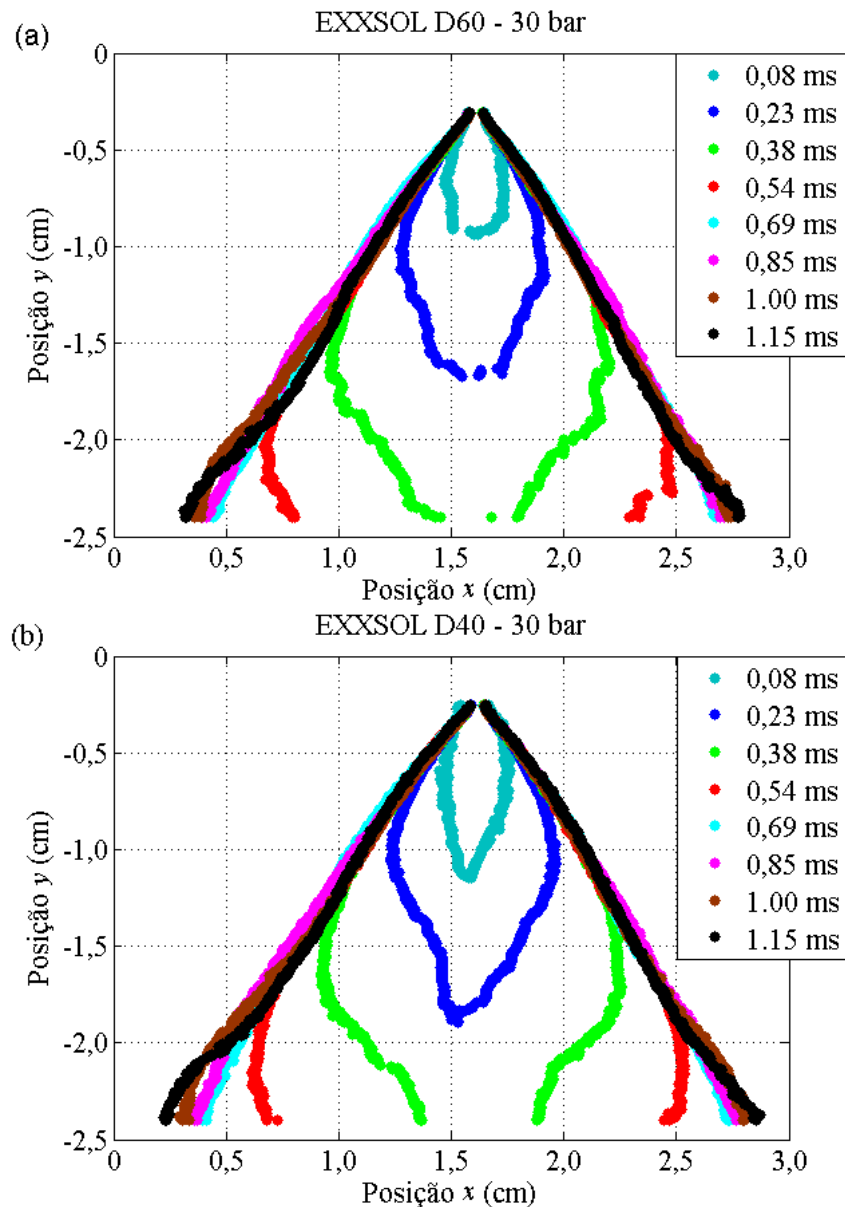


Figura 4.31 – Bordas da injeção dos *sprays* de (a) EXXSOL D60 e (b) EXXSOL D40 a 30 bar em vários instantes após o início da injeção.

Como pode ser observado na Figura 4.31, os *sprays* rapidamente atingem o limite da janela de observação compreendido de uma distância de 2,5 cm na direção vertical. As bordas para o instante de 0,38 milissegundos já possuem penetração vertical máxima maior que essa dimensão para os dois fluidos.

Optou-se desta forma por escolher instantes de tempo grandes o suficiente para o *spray* ocupar toda a janela de observação da imagem e sem a presença nessa janela de partes do pré-*spray* que possui o efeito de diminuir o diâmetro do *spray*. Assim, imagens com tempo inferior a 0,85 milissegundos não foram utilizadas na análise dos ângulos.

Os instantes de tempo escolhidos como exemplos de resultados a serem discutidos mais adiante na parte de Resultados corresponderam a 0,85; 1,15; e 1,46 milissegundos após o início da injeção. Esses instantes também estão próximos do período de regime pseudopermanente sugerido no trabalho de GOMES et al., 2015, e na Figura 3.19 para o mesmo injetor aqui analisado.

Os resultados dos ângulos, assim como os dados das bordas foram armazenados em matrizes multidimensionais.

4.6.2 Ângulos de cone através dos perfis em arcos

No trabalho de dissertação de GUZZO, 2012 os ângulos de cone foram medidos através dos perfis em formatos de arcos de circunferência para levar em consideração a curvatura das bordas dos *sprays*. Nesta seção, no entanto, uma nova metodologia, não publicada na dissertação, é proposta com o objetivo de aproveitar de forma mais efetiva a resolução das imagens.

O procedimento para aproveitar melhor a resolução das imagens é parecido com a obtenção das bordas através dos perfis horizontais. Inicia-se a análise dos valores dos pixels em um perfil horizontal desde a extremidade esquerda da imagem até a extremidade direita. No entanto, quando o valor de corte para localização da borda esquerda é excedido, o perfil passa a ter a forma de um arco de circunferência com raio igual à distância do ponto localizado na borda esquerda até o ponto de referência representativo do vértice do cone. O vértice do cone é determinado pela metodologia do item 4.6.1. O caminho em formato de arco de circunferência progride até a localização da borda direita do *spray*. O raio do arco é calculado através da Equação (4.38) para distâncias em centímetros e Equação (4.39) para distâncias em pixels.

$$R_{cm} = \sqrt{\left(\frac{j_e - j_{ref}}{DR}\right)^2 + \left(\frac{i_e - i_{ref}}{DR}\right)^2} \quad (4.38)$$

$$R_{pixel} = \sqrt{(j_e - j_{ref})^2 + (i_e - i_{ref})^2} \quad (4.39)$$

Nas Equações (4.38) e (4.39) j_e representa o número da coluna onde a borda esquerda é localizada, i_{ref} e j_{ref} são respectivamente a linha e a coluna onde está localizado o ponto de referência próximo ao orifício ou de forma equivalente, o centro dos arcos e DR é a densidade de resolução em pixels/cm.

A Figura 4.32 mostra um exemplo do caminho do perfil marcado com a mudança dos valores das intensidades dos pixels originais com pixels brancos em uma imagem da injeção de EXXSOL D60 com pressão de injeção de 100 bar e tempo próximo de 1,15 ms. O perfil mostrado começa linear a partir da linha 200 da matriz e em seguida toma o formato de um arco de circunferência centrado na posição de referência.

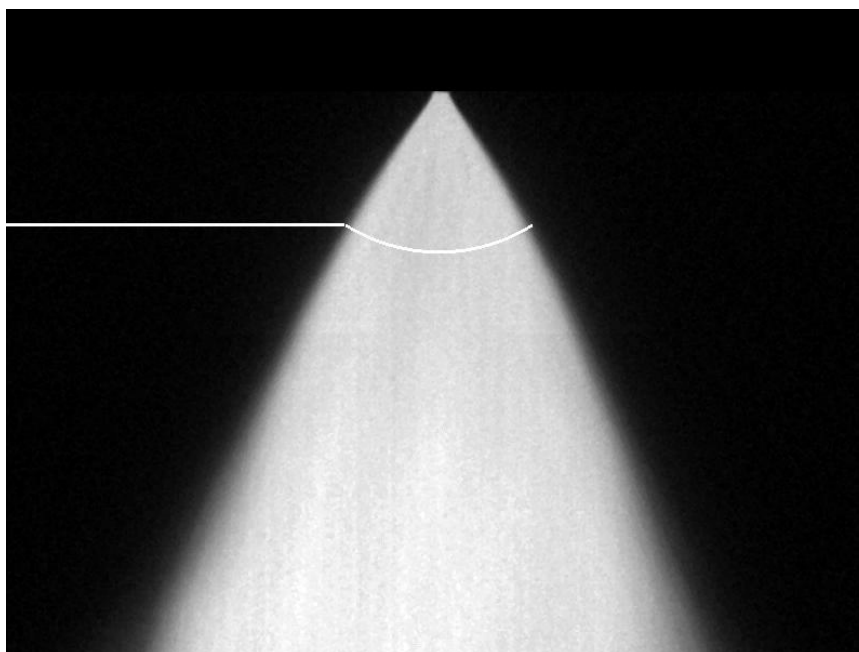


Figura 4.32 – Forma do perfil das intensidades dos pixels analisado por meio da metodologia dos perfis em arcos de circunferência na linha 200 da matriz numérica da imagem.

A Figura 4.33 mostra os valores das intensidades da Figura 4.32 em função da posição x do pixel. As bordas são localizadas novamente pelo critério de corte na intensidade 60. A análise termina assim que a borda direita do *spray* é identificada.

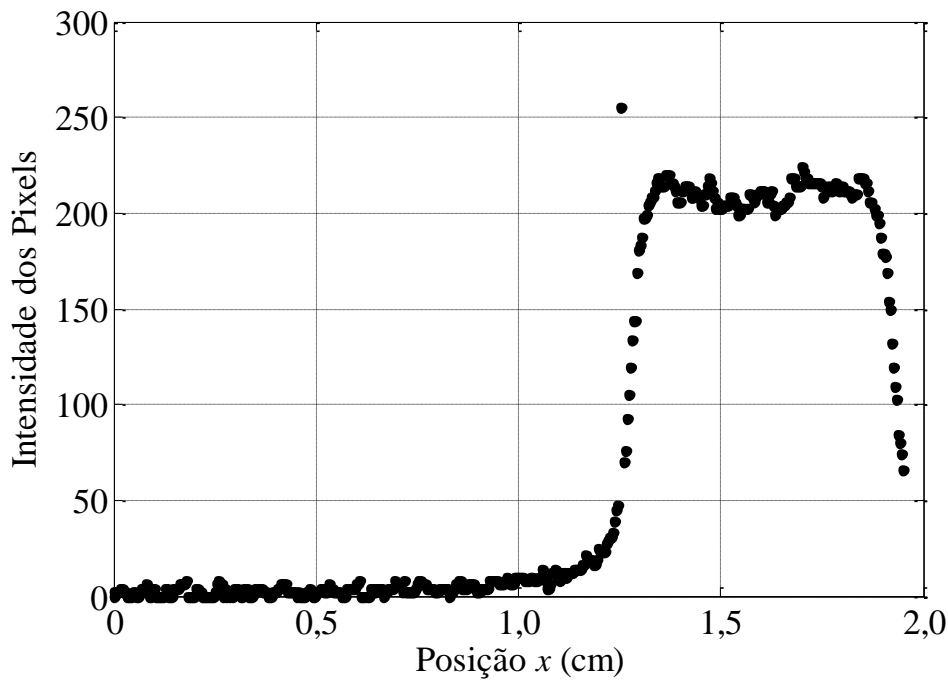


Figura 4.33 – Valores das intensidades dos pixels em função da sua posição x (cm) para a medição do ângulo do *spray*.

O ângulo necessário para varrer o arco da Figura 4.32 desde a borda esquerda até a borda direita é calculado através da Equação (4.40).

$$\theta = \arcsen\left(\frac{|j_e - j_{ref}|}{R_{pixel}}\right) + \arcsen\left(\frac{|j_d - j_{ref}|}{R_{pixel}}\right) \quad (4.40)$$

O cálculo é realizado dividindo o ângulo formado pelo arco dentro do *spray* em dois ângulos α_1 e α_2 . O ângulo α_1 é calculado através da primeira parcela da soma do lado direito da Equação (4.40) e o ângulo α_2 é calculado na segunda parcela. A soma dos dois ângulos constitui o ângulo varrido pelo arco entre as duas bordas. Os parâmetros j_{ref} , j_e e j_d representam o número da coluna na matriz das localizações do ponto de referência, da borda esquerda do *spray* e da borda direita respectivamente.

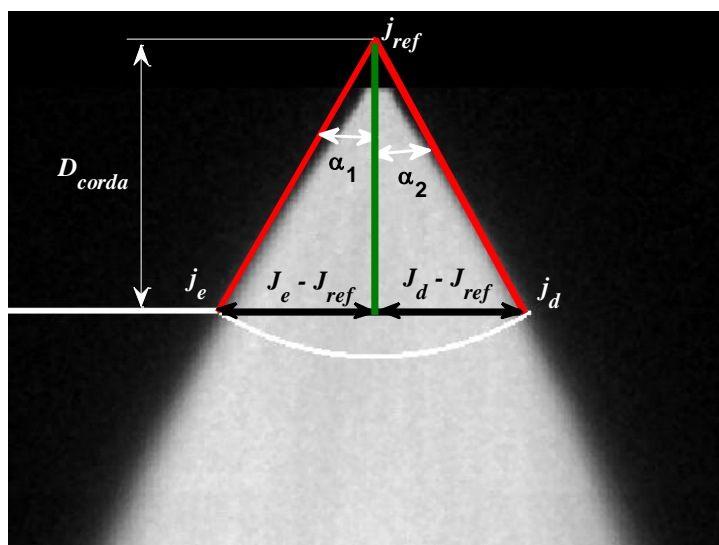


Figura 4.34 – Parâmetros para o cálculo do ângulo de cone pela metodologia dos perfis em arcos de circunferência.

O perfil da Figura 4.34 tem início na extremidade esquerda da linha 200 da matriz. A metodologia proposta para medição dos ângulos aproveitando ao máximo a resolução da imagem considera linhas consecutivas. Assim, como exemplo, uma análise de vários perfis, substituindo o pixel original por um pixel de valor 255 (branco) da linha 100 até a linha 400 faz a análise da região em branco da Figura 4.35.

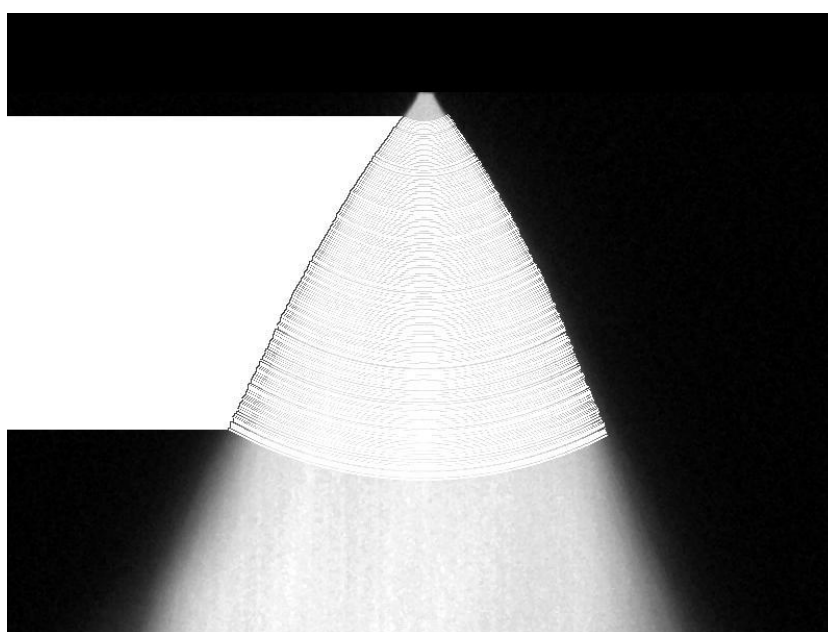


Figura 4.35 – Análise de uma região do *spray* para obtenção dos ângulos de cone em vários perfis.

O resultado da análise para a Figura 4.35 é um vetor coluna com 300 valores numéricos cada um correspondendo à medição do ângulo em um perfil específico. Esse vetor coluna pode então ser utilizado para traçar o gráfico do ângulo do *spray* em função da distância vertical da corda do arco D_{corda} até a posição do vértice do cone calculada pela Equação (4.41) para a distância em pixels. A distância D_{corda} também está representada na Figura 4.34.

$$D_{corda} = |j_e - j_{ref}| \quad (4.41)$$

Para distâncias verticais em centímetros, basta dividir D_{corda} pela densidade de resolução DR em pixels/cm.

A Figura 4.36 mostra o resultado do procedimento para o caso analisado da Figura 4.35.

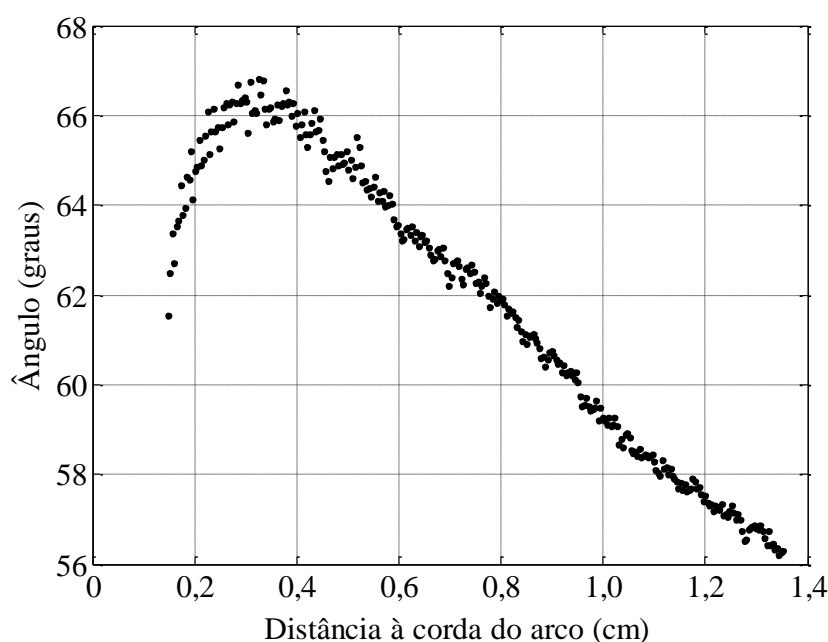


Figura 4.36 – Ângulos de cone da linha 100 até a linha 400 da matriz da imagem de um *spray* de EXXSOL D60 com pressão de injeção de 100 bar.

O próximo passo foi analisar de forma automática cinco imagens do *spray*, nos mesmos instantes após o início da injeção, para obter dados estatisticamente relevantes e gráficos

semelhantes ao da Figura 4.36, porém com médias obtidas dos dados experimentais, não apenas medições utilizando uma única imagem.

Para conferir e validar a adequação da metodologia dos perfis em arcos na medição dos ângulos, uma imagem artificial com mesmo fator de escala em pixels/cm e mesma resolução das imagens experimentais foi construída no próprio ambiente MATLAB. A imagem gerada está mostrada na Figura 4.37 e representa um triângulo equilátero formado por valores de pixels aleatórios na faixa entre 60 e 255. A faixa de 60 a 255 representa a região de *spray* nas imagens experimentais com base no valor de corte de 60.

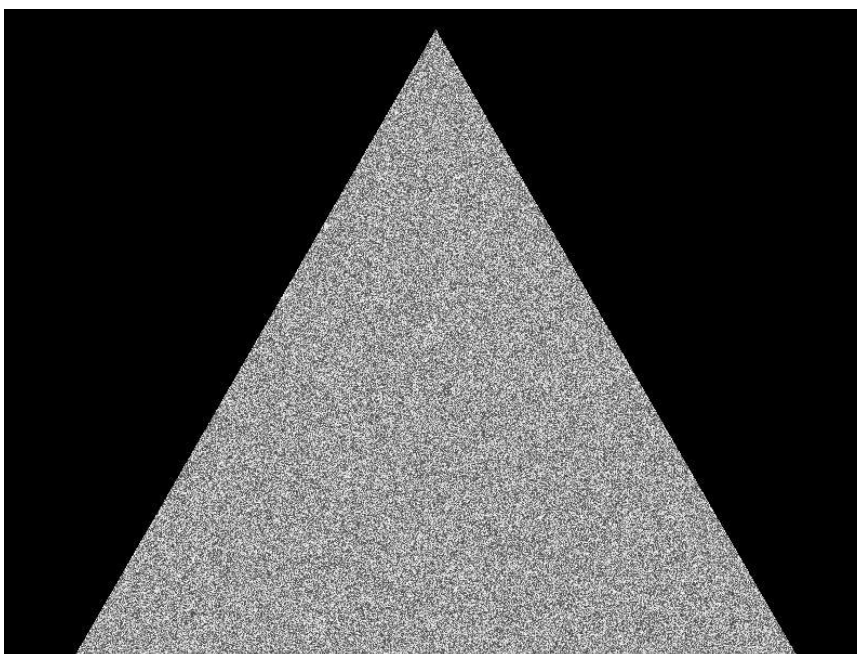


Figura 4.37 – Imagem teste formada por um triângulo equilátero para verificação da metodologia de medição dos ângulos por meio dos perfis em arcos.

As medições dos ângulos de cone no triângulo equilátero devem fornecer uma medida de 60 graus em todas as posições devido à regularidade das faces do triângulo que diferentemente do *spray*, não possui curvatura. A metodologia dos perfis em arcos foi aplicada para a imagem artificial na faixa de 0,1 até 1,6 centímetros de distância entre o vértice superior do triângulo até as cordas dos arcos. A Figura 4.38 (a) mostra a região analisada substituindo os pixels originais por pixels brancos e os resultados das medições dos ângulos estão na Figura 4.38 (b).

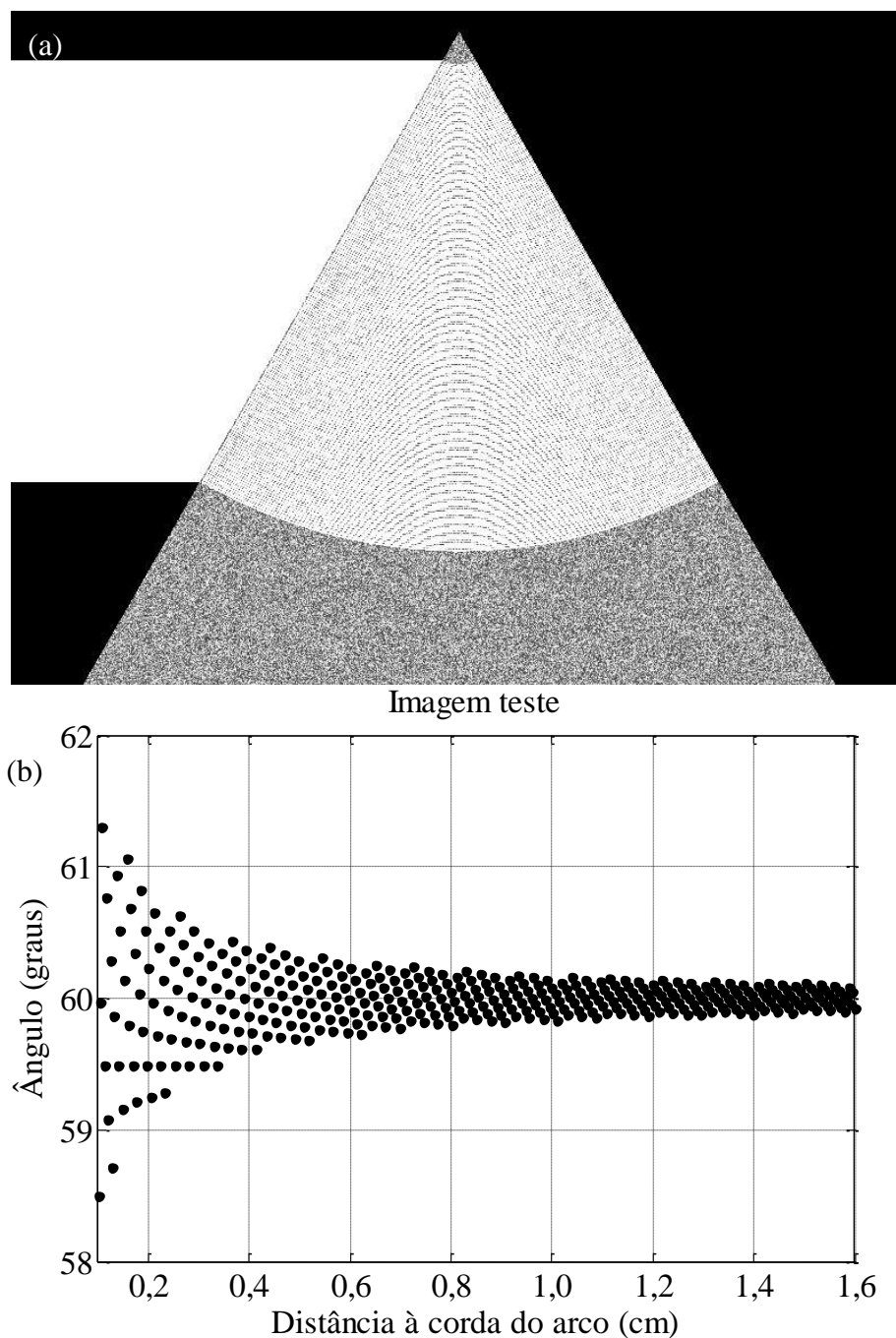


Figura 4.38 – Medições dos ângulos pela metodologia dos perfis em arcos na imagem artificial. (a) Região analisada na imagem e (b) os ângulos medidos em função da distância à corda do arco.

Observando a Figura 4.38 (b) é possível verificar que existe uma oscilação das medições em torno do valor correto de 60° . A oscilação é causada por um erro induzido pela resolução da imagem no processo de ajustar arcos de circunferências em uma matriz retangular de pixels. Tal oscilação diminui assim que distâncias maiores são consideradas. A oscilação tem uma amplitude máxima em torno de $1,5^\circ$ em $0,3$ cm de distância. Em $1,6$ cm a oscilação cai para

próximo de $0,1^\circ$. Assim a metodologia aqui proposta produz um erro máximo de $1,5^\circ$ para distâncias a partir de 0,3 cm do vértice do cone e considerando ângulos de *sprays* próximos de 60° que é o caso do presente trabalho.

4.6.3 Ângulos de cone através das posições das bordas

Os dados de posição $x(\text{cm})$ e $y(\text{cm})$ das bordas armazenados no processamento de imagens, também podem ser utilizados para calcular os ângulos dos *sprays*. A Figura 4.39 mostra a representação do ângulo para a posição fixa $y = -1$ cm para um *spray* de EXXSOL D60 injetado a 100 bar e tempo após o início de injeção de 1,15 ms. A Equação (4.42) mostra o cálculo a partir das posições (x_d, y) e (x_e, y) referentes respectivamente às bordas direita e esquerda e também da posição de referência (x_{ref}, y_{ref}) calculada pelos ajustes quadráticos.

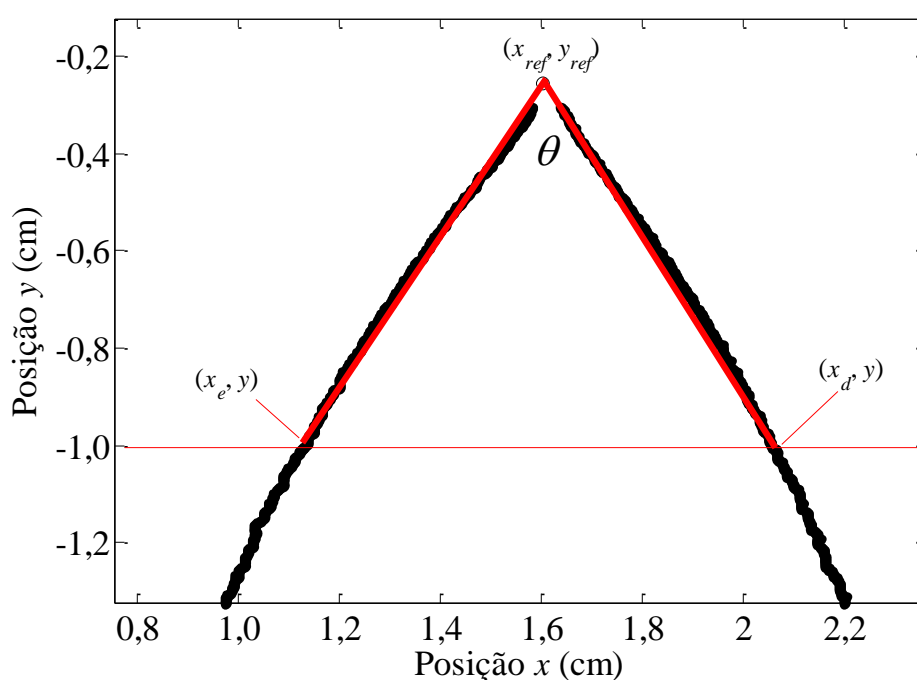


Figura 4.39 – Representação do ângulo do *spray* para a uma injeção de EXXSOL D60 na posição $y = -1,0$ cm.

$$\theta(y) = \tan^{-1}\left(\frac{x_{ref} - x_e}{y_{ref} - y}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{x_d - x_{ref}}{y_{ref} - y}\right) \quad (4.42)$$

A partir da Equação (4.42) pode-se calcular o ângulo em função da posição y . A posição y depende do sistema de coordenadas adotado para as matrizes das imagens. Para colocar os resultados em função de um parâmetro independente do sistema de coordenadas e também obter posteriormente correlações independentes desse sistema, os resultados dos ângulos foram traçados em função da distância vertical ao orifício do injetor Δy ao invés da posição y . A posição do orifício do injetor é facilmente calculada através do máximo valor y de todo o conjunto de dados de posição $y(\text{cm})$.

4.6.4 Correlação para os ângulos de cone

Utilizando uma metodologia análoga à análise dimensional descrita no item 4.3.3 para as correlações da penetração do diâmetro máximo, procurou-se obter correlações para os ângulos dos *sprays* θ em radianos. As grandezas ρ , V , D , μ , σ , t e ΔP antes colocadas como parâmetros de influência na penetração também foram utilizadas na análise dimensional do ângulo. A distância vertical ao orifício Δy onde a medida do ângulo do *spray* é realizada, também foi adicionada na análise. A função procurada está mostrada na Equação (4.43).

$$\theta = f[\rho, V, D, \mu, \sigma, t, \Delta P, \Delta y] \quad (4.43)$$

Os ângulos considerados na análise foram obtidos da metodologia de medição considerando os dados de posição das bordas do item 4.6.3.

Como o radiano é a razão do comprimento de um arco pelo seu raio, o próprio ângulo θ é a representação de um número adimensional. O ângulo θ em função dos outros números adimensionais obtidos da análise está representado na Equação (4.44).

$$\theta = f\left(\frac{\Delta y}{D}, Re, We, \frac{\Delta P}{\rho V^2}, \frac{Vt}{D}\right) \quad (4.44)$$

A função considerada para o ângulo θ em radianos está mostrada na Equação (4.45).

$$\theta = Re^a \cdot We^b \cdot \left(\frac{\Delta P}{\rho V^2}\right)^c \cdot \left(\frac{Vt}{D}\right)^d \cdot \left(\frac{\Delta y}{D}\right)^e \quad (4.45)$$

A Equação (4.46) é obtida tomando o logaritmo natural dos dois lados da igualdade da Equação (4.45).

$$\ln(\theta) = a \cdot \ln(Re) + b \cdot \ln(We) + c \cdot \ln\left(\frac{\Delta P}{\rho V^2}\right) + d \cdot \ln\left(\frac{Vt}{D}\right) + e \cdot \ln\left(\frac{\Delta y}{D}\right) \quad (4.46)$$

Os expoentes a , b , c , d e e são então encontrados através da regressão linear multivariável da Equação (4.46) colocada na forma de uma equação matricial, de forma semelhante à descrição feita no item 4.3.3.

A correlação para os ângulos também foi testada para o caso de injeção de água para verificação da sua adequação para fluidos de propriedades diferentes dos fluidos testados.

4.7 Análise do *spray* de etanol em condições dinâmicas

A parte da análise do *spray* de etanol em condições dinâmicas é constituída essencialmente de um exemplo de aplicação e adaptação das metodologias desenvolvidas neste trabalho para os motores de combustão interna. O objetivo principal aqui é a proposição de ferramentas de estudo para futuras análises mais elaboradas da injeção direta em motores de combustão interna. As injeções foram realizadas no tempo de compressão do motor. Como exemplo a Figura 4.40 mostra uma imagem do *spray* de etanol obtida de um processo de filmagem do motor com a injeção no tempo de compressão.

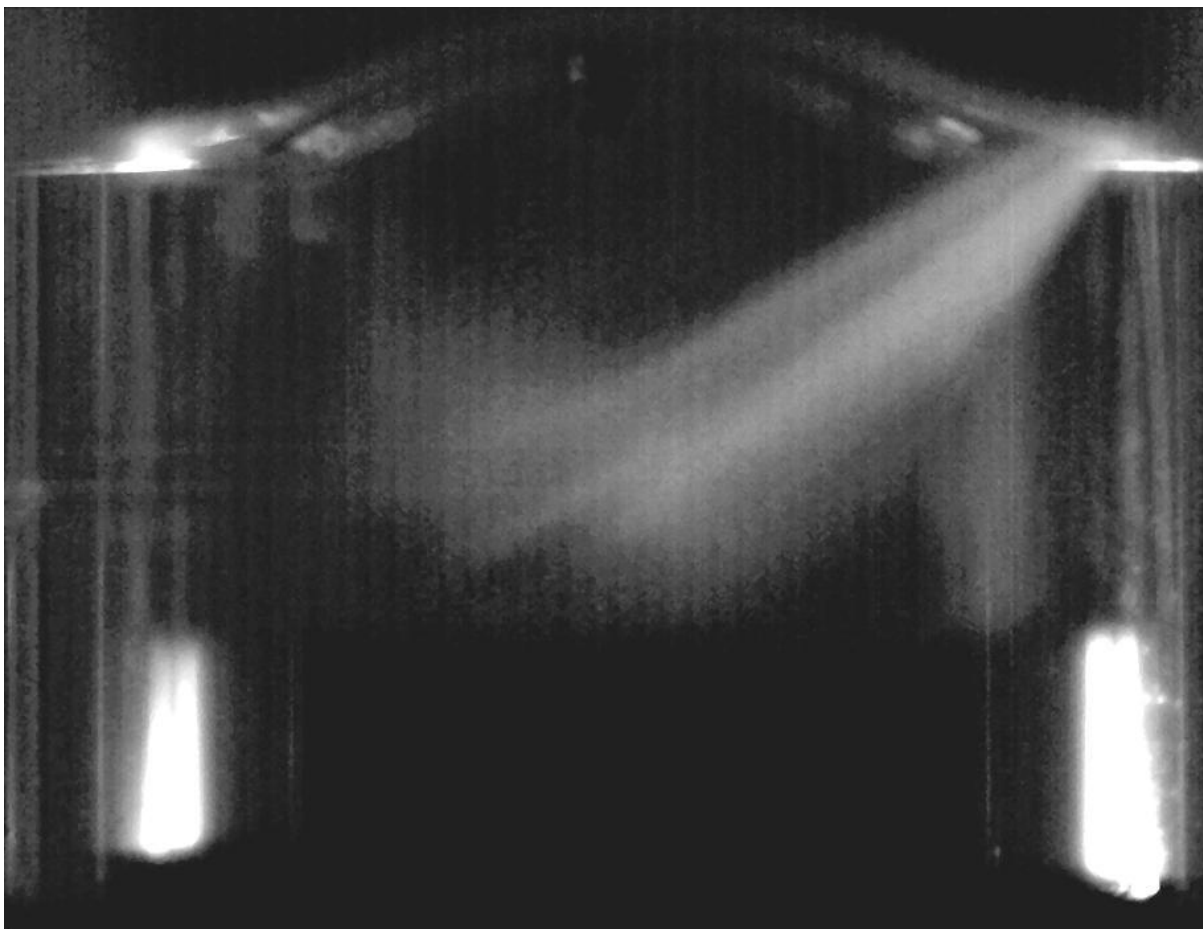


Figura 4.40 – Injeção de *spray* no tempo de compressão no motor monocilindro de acesso óptico utilizado em pesquisa.

4.7.1 Penetração

Neste trabalho a penetração do *spray* de etanol em condições dinâmicas foi medida em relação a um ponto fixo da imagem. A Figura 4.41 mostra a determinação manual dessa referência. Os testes ocorreram com o motor operando sem combustão com 1000, 2000 e 3000 RPM e a análise foi realizada para três injeções em cada condição de rotação do motor. As injeções ocorreram em 120° APMS, no tempo de compressão e compreendendo um intervalo de 15° , ou seja, de 120° até 105° antes do ponto morto superior.



Figura 4.41 – Determinação do ponto de referência na imagem do cilindro do motor de acesso óptico.

A referência escolhida está situada na parte direita superior da janela de quartzo do cilindro. As distâncias mostradas em pixels foram convertidas nas coordenadas de posição da imagem utilizando o fator de escala DR em pixels/cm, conforme as Equações (4.47) e (4.48).

$$x(cm) = \frac{703,50}{DR} \quad (4.47)$$

$$y(cm) = -\frac{161,88}{DR} \quad (4.48)$$

O fator de escala medido para os testes no motor foi de 89,59 pixels/cm e assim a posição de referência está situada em $x_{ref} = 7,8$ cm e $y_{ref} = -1,8$ cm. As bordas dos *sprays* são então identificadas através de perfis horizontais e perfis verticais de pixels nas imagens em

coordenadas de posição $x(\text{cm})$ e $y(\text{cm})$. As distâncias $dist$ das bordas ao ponto de referência são então calculadas através da Equação (4.49).

$$dist = \sqrt{(x - x_{ref})^2 + (y - y_{ref})^2} \quad (4.49)$$

A distância máxima para cada quadro da filmagem contendo *spray* é armazenada para caracterizar a penetração. A Figura 4.42 (a) mostra a imagem do *spray* de etanol injetado a 110° de ângulo de virabrequim antes do ponto morto superior de compressão e rotação de 2000 RPM. Na Figura 4.42 (b) está representada qualitativamente a penetração desse *spray*.

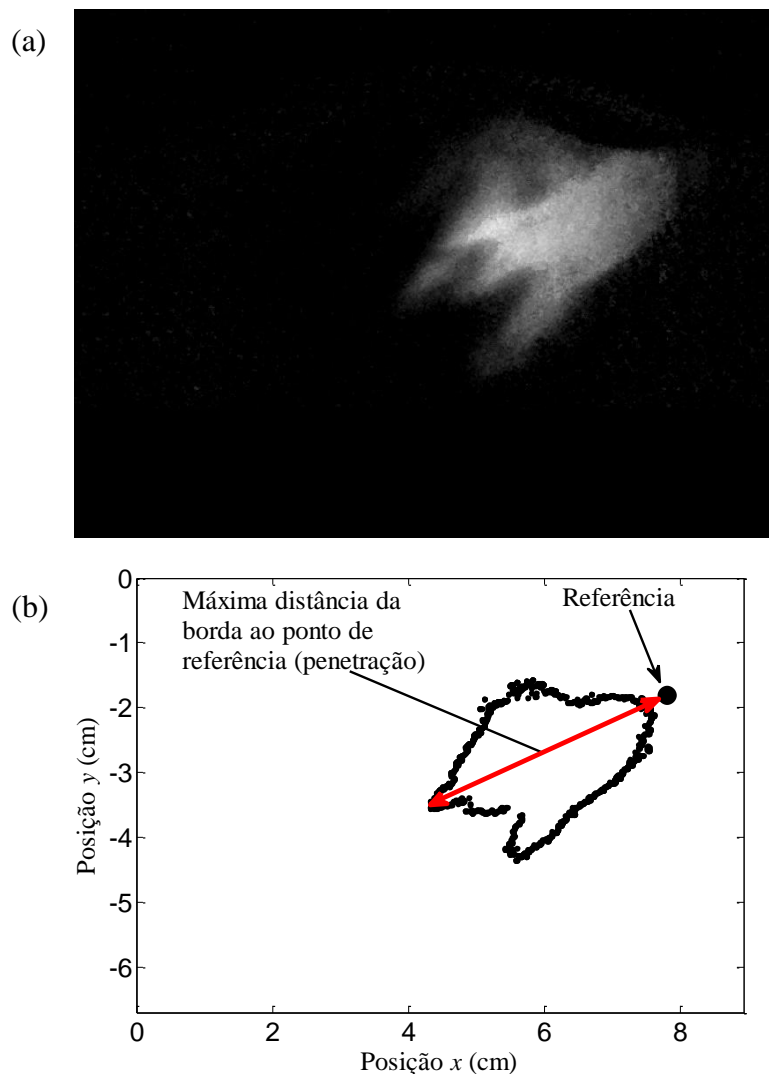


Figura 4.42 – Penetração para o *spray* de etanol em 110° de ângulo de virabrequim APMS com motor operando a 2000 RPM. Imagem do *spray* (a) e representação qualitativa da penetração do *spray* (b).

4.7.2 Ângulo de cone

Para a avaliação do ângulo de cone, utilizou-se o mesmo ponto de referência determinado pela medição manual da Figura 4.41. Os ângulos foram traçados em função da posição x das bordas determinadas pelos perfis verticais de intensidade de pixels na imagem. A Figura 4.43 mostra essa determinação para o caso específico do *spray* com motor funcionando na rotação de 2000 RPM, 110° antes do porto morto superior de compressão e posição x de 6 centímetros.

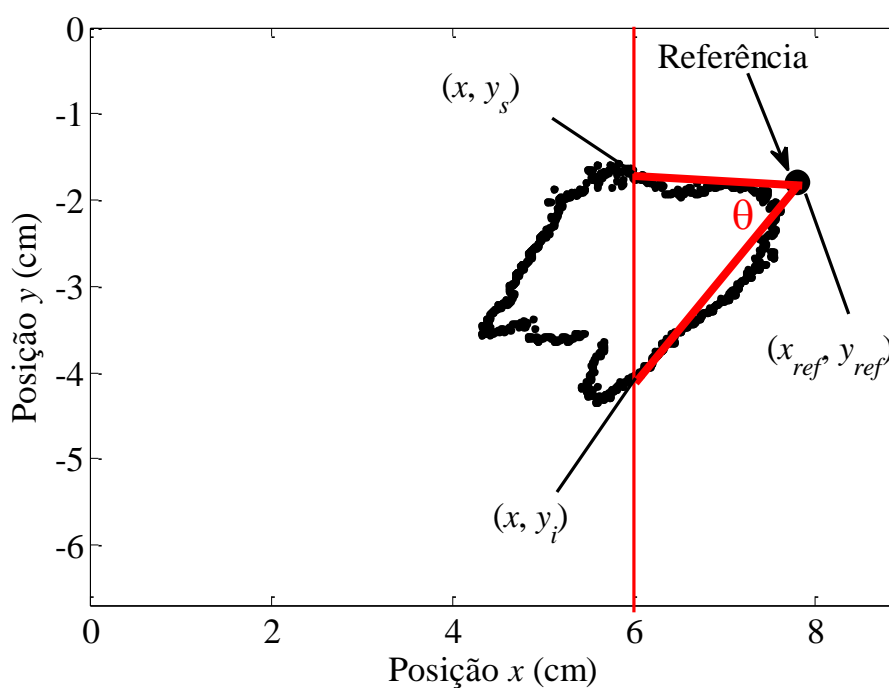


Figura 4.43 – Cálculo do ângulo do *spray* de etanol hidratado em $x = 6$ cm para motor funcionando a 2000 RPM e 110° APMS.

O ângulo θ é calculado através da Equação (4.50) ou (4.51). A opção entre uma ou outra equação depende da posição relativa da referência com o dado de posição y da borda. O subscrito s se refere à borda superior e o subscrito i à borda inferior.

$$\theta(x) = \tan^{-1}\left(\frac{y_s - y_0}{x - x_0}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{y_0 - y_i}{x - x_0}\right) \quad y_s \geq y_0 \quad (4.50)$$

$$\theta(x) = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{y_0 - y_s}{x - x_0}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{y_0 - y_i}{x - x_0}\right) \quad y_s \leq y_0 \quad (4.51)$$

4.8 Erros aleatórios

As estimativas de erros oriundos das medições experimentais foram caracterizadas através da repetitividade da média da forma descrita em ALBERTAZZI; SOUSA, 2008. Os resultados foram fornecidos através de uma faixa de incerteza da média calculada pela Equação (4.52).

$$incerteza = \pm \left(\frac{t_{std} \cdot u_{des}}{\sqrt{n}} \right) \quad (4.52)$$

Na Equação (4.52), n é o número de medições realizadas, t_{std} é o coeficiente *t-student* para $(n-1)$ graus de liberdade e 95% de probabilidade, consultado no anexo de ALBERTAZZI; SOUZA, 2008, u_{des} é o desvio padrão das medições.

A incerteza representada na Equação (4.52) neste trabalho caracterizou, portanto, uma faixa onde existe uma probabilidade de 95% da média das medições situar-se entre os extremos da faixa.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados serão apresentados a seguir primeiro para os testes em condições estáticas. Os dados obtidos para os testes de vazão serão apresentados seguidos da obtenção das bordas dos *sprays* em um primeiro momento. Todos os parâmetros macroscópicos medidos em condições estáticas são dependentes da localização das bordas dos *sprays* enquanto todas as correlações obtidas além de utilizarem os dados das bordas, utilizam também os dados dos testes de vazão. Os resultados dos testes em condições dinâmicas serão apresentados na parte final da seção de Resultados e Discussão.

5.1 Análise experimental estática dos *sprays*

5.1.1 Vazão mássica e vazão volumétrica do injetor

A Tabela 5.1 mostra os resultados para as medições das vazões mássicas e volumétricas para o EXXSOL D60 e a Tabela 5.2 para o EXXSOL D40.

Tabela 5.1 – Vazão mássica e volumétrica de EXXSOL D60.

Pressão (bar)	Vazão mássica (g/s)		Vazão volumétrica (g/cm ³)	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
30	6,61	0,19	5,17	0,15
50	8,58	0,05	6,71	0,04
70	9,97	0,02	7,81	0,01
90	11,14	0,03	8,72	0,02
100	11,56	0,01	9,05	0,01

Tabela 5.2 – Vazão mássica e volumétrica de EXXSOL D40.

Pressão (bar)	Vazão mássica (g/s)		Vazão volumétrica (g/cm ³)	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
30	6,53	0,11	5,10	0,09
50	8,44	0,03	6,58	0,02
70	9,82	0,03	7,66	0,02
90	11,00	0,04	8,58	0,03
100	11,42	0,09	8,91	0,07

A Figura 5.1 mostra os gráficos individuais da vazão mássica junto com ajustes de potência aos dados e as Equações (5.1) e (5.2) mostram a dependência da vazão mássica de EXXSOL D60, \dot{m}_{D60} e de EXXSOL D40, \dot{m}_{D40} em kg/s em função da pressão de injeção ΔP obtidas com os ajustes. As relações das vazões volumétricas com a pressão de injeção são obtidas dividindo as equações pelas massas específicas dos fluidos.

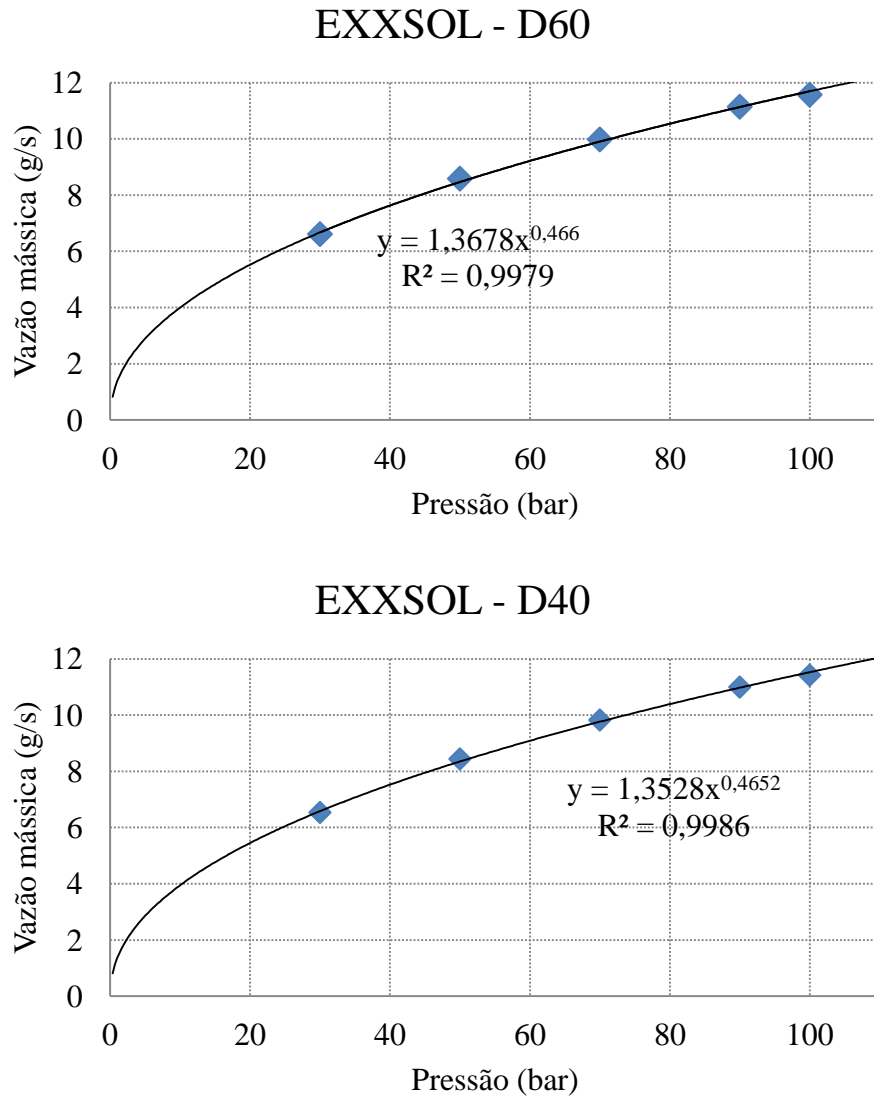


Figura 5.1 – Ajustes de potência ($y = ax^b$) aos dados de vazão mássica do injetor *pressure-swirl*.

$$\dot{m}_{D60} = \left(1,3678 \times 10^{-3} \frac{g}{s \cdot bar^{0,4660}} \right) \cdot \Delta P^{0,4660} \quad (5.1)$$

$$\dot{m}_{D40} = \left(1,3528 \times 10^{-3} \frac{g}{s \cdot bar^{0,4652}} \right) \cdot \Delta P^{0,4652} \quad (5.2)$$

É interessante notar a proximidade dos expoentes obtidos para ΔP nas Equações (5.1) e (5.2), com o valor teórico correspondente a 0,5 previsto pela aplicação da equação de Bernoulli.

A vazão volumétrica para os dois fluidos em função da pressão de injeção também pode ser observada na Figura 5.2.

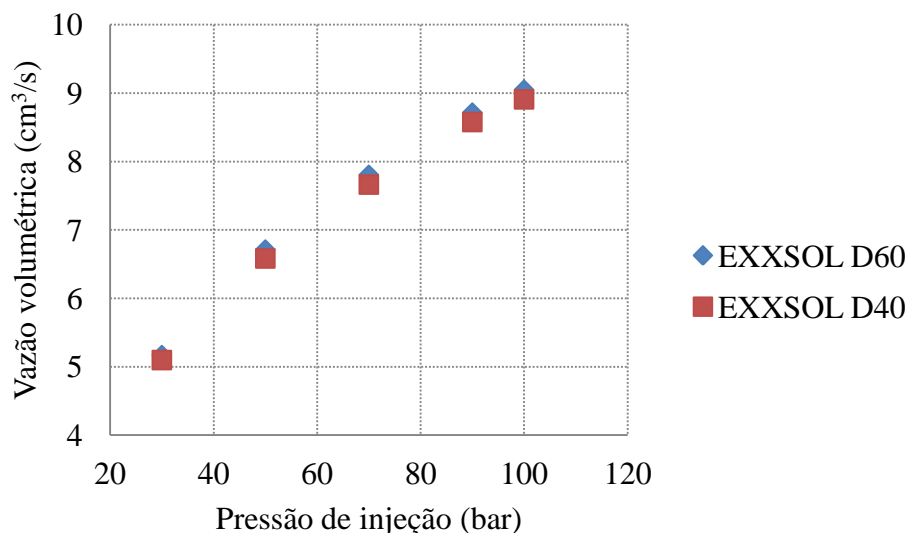


Figura 5.2 – Vazão volumétrica do injetor *pressure-swirl* em função da pressão de injeção para os dois fluidos de teste.

Os dados para os dois fluidos são quase coincidentes quanto à vazão volumétrica. A diferença máxima em termos percentuais não chegou a 1,5%. O conhecimento das vazões mássicas e volumétricas do injetor foi importante para estimar as espessuras dos anéis dos jatos líquidos que saem através do orifício.

O conhecimento das espessuras dos anéis é necessário para calcular as áreas do líquido no orifício do injetor e também as velocidades médias de saída do líquido V_0 através da razão entre as vazões volumétricas e essas áreas. As velocidades médias entraram nos cálculos dos números adimensionais relacionados aos testes e nas relações preditivas obtidas na Tese para a penetração do diâmetro máximo, o volume, o ângulo de cone e os coeficientes de dispersão dos *sprays*.

5.1.2 Bordas dos *sprays*

A Figura 5.3 mostra a identificação das bordas dos *sprays* em uma única injeção em função do tempo para o EXXSOL D60 nas pressões de 30, 70, e 110 bar respectivamente.

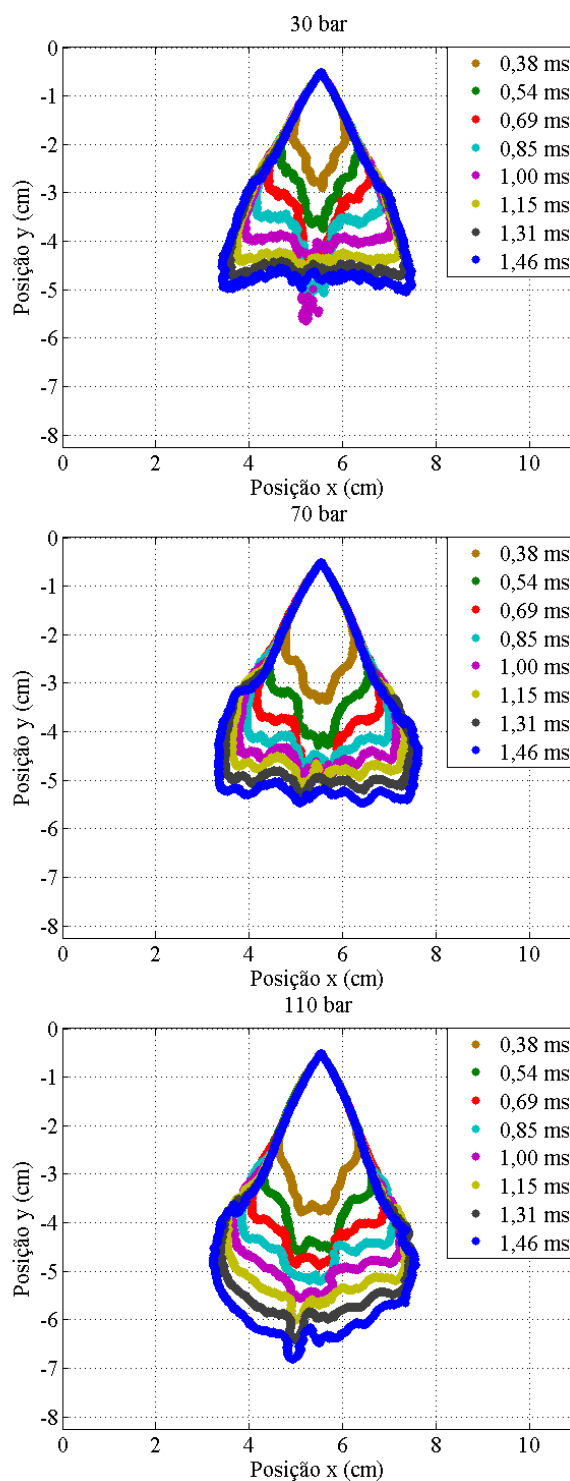


Figura 5.3 – Evolução temporal das bordas dos *sprays* para a injeção de EXXSOL D60 em diferentes pressões.

A Figura 5.3 mostra representações gráficas de dados armazenados nas matrizes de posição das imagens.

As bordas direita e esquerda dos *sprays* são praticamente coincidentes em todos os instantes da sua evolução em regiões mais próximas ao orifício do injetor. Como esperado, observa-se uma tendência geral de aumento da penetração verificada pelo tamanho do *spray* na direção y , com o aumento da pressão de injeção.

A Figura 5.4 mostra exemplos de dados armazenados nas matrizes de posição $x(\text{cm})$ e $y(\text{cm})$ das imagens para o EXXSOL D40 onde também é possível verificar o crescimento dos *sprays* na direção vertical com o aumento da pressão resultando em maior penetração. O aumento da pressão de injeção tem o efeito de impor maior quantidade de movimento ao fluido tanto na direção tangencial quanto na direção axial. Assim quando o fluido emerge do orifício do injetor com velocidade axial V_0 mais alta para uma mesma pressão ambiente, a penetração tende ser maior.

As localizações médias das bordas para o instante próximo de 1,15 milissegundos, obtidas de uma filmagem mais próxima ao injetor e utilizando a pressão de injeção de 100 bar, estão na Figura 5.5 (a) para o EXXSOL D60 e na Figura 5.6 (a) para o EXXSOL D40. Os desvios-padrões referentes às localizações das posições x estão na Figura 5.5 (b) para o EXXSOL D60 e Figura 5.6 (b) para o EXXSOL D40. Os dados se referem a um conjunto constituído por cinco medições para cada fluido testado.

Os valores dos desvios das Figuras 5.5 (b) e 5.6 (b), da ordem de 10^{-3} e 10^{-2} cm, mostram que existe pouca variabilidade na posição da borda próxima ao injetor. Um pequeno afastamento do injetor, representado por valores de coordenada y mais negativos, já mostra certa tendência de crescimento na variabilidade de sua posição, porém com valores que não chegam a 1 milímetro.

A Tabela 5.3 mostra os valores médios das repetitividades que representam a faixa de erro aleatório.

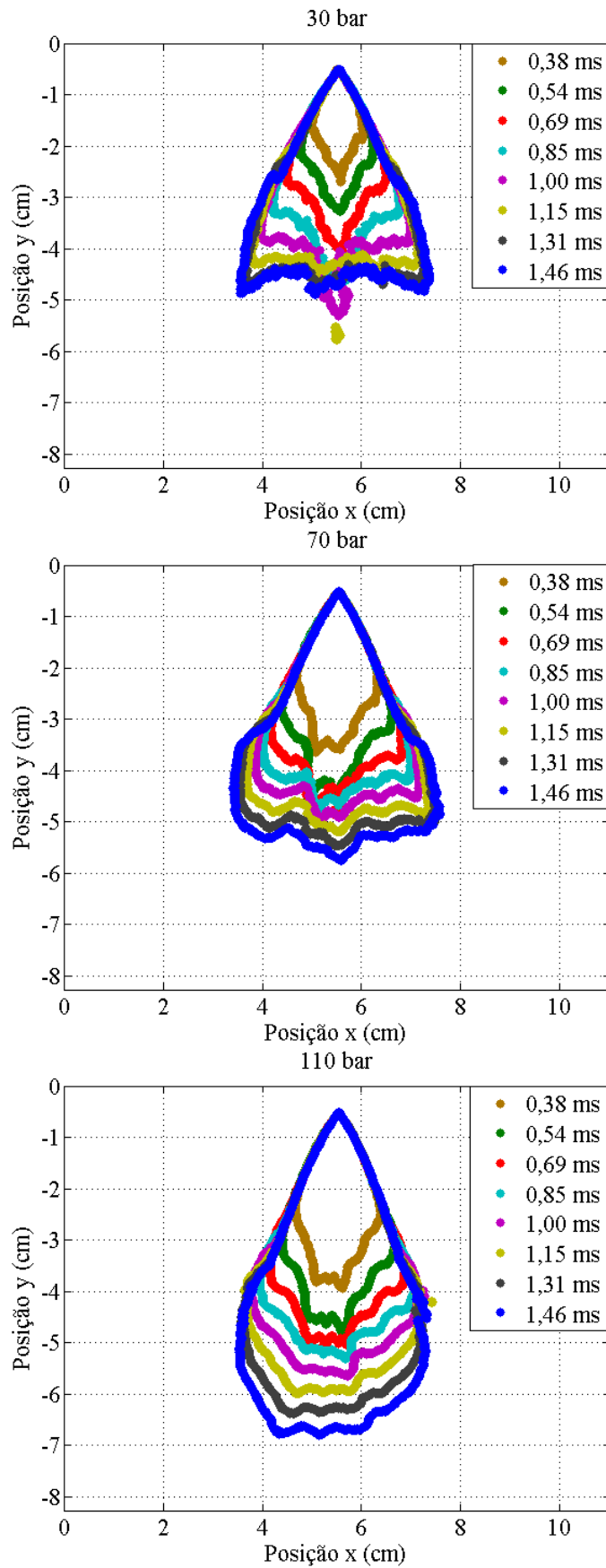


Figura 5.4 – Evolução temporal das bordas dos *sprays* para a injeção de EXXSOL D40 em diferentes pressões.

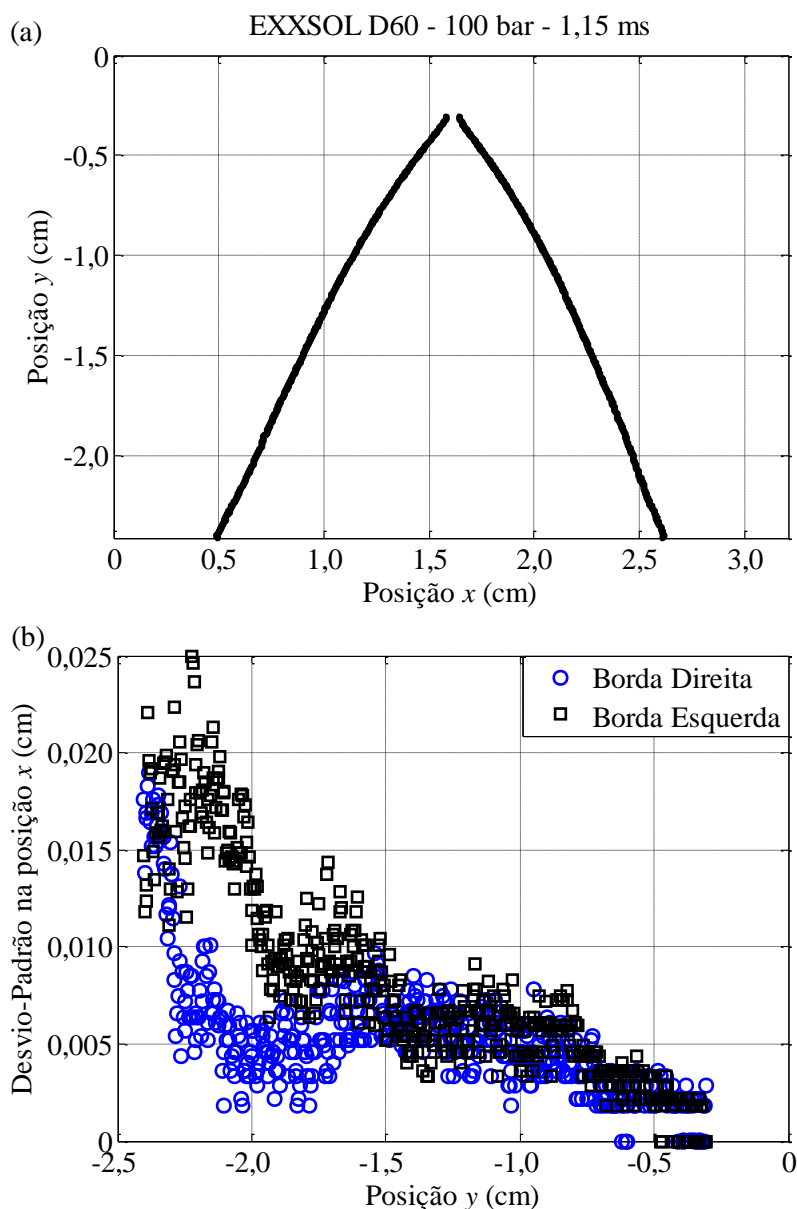


Figura 5.5 – Bordas do *spray* de EXXSOL D60 e desvios na posição x para a injeção com pressão de 100 bar e 1,15 ms após o início da injeção.

Os dados das bordas dos *sprays* têm sido utilizados para comparação de simulações numéricas com o comportamento do *spray* obtido experimentalmente em trabalhos realizados no Centro de Tecnologia da Mobilidade da Universidade Federal de Minas Gerais. Alguns exemplos são os trabalhos de conclusão de curso de REIS, 2015, e ROCHA, 2015. Além disso, a localização das bordas constituiu no primeiro passo para obtenção de outras propriedades macroscópicas como a penetração, o ângulo, o volume e os coeficientes de dispersão dos *sprays*.

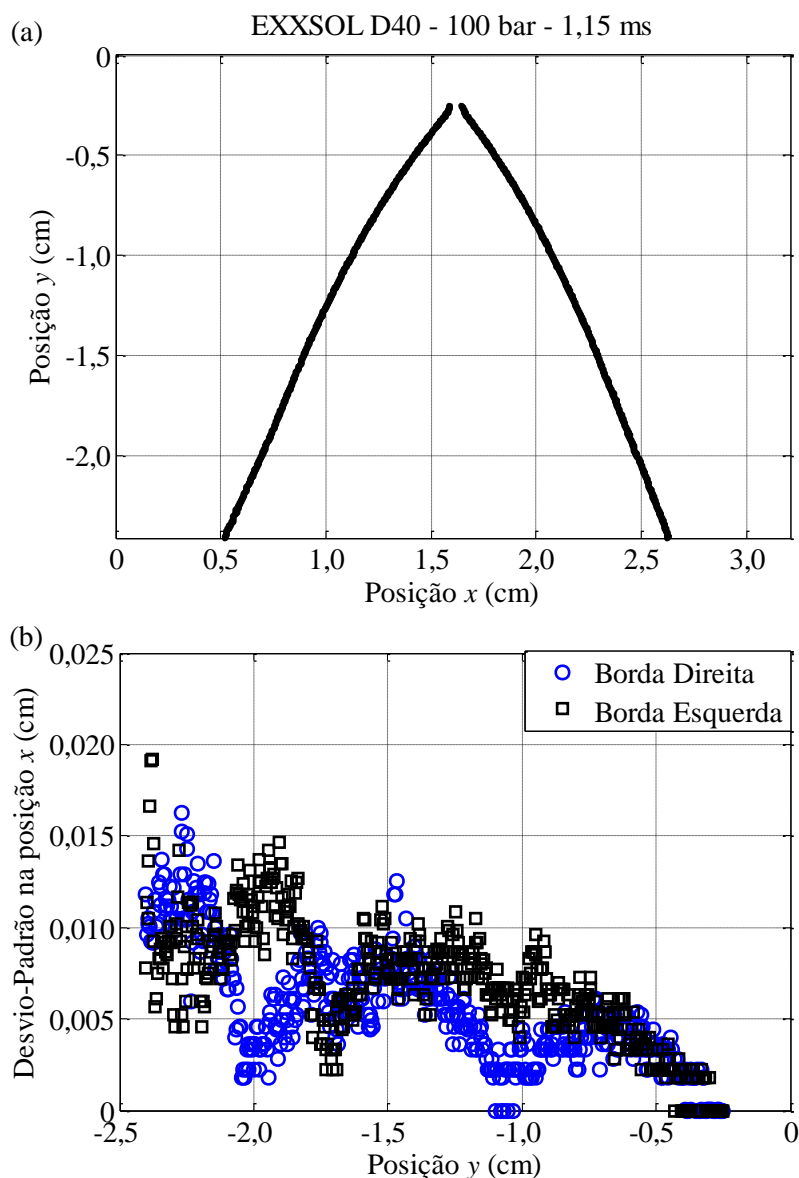


Figura 5.6 – Bordas dos *sprays* de EXXSOL D40 e desvios na posição x para a injeção com pressão de 100 bar e 1,15 ms após o início da injeção.

Os desvios para os cálculos das repetitividades foram obtidos relativamente à posição x . Para cada y correspondente à posição de uma linha da matriz numérica da imagem, são calculadas as posições x da borda direita e esquerda conforme já descrito no item 4.2. Portanto, x constituiu em uma variável dependente de medição para o parâmetro fixo y .

Tabela 5.3 – Média da incerteza na posição das bordas.

EXXSOL D60		EXXSOL D40	
Borda Direita	Borda Esquerda	Borda Direita	Borda Esquerda
$\pm 0,0066$ cm	$\pm 0,0277$ cm	$\pm 0,0068$ cm	$\pm 0,0237$ cm

5.1.3 Penetração dos *sprays*

As penetrações verticais máximas obtidas de cinco injeções por meio dos dados das bordas dos *sprays* estão na Figura 5.7 (a) para o EXXSOL D60 e Figura 5.7 (b) para o EXXSOL D40.

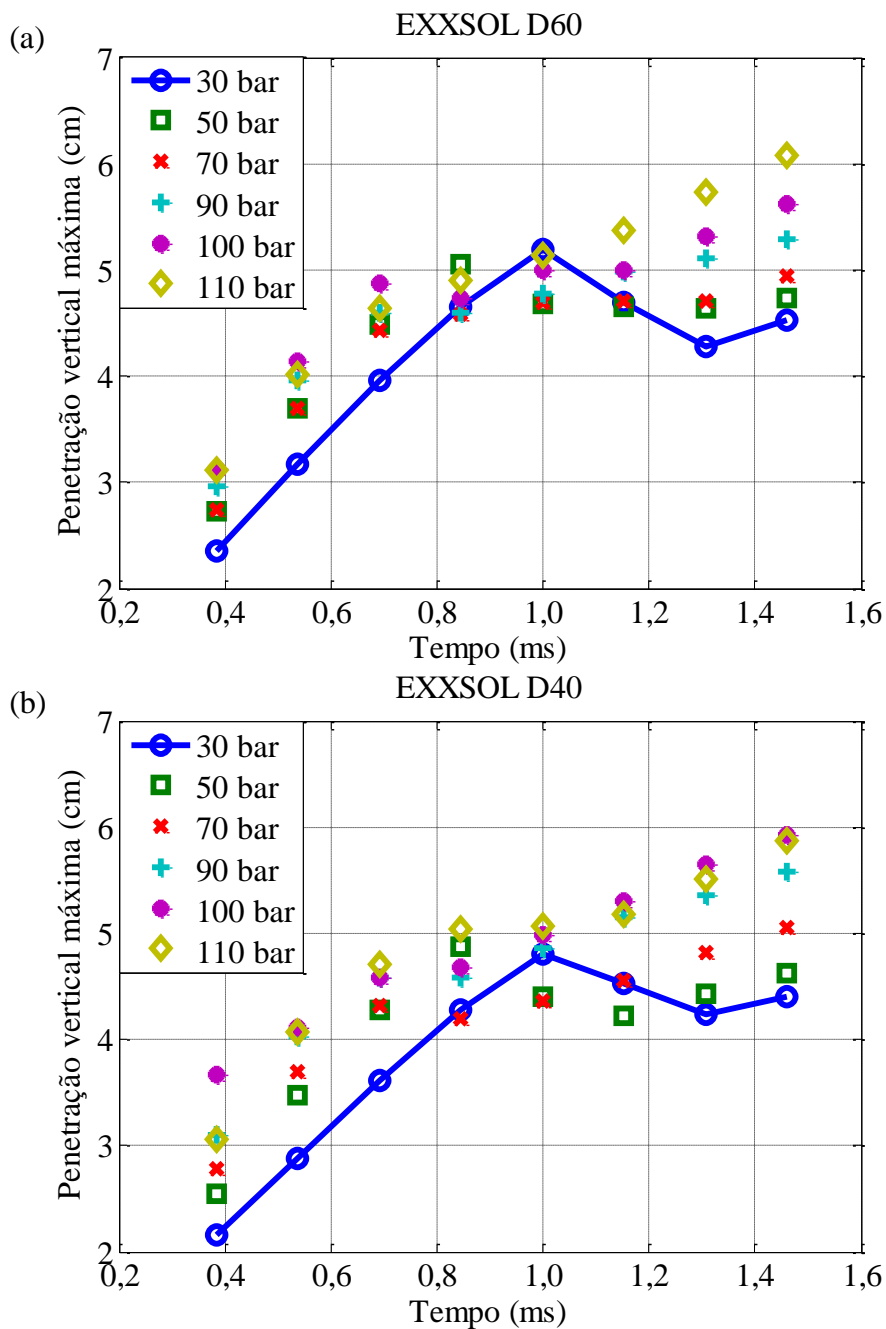


Figura 5.7 – (a) Penetração do EXXSOL D60 e (b) penetração do EXXSOL D40 para várias pressões.

De forma geral pode ser observada uma diferença no comportamento dos dados entre o início e o fim da evolução dos *sprays*. Para os instantes iniciais existe uma tendência linear dos dados fortemente ascendente. Para instantes maiores, mais próximos ao final da injeção, a tendência de crescimento linear é menor.

Uma hipótese para a diferença do comportamento entre os instantes iniciais e os instantes mais próximos ao fim da injeção nos dados de penetração vertical máxima seria a velocidade maior do *pré-spray* relativa ao *spray* principal. Nos instantes iniciais é provável que a inclinação dos dados em (cm/s) represente a velocidade do *pré-spray* enquanto para os instantes maiores, a inclinação está relacionada com a velocidade do *spray* principal. Isso porque o *pré-spray* se dispersa de tal forma que a concentração de líquido se torna pequena. Concentrações pequenas de líquido estão associadas com baixas intensidades de pixels. Assim o critério de detecção de borda passa a desconsiderar o *pré-spray* em certo momento da injeção.

Em alguns casos há até uma queda da penetração como pode ser bem observado para o caso da injeção com pressão de 30 bar para os dois fluidos e com as disposições dos dados destacadas com as linhas azuis sólidas. Essas linhas mostram que próximo de 1,00 ms inicia-se um comportamento decrescente.

A Figura 5.8 mostra a evolução temporal dos dados das bordas do EXXSOL D60 injetado a 30 bar. É perceptível a queda da penetração vertical máxima entre os instantes de 1,00 ms e 1,15 ms. O *pré-spray* ainda presente no instante 1,00 ms passa a não ser mais detectável no critério de corte para o instante 1,15 ms. Essa observação está coerente com a queda verificada na penetração nos dados de 30 bar da Figura 5.7.

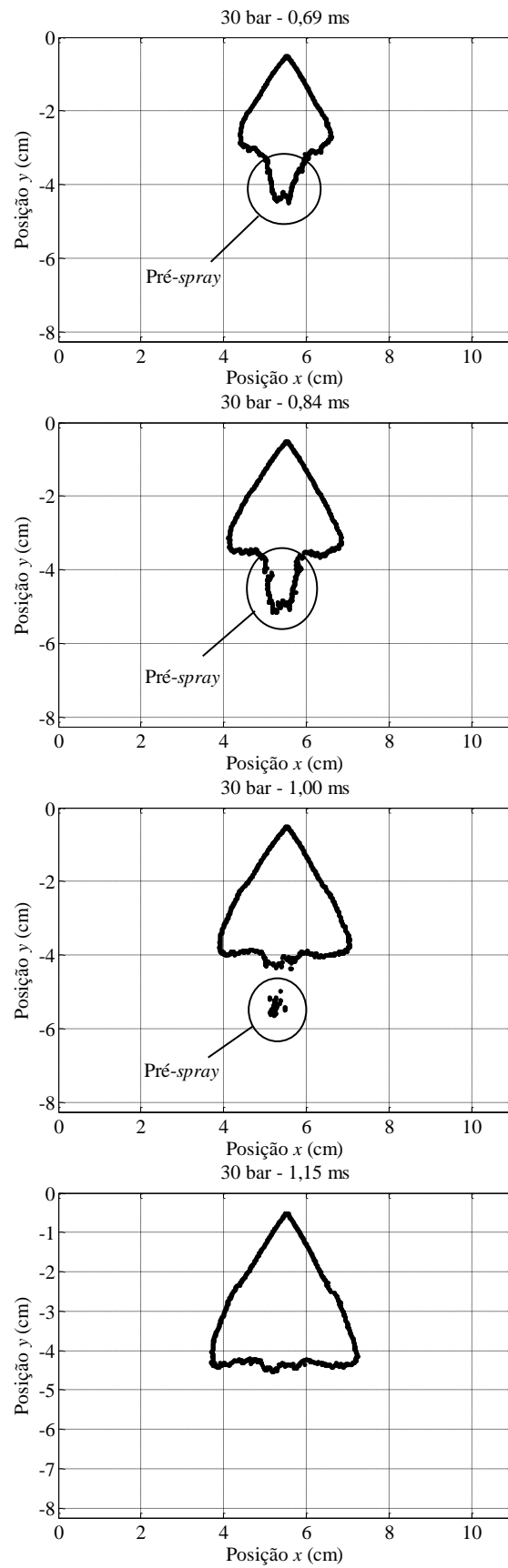


Figura 5.8 – Evolução temporal do *spray* de EXXSOL D60 injetado com pressão de 30 bar mostrando a queda na penetração vertical máxima.

A Figura 5.9 mostra a comparação das penetrações das extremidades do *spray* (vertical máxima) com a penetração do diâmetro máximo para o EXXSOL D60 e para todas as pressões testadas e a Figura 5.10 mostra a mesma comparação para o EXXSOL D40. As faixas de erros aleatórios determinadas pelos cálculos das incertezas da média estão mostradas nos gráficos.

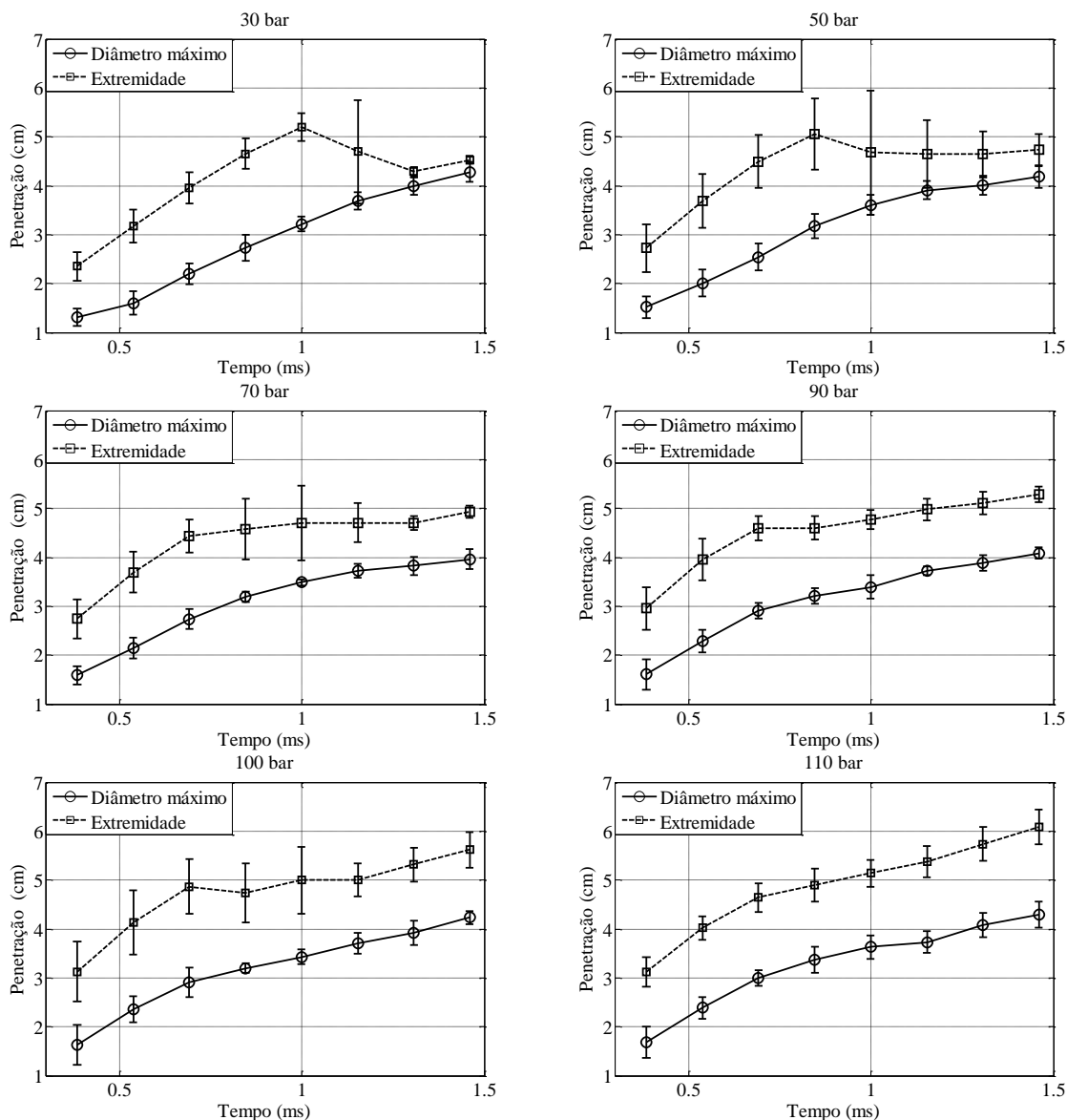


Figura 5.9 – Penetração da extremidade e penetração do diâmetro máximo do *spray* de EXXSOL D60.

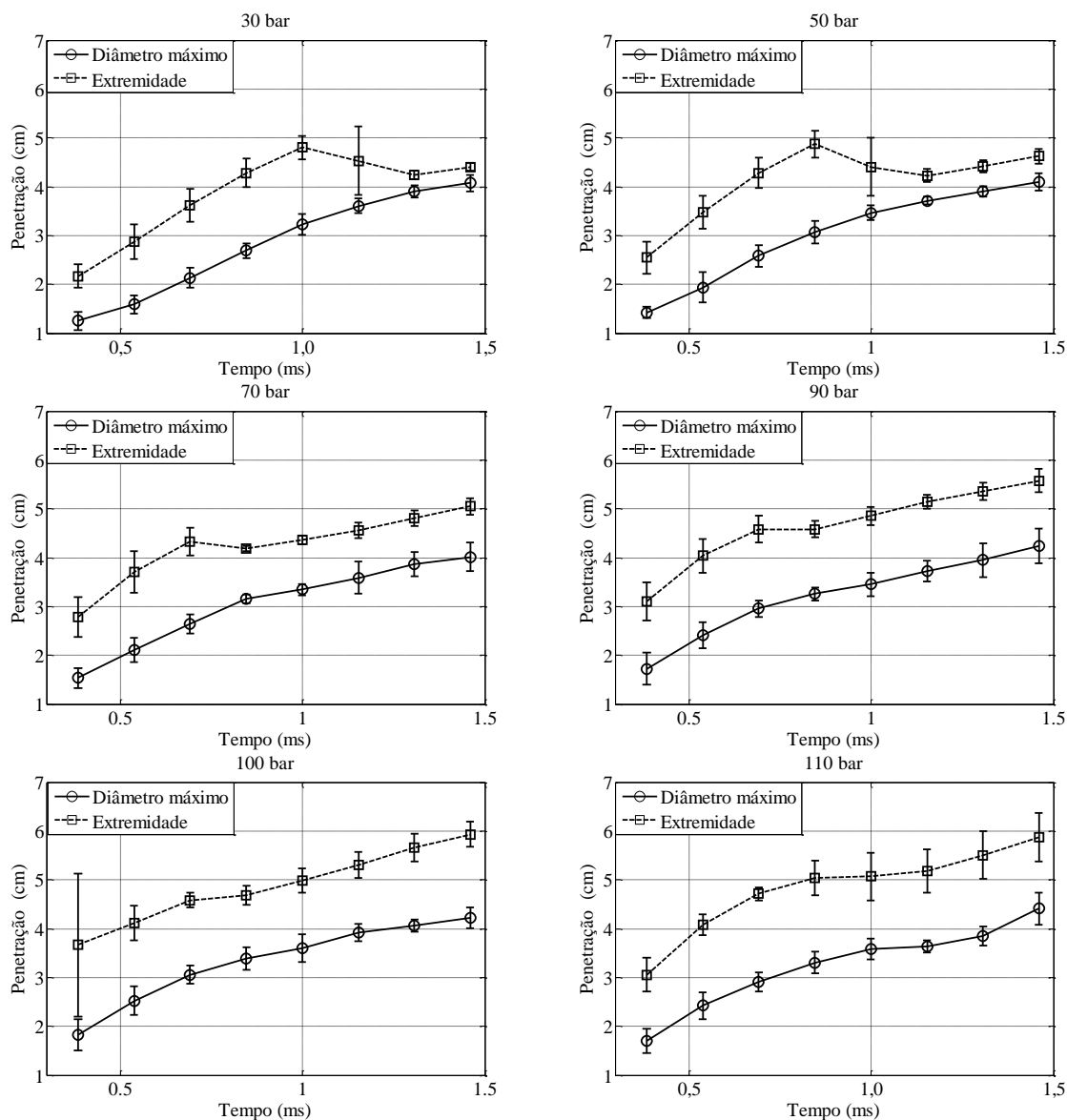


Figura 5.10 – Penetração da extremidade e penetração do diâmetro máximo do *spray* de EXXSOL D40.

A Figura 5.11 ajuda a compreender melhor a diferença das duas penetrações medidas nas Figuras 5.9 e 5.10 para um exemplo de injeção de EXXSOL D60 com 100 bar de pressão e tempo de 0,69 ms após o início da injeção. Observa-se que a maior parte da diferença entre as duas curvas obtidas para as duas penetrações se deve ao pré-*spray* que é levado em consideração apenas na penetração da extremidade.

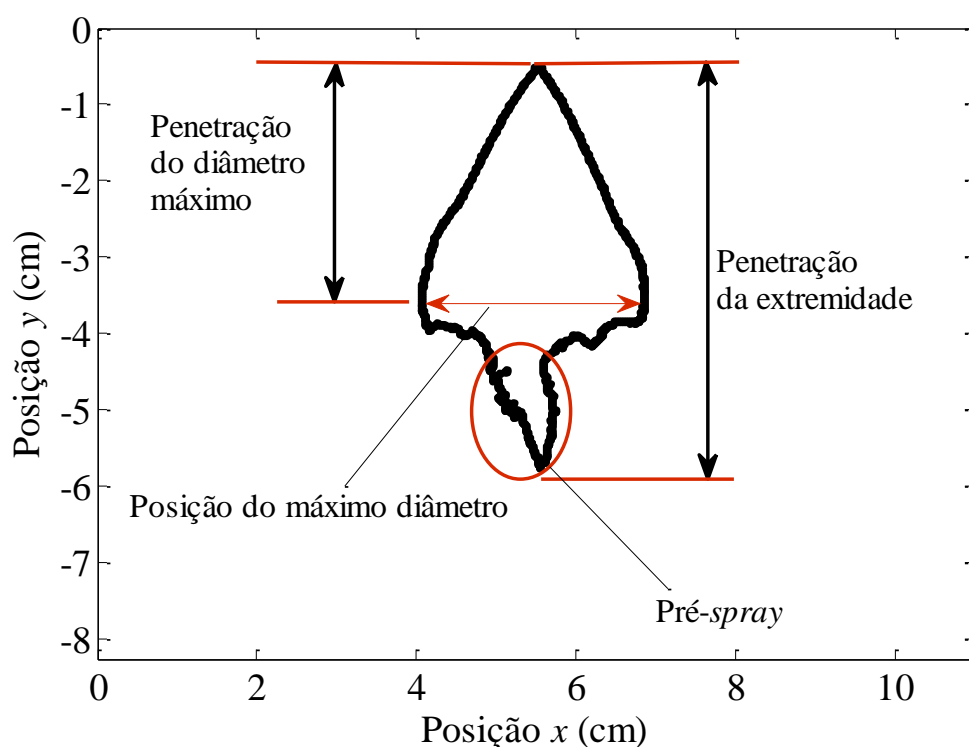


Figura 5.11 – Visualização da diferença entre penetração do diâmetro máximo e penetração da extremidade de um *spray* de EXXSOL D60.

A Figura 5.12 mostra a comparação da penetração do diâmetro máximo do EXXSOL D60 na ordenada com aquela do EXXSOL D40 na abscissa para as mesmas condições operacionais, ou seja, os pares de dados foram reunidos considerando a mesma pressão e o mesmo tempo após o início da injeção.

Um ajuste linear passando pela origem foi realizado e o coeficiente angular da reta obtida de 1,001 mostrou grande similaridade entre os dois fluidos. A comparação foi realizada levando em consideração a penetração do diâmetro máximo porque a metodologia empregada capta melhor essa característica do *spray* que a penetração da sua extremidade, que é afetada pelo *pré-spray*.

A metodologia para cálculo da penetração demonstra limitações quando o *pré-spray* é considerado, mas consegue captar de forma coerente o comportamento do *spray* principal por meio da penetração do diâmetro máximo.

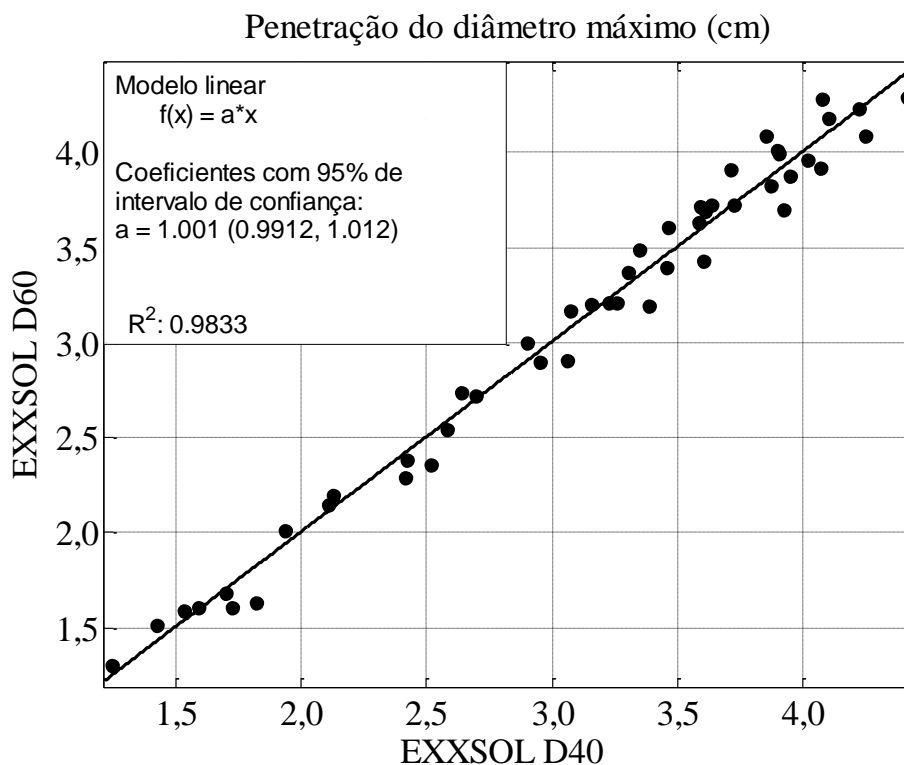


Figura 5.12 – Penetração do EXXSOL D60 em função da Penetração do EXXSOL D40 nas mesmas condições.

Uma análise de variância foi realizada para comparar os dados fornecidos pelas cinco injeções em cada pressão, e em cada tempo após o início da injeção. A hipótese nula dos testes se refere à igualdade entre as médias das penetrações dos dois fluidos para o mesmo tempo após o início da injeção. Para cada tempo existem cinco valores de penetrações para cada fluido. Os resultados para o caso específico da injeção a 100 bar encontram-se na Tabela 5.4.

A Tabela 5.4 indica que para um nível de significância igual a 5%, teríamos médias semelhantes para os dois fluidos em todos os tempos após o início da injeção. Todos os valores P ficam acima de 0,05. Os testes para outras pressões mostraram também que os dois fluidos são semelhantes.

No trabalho de ALEIFERIS; VAN ROMUNDE, 2013, com o aumento da temperatura do corpo de um injetor de injeção direta, houve aumento na penetração, pela diminuição da viscosidade do fluido, como já mencionado no item 3.7 deste trabalho. No presente trabalho, no entanto, a diferença de viscosidades mostrada na Tabela 4.1, não foi capaz de promover diferença na penetração. Isso ocorreu para a penetração do diâmetro máximo dos *sprays* que é diferente da penetração da extremidade do *spray*, variável considerada em ALEIFERIS; VAN

ROMUNDE, 2013. Além disso o injetor de injeção direta aqui analisado é do tipo *pressure-swirl*, enquanto em ALEIFERIS; VAN ROMUNDE, 2013 o injetor utilizado é o de múltiplos orifícios.

Tabela 5.4 – Resultados da análise de variância para a pressão de injeção de 100 bar para penetração.

Tempo (ms)	Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média Quadrática	F	Valor P
0,38	Fluido	0,09291	1	0,09291	1,07	0,3317
	Erro	0,69612	8	0,08701		
	Total	0,78903	9			
0,54	Fluido	0,06697	1	0,06697	1,31	0,2847
	Erro	0,40751	8	0,05094		
	Total	0,47449	9			
0,69	Fluido	0,0548	1	0,0548	1,29	0,2881
	Erro	0,33864	8	0,04233		
	Total	0,39345	9			
0,85	Fluido	0,09541	1	0,09541	4,94	0,0569
	Erro	0,15451	8	0,01931		
	Total	0,24991	9			
1,00	Fluido	0,07544	1	0,07544	2,28	0,1597
	Erro	0,26504	8	0,03313		
	Total	0,34047	9			
1,15	Fluido	0,1221	1	0,1221	4,93	0,0571
	Erro	0,19799	8	0,02475		
	Total	0,32008	9			
1,31	Fluido	0,054	1	0,054	2,06	0,1903
	Erro	0,21094	8	0,02637		
	Total	0,26495	9			
1,46	Fluido	0,00038	1	0,00038	0,02	0,8946
	Erro	0,16134	8	0,02017		
	Total	0,16171	9			

Na literatura, é possível encontrar correlações para penetração de *sprays* de injetores Diesel. LEFEBVRE, 1989, cita algumas dessas correlações. Correlações para injetores de injeção direta de gasolina no entanto, não são facilmente encontradas.

Conforme o modelo de HIROYASU; ARAI, 1990, para a penetração dos *sprays* Diesel existem dois diferentes tipos de comportamentos. O primeiro deles é um comportamento linear da penetração com o tempo descrito pela Equação (5.3) para o instante zero até o instante necessário à desintegração ou quebra do jato líquido. Esse tempo é calculado pela Equação (5.5). O segundo comportamento mostrado na Equação (5.4) leva em consideração a

penetração das gotas geradas pela ruptura do jato e possui então crescimento menor com o tempo t .

$$t < t_{Quebra}: S_{Diesel} = 0,39 \cdot \left(\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_{ar}} \right)^{0,5} \cdot t \quad (5.3)$$

$$t > t_{Quebra}: S_{Diesel} = 2,95 \cdot \left(\frac{\Delta P}{\rho_{ar}} \right)^{0,25} \cdot (D_0 \cdot t)^{0,5} \quad (5.4)$$

$$t_{Quebra} = \frac{28,65 \cdot \rho_L \cdot D_0}{(\rho_{ar} \cdot \Delta P)^{0,5}} \quad (5.5)$$

Nas Equações (5.3), (5.4) e (5.5) ΔP é a diferença de pressão através do injetor, ρ_{ar} é a massa específica do ar, D_0 , o diâmetro do orifício, t é o tempo após o início da injeção e ρ_L a massa específica do líquido. O gráfico da Figura 5.13 mostra as curvas determinadas pelo modelo de Hiroyasu e Arai para as pressões testadas neste trabalho e para os dois fluidos simulacros. A Figura 5.13 (a) para o EXXSOL D60 e a Figura 5.13 (b) para o EXXSOL D40. Os gráficos são parecidos porque o único parâmetro diferente na construção dos gráficos é a massa específica do líquido ρ_L . A diferença nas massas específicas do EXXSOL D60 ($782,6 \text{ kg/m}^3$) e EXXSOL D40 ($780,5 \text{ kg/m}^3$) é de apenas $2,1 \text{ kg/m}^3$.

A Figura 5.13 (a) e (b) mostra que se for aplicado o modelo de (HIROYASU; ARAI, 1990), para injetores Diesel ao caso do injetor *pressure-swirl* deste trabalho o comportamento da penetração seria linear em todo o período de injeção de 1,5 ms. De fato, a estimativa para o tempo de quebra calculado pela Equação (5.5) é maior que a duração do pulso de injeção de 1,5 ms para todos os casos analisados e assim a Equação (5.4) que mostra a dependência linear da penetração com o tempo é aplicada. O modelo do caso dos injetores Diesel portanto é inadequado para injetores *pressure-swirl* por não captar a curvatura da penetração.

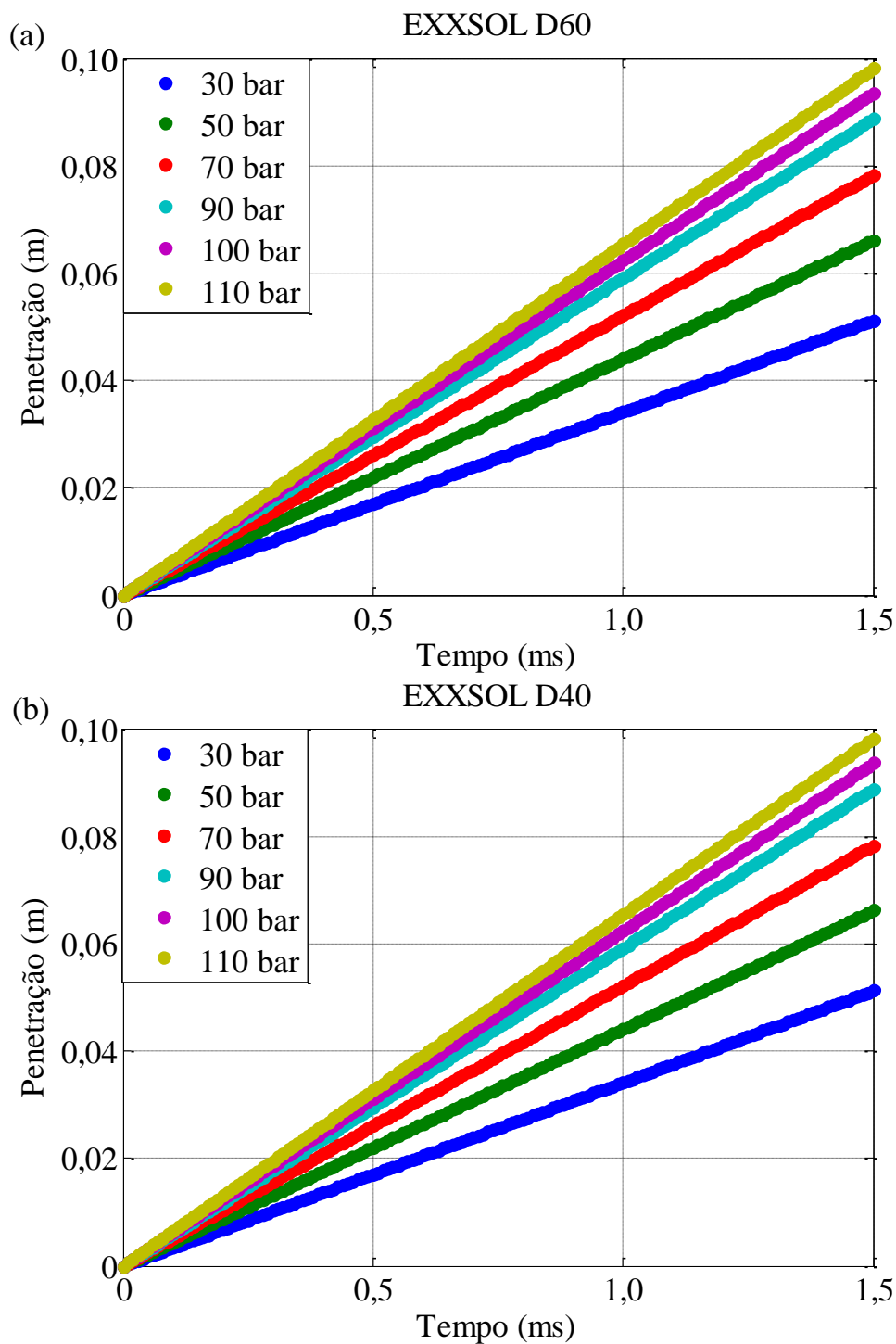


Figura 5.13 – Penetração calculada pela correlação de HIROYASU; ARAI, 1990 para (a) EXXSOL D60 e (b) EXXSOL D40.

Injetores Diesel fornecem *sprays* de cone sólido e geralmente trabalham com pressões muito superiores aos injetores de injeção direta de gasolina. Essas diferenças podem refletir na inadequação das diversas correlações encontradas na literatura para a penetração dos injetores Diesel se aplicadas para injetores de injeção direta de gasolina.

5.1.4 Correlações para a penetração do diâmetro máximo

No item 5.1.3 foi mostrado que as correlações do caso de injetores Diesel não são coerentes com as penetrações dos *sprays* dos injetores *pressure-swirl*. As características de operação dos injetores e as características dos *sprays* são diferentes.

A Equação (5.6) mostra a forma geral da equação que foi ajustada aos dados experimentais da penetração do diâmetro máximo S dos *sprays* do injetor *pressure-swirl* utilizado neste trabalho.

$$\frac{S}{D} = k \cdot (Re)^a \cdot (We)^b \cdot \left(\frac{Eu}{2}\right)^c \cdot \left(\frac{Vt}{D}\right)^d \quad (5.6)$$

A Tabela 5.5 mostra os expoentes a , b , c e d obtidos através da regressão linear multivariável, para as três correlações para a penetração: a primeira utilizando o diâmetro do orifício D_0 como comprimento característico e a velocidade média de saída do fluido do injetor V_0 , a segunda utilizando D_{10} e a velocidade média das partículas V_p e a terceira utilizando D_{32} e também a velocidade média das partículas V_p . A regressão linear multivariável foi realizada de forma que o fator multiplicador k seja igual a 1. No entanto, um segundo ajuste foi realizado sobre o gráfico do número adimensional da penetração (S/D) em função do produto das potências dos números adimensionais $(Re)^a(We)^b(Eu/2)^c(Vt/D)^d$, porque os expoentes a , b , c e d foram aproximados na segunda casa decimal e então k foi modificado para funcionar como um fator de correção.

O coeficiente angular da segunda regressão foi tomado como o valor de k . Essa segunda regressão linear é univariável. Os gráficos obtidos estão mostrados na Figura 5.14. As Equações (5.7), (5.12) e (5.17) representam as correlações obtidas. As faixas dos números adimensionais estão mostradas nas Equações de (5.8) até (5.11) para a correlação com comprimento característico D_0 , (5.13) até (5.16) para a correlação com comprimento característico D_{10} e Equações (5.18) até (5.21) para a correlação utilizando o comprimento característico D_{32} . Os extremos das faixas foram aproximados para a casa das dezenas, exceto para o número de Euler, que foi aproximado na segunda casa decimal.

Tabela 5.5 – Expoentes dos números adimensionais da correlação para o diâmetro máximo

	a	b	c	d
D_0 e V_0	0,31	-0,24	1,32	0,73
D_{10} e V_p	0,93	-0,71	0,84	0,74
D_{32} e V_p	0,69	-0,45	0,46	0,73

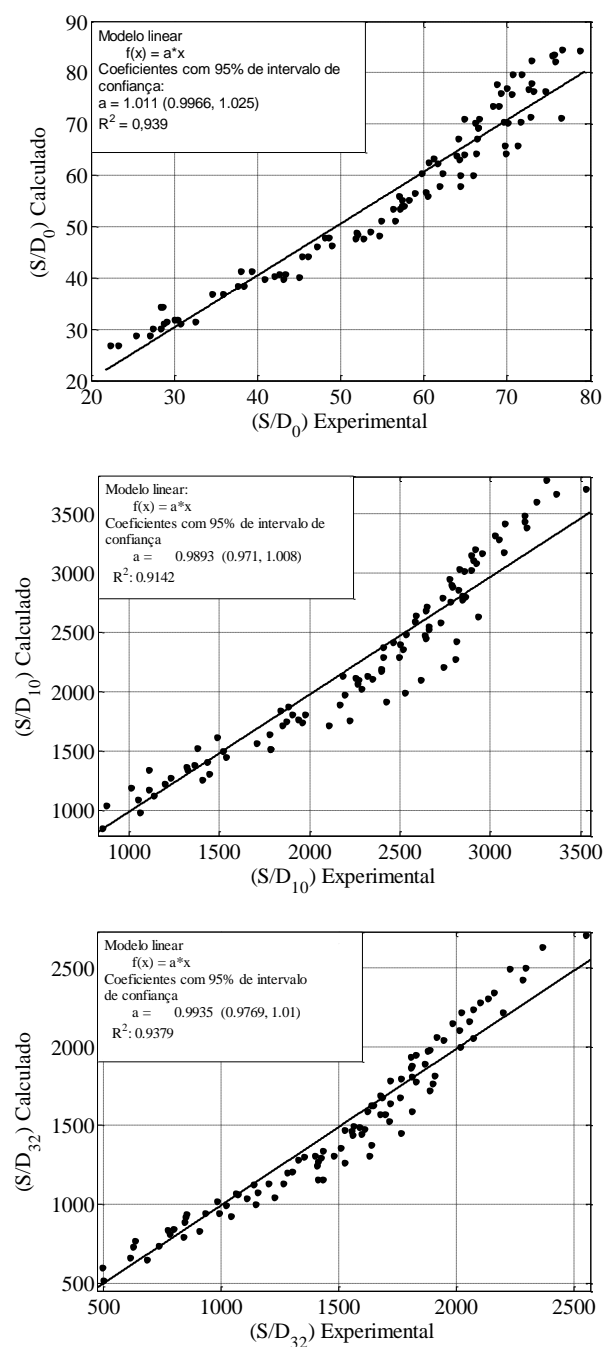


Figura 5.14 – Comparação entre resultados da correlação e resultados experimentais para os fluidos de trabalho.

$$\frac{S}{D_0} = 1,011 \cdot \left(\frac{\rho V_0 D_0}{\mu}\right)^{0,31} \cdot \left(\frac{\rho V_0^2 D_0}{\sigma}\right)^{-0,24} \cdot \left(\frac{\Delta P}{\rho V_0^2}\right)^{1,32} \cdot \left(\frac{V_0 t}{D_0}\right)^{0,73} \quad (5.7)$$

$$17210 \leq \frac{\rho V_0 D_0}{\mu} \leq 72890 \quad (5.8)$$

$$27230 \leq \frac{\rho V_0^2 D_0}{\sigma} \leq 277430 \quad (5.9)$$

$$0,80 \leq \left(\frac{\Delta P}{\rho V_0^2}\right) \leq 1,20 \quad (5.10)$$

$$40 \leq \frac{V_0 t}{D_0} \leq 320 \quad (5.11)$$

$$\frac{S}{D_{10}} = 0,989 \cdot \left(\frac{\rho V_p D_{10}}{\mu}\right)^{0,93} \cdot \left(\frac{\rho V_p^2 D_{10}}{\sigma}\right)^{-0,71} \cdot \left(\frac{\Delta P}{\rho V_p^2}\right)^{0,84} \cdot \left(\frac{V_p t}{D_{10}}\right)^{0,74} \quad (5.12)$$

$$280 \leq \frac{\rho V_p D_{10}}{\mu} \leq 510 \quad (5.13)$$

$$530 \leq \frac{\rho V_p^2 D_{10}}{\sigma} \leq 1600 \quad (5.14)$$

$$3,30 \leq \left(\frac{\Delta P}{\rho V_p^2}\right) \leq 4,60 \quad (5.15)$$

$$850 \leq \frac{V_p t}{D_{10}} \leq 7280 \quad (5.16)$$

$$\frac{S}{D_{32}} = 0,994 \cdot \left(\frac{\rho V_p D_{32}}{\mu}\right)^{0,69} \cdot \left(\frac{\rho V_p^2 D_{32}}{\sigma}\right)^{-0,45} \cdot \left(\frac{\Delta P}{\rho V_p^2}\right)^{0,46} \cdot \left(\frac{V_p t}{D_{32}}\right)^{0,73} \quad (5.17)$$

$$480 \leq \frac{\rho V_p D_{32}}{\mu} \leq 510 \quad (5.18)$$

$$930 \leq \frac{\rho V_p^2 D_{32}}{\sigma} \leq 2210 \quad (5.19)$$

$$3,30 \leq \left(\frac{\Delta P}{\rho V_p^2}\right) \leq 4,60 \quad (5.20)$$

$$530 \leq \frac{V_p t}{D_{32}} \leq 5250 \quad (5.21)$$

O erro percentual médio das correlações com os dados experimentais usando o diâmetro do orifício D_0 foi de 6,4%, enquanto as correlações com o diâmetro médio D_{10} e o diâmetro de Sauter D_{32} foram respectivamente de 7,5% e 7,2%. Os histogramas com as frequências de todos os erros estão mostrados na Figura 5.15.

Correlações para a penetração de injetores Diesel são comumente encontradas na literatura e algumas são citadas em LEFEBVRE, 1989 e BAUMGARTEN, 2006. Correlações para a penetração e ângulos de *sprays* de injetor de injeção direta com múltiplos orifícios também podem ser encontradas em ZENG et al., 2012. Algumas correlações para *sprays* produzidos por injetores de injeção direta do tipo *pressure-swirl* são derivadas para o diâmetro médio de Sauter e também são citadas em BAUMGARTEN, 2006.

Difícilmente são encontradas na literatura correlações para a penetração dos *sprays* produzidos por injetores *pressure-swirl*.

A correlação da Equação (5.7) envolve, além das propriedades físicas do fluido, apenas parâmetros macroscópicos como a penetração e a velocidade média obtida da vazão volumétrica do injetor.

As Equações (5.12) e (5.17) por sua vez representam uma conexão entre o parâmetro macroscópico de penetração com os parâmetros microscópicos constituídos pelos diâmetros médios e pelas velocidades das partículas.

As correlações das Equações (5.7), (5.12) e (5.17) foram obtidas utilizando os fluidos EXXSOL D60 e EXXSOL D40 que possuem propriedades físicas parecidas. Testes com a água que é um fluido com propriedades bem diferentes dos fluidos de trabalho foram também realizados e com os resultados experimentais disponíveis, a correlação da Equação (5.7) foi testada.

A Figura 5.16 mostra a penetração de água experimental junto à penetração calculada pela correlação para o caso específico com pressão de injeção de 100 bar no intervalo total de tempo de injeção entre 0 e 1,5 milissegundos.

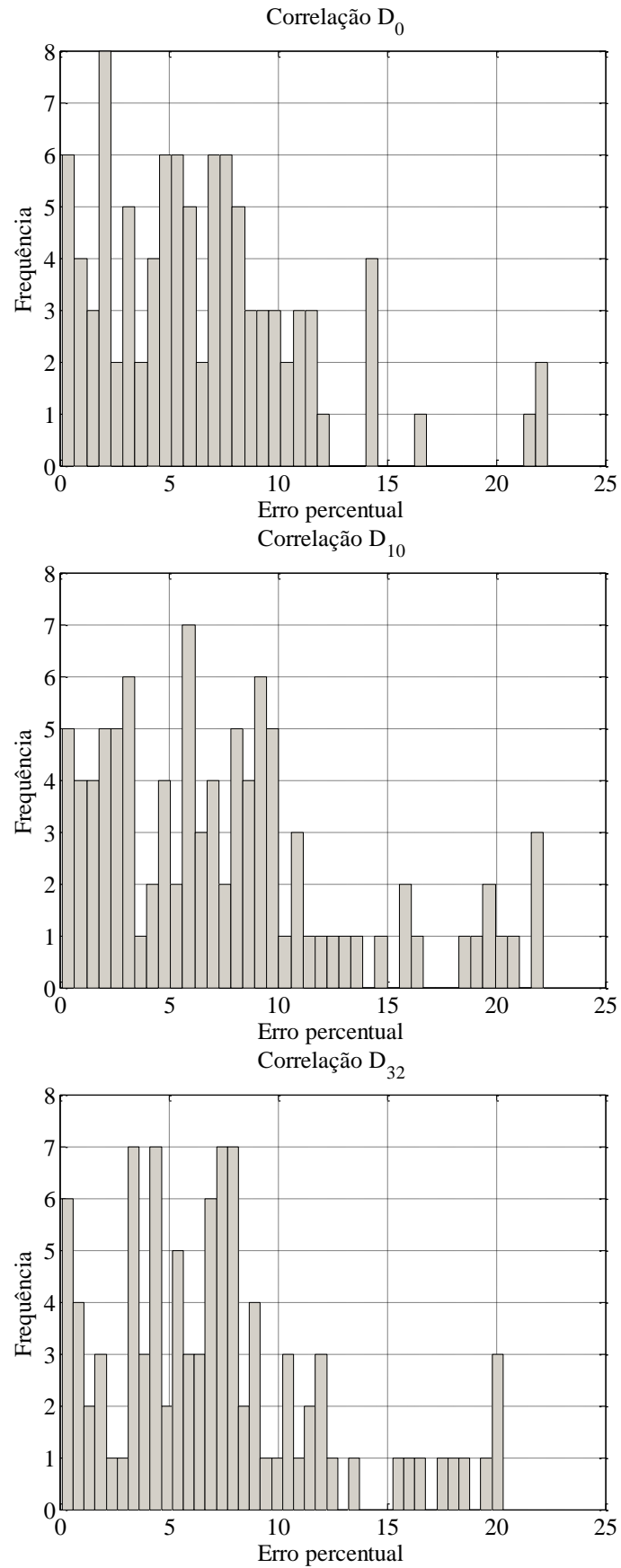


Figura 5.15– Histogramas para os erros da Correlação comparados com dados experimentais dos fluidos simulacros.

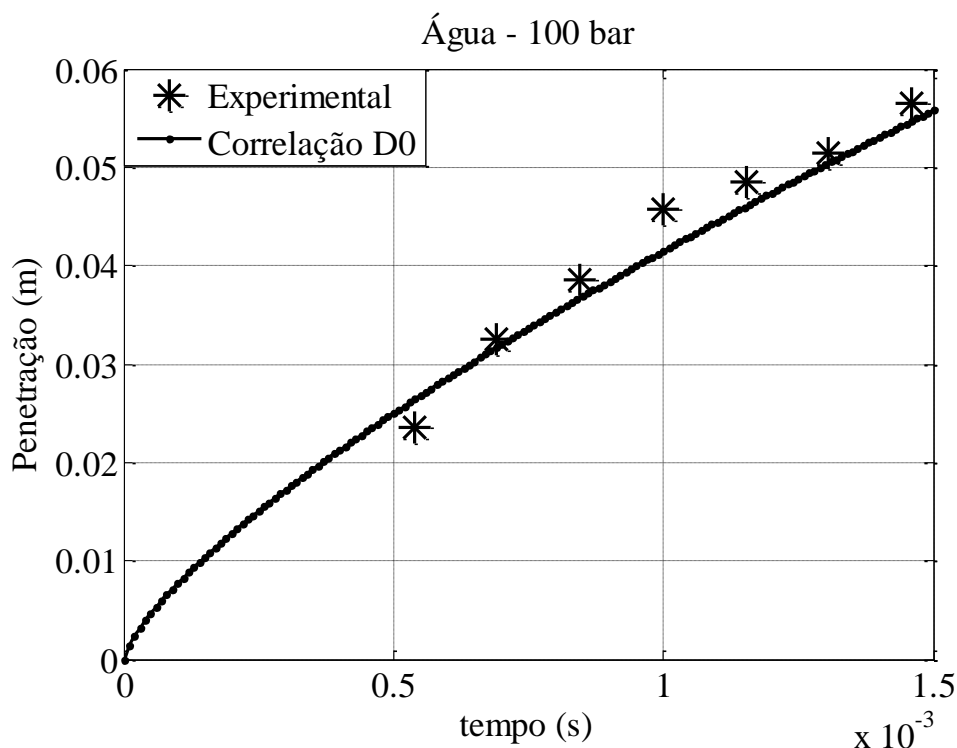


Figura 5.16 – Comparação entre a penetração experimental de água com a penetração obtida da correlação.

A Figura 5.16 mostra que a correlação da Equação (5.7) subestima a penetração da água para a maioria dos pontos experimentais. No entanto a curva calculada segue bem a tendência desses pontos. A Figura 5.17 mostra todos os dados de penetração da água calculados pela Equação (5.7) em função dos resultados experimentais junto com uma reta bissetriz que representa o lugar geométrico onde os valores calculados e os valores experimentais são iguais.

Os pontos acima da reta bissetriz indicam penetração calculada maior que a penetração experimental enquanto os pontos abaixo representam o inverso. A Figura 5.17 mostra que a correlação superestimou os dados experimentais da água até uma penetração de aproximadamente 0,03 m ou 3 centímetros. Acima de 3 centímetros é verificada uma mudança de comportamento e a correlação subestima os dados experimentais. Esse também é o caso mostrado na Figura 5.16 onde o único ponto de penetração abaixo de 0,03 m está abaixo da curva calculada enquanto os demais pontos estão acima dela.

A Tabela 5.6 mostra os erros percentuais médios da correlação com os dados da água para cada pressão e a Figura 5.18 mostra o histograma dos erros para todos os dados experimentais.

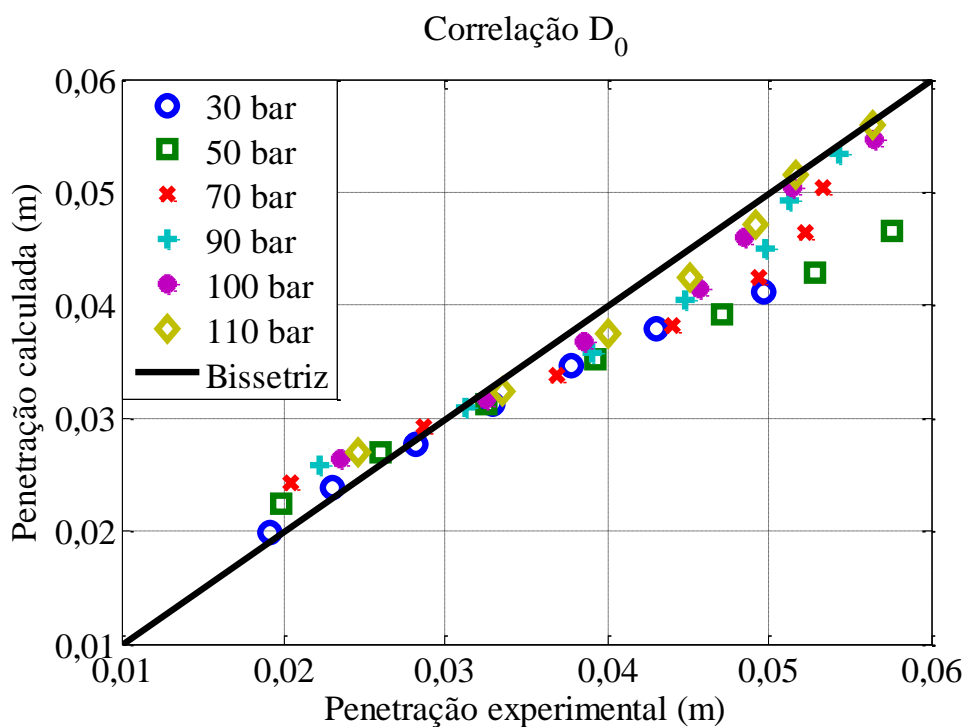


Figura 5.17 – Penetração calculada e penetração experimental para a água em todas as pressões testadas.

Tabela 5.6 – Erros da correlação aplicada à injeção de água para todas as pressões.

Pressão de injeção	Erro percentual médio
30 bar	7,4 %
50 bar	12,3 %
70 bar	10,5 %
90 bar	7,1 %
100 bar	5,5 %
110 bar	4,3 %

A Tabela 5.6 mostra que a correlação tem melhor concordância com os dados experimentais para as pressões mais altas testadas de 90, 100 e 110 bar. As pressões mais altas são mais realistas quanto a faixa de operação do injetor. O erro médio considerando todas as pressões ficou em 7,8%.

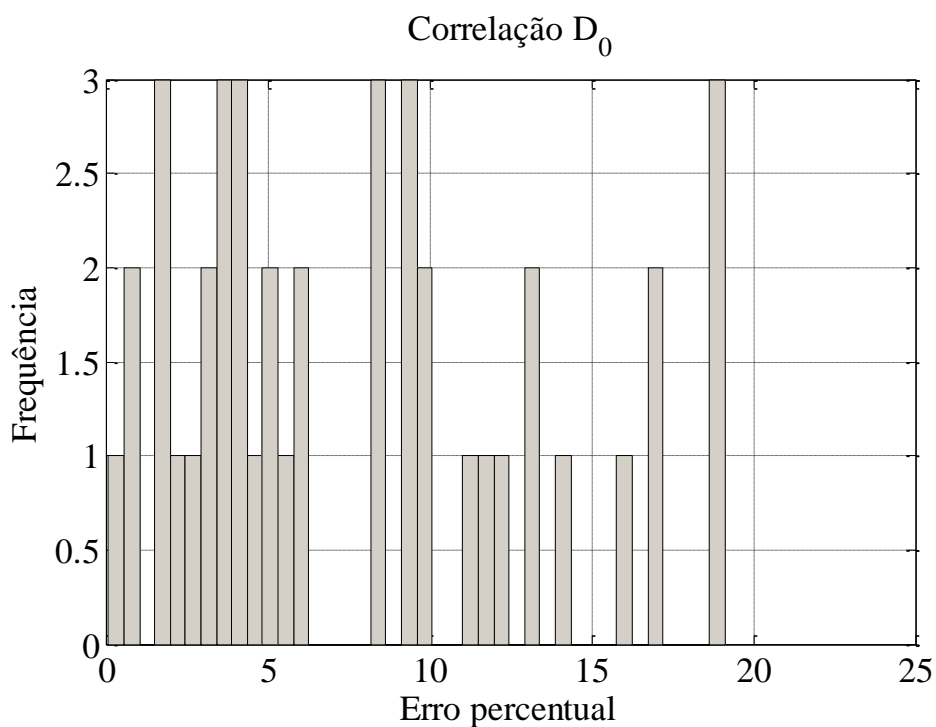


Figura 5.18 – Histogramas para os erros da Correlação D_0 para a penetração comparados aos dados experimentais da água.

5.1.5 Medição do Volume dos *sprays*

O comportamento do volume formado pelos *sprays* em função do tempo para todas as pressões pode ser visto na Figura 5.19 (a) para o EXXSOL D60 e na Figura 5.19 (b) para o EXXSOL D40. Percebe-se pela análise dos gráficos que quanto maior a pressão de injeção maior é o volume desenvolvido do *spray*. Tal fato é um resultado esperado e intuitivo, pois quanto maior a pressão de injeção, maior é a quantidade de movimento imposta ao fluido, maior é a penetração do *spray* principal e assim maior também é o volume desenvolvido do *spray*.

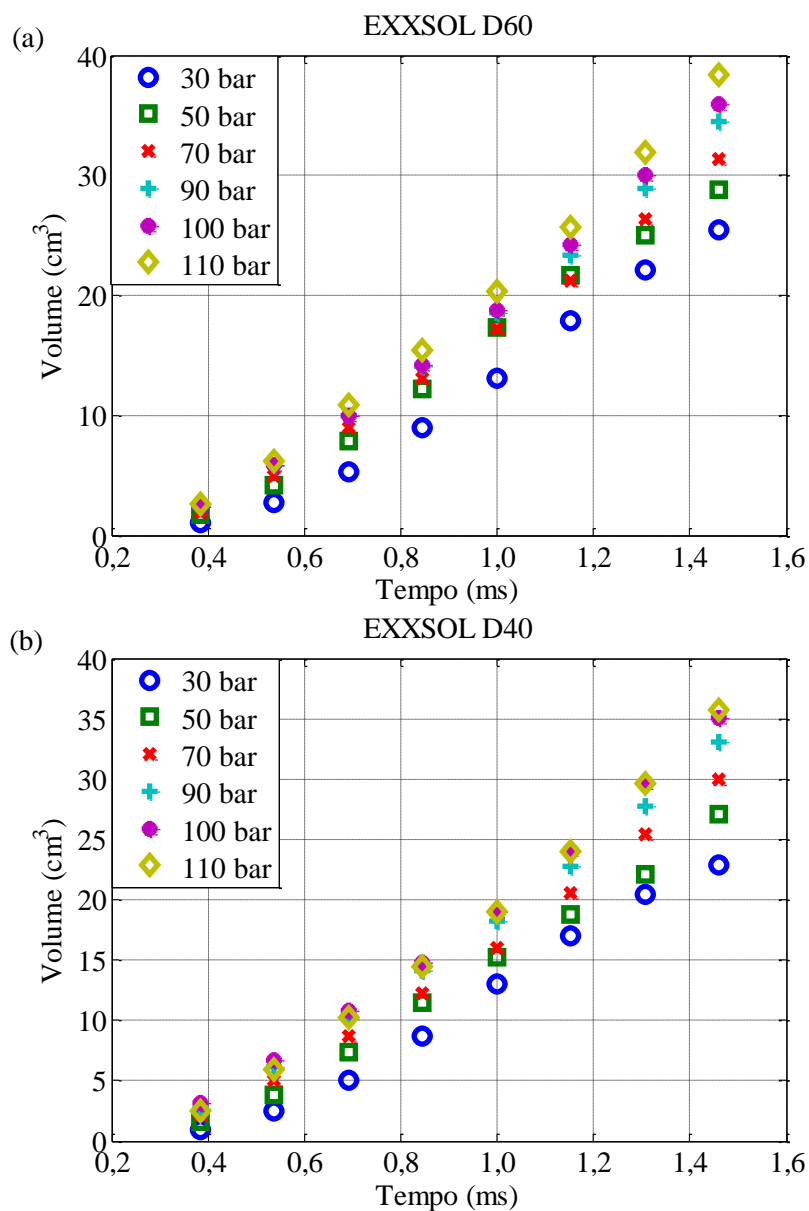


Figura 5.19 – Volume total dos *sprays* de (a) EXXSOL D60 e (b) EXXSOL D40 em função do tempo.

A comparação entre os dois fluidos de trabalho pode ser realizada através da observação da Figura 5.20 que mostra os dados de volume do EXXSOL D60 em função dos dados do EXXSOL D40.

O coeficiente angular obtido da reta de ajuste na Figura 5.20 de 1,05 sugere que os volumes totais dos *sprays* de EXXSOL D60, são em média, 5% maiores que os volumes do EXXSOL D40.

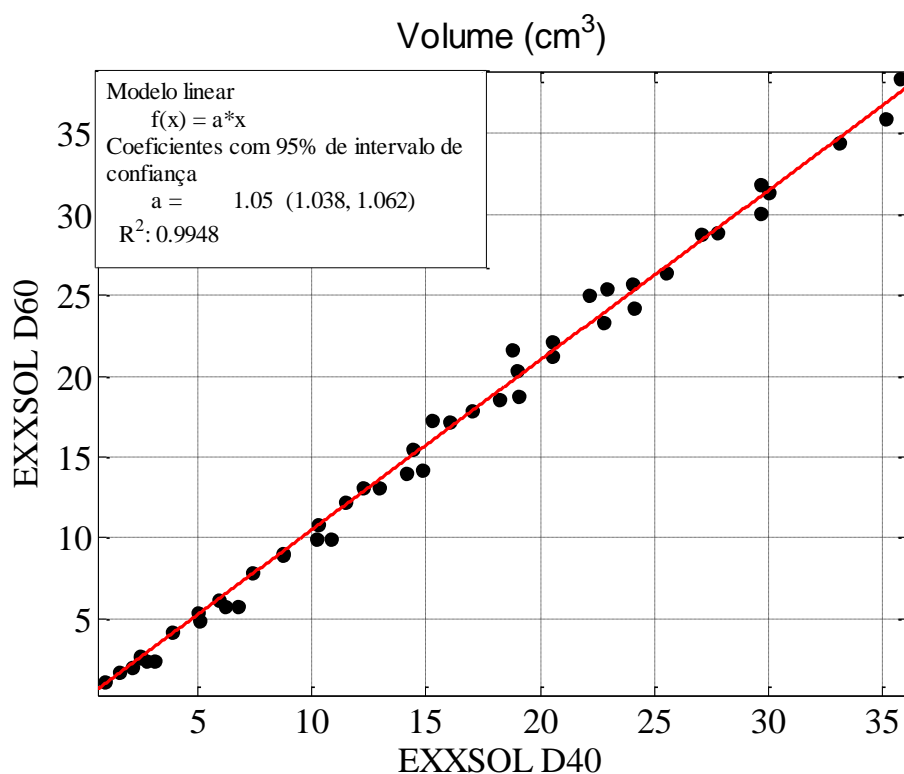


Figura 5.20 – Comparação da média do volume de EXXSOL D60 com a faixa de volume do EXXSOL D40.

Uma análise de variância também foi realizada para a pressão de 100 bar por meio da comparação das cinco injeções de cada fluido nos instantes de tempo após o início da injeção considerados. Os resultados estão na Tabela 5.7.

A hipótese nula testada pela Tabela 5.7 de análise de variância é a igualdade das médias dos volumes dos dois fluidos em cada tempo após o início da injeção contra a hipótese alternativa das médias dos volumes do EXXSOL D60 serem maiores. Os valores P sugerem que para um nível de significância do teste em 5%, e para todos os tempos analisados, obteríamos a conclusão, de que as médias não são diferentes. Todos os valores P da Tabela 5.7 são maiores que 0,05.

Tabela 5.7 – Resultados da análise de variância para a medição de volume na pressão de 100 bar.

Tempo (ms)	Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média Quadrática	F	Valor P
0,38	Fluido	1,27638	1	1,27638	1,56	0,2469
	Erro	6,54338	8	0,81792		
	Total	7,81976	9			
0,54	Fluido	2,1347	1	2,13467	1,25	0,2955
	Erro	13,6321	8	1,70402		
	Total	15,7668	9			
0,69	Fluido	1,6955	1	1,69553	0,86	0,3817
	Erro	15,8275	8	1,97844		
	Total	17,5231	9			
0,85	Fluido	0,898	1	0,89801	0,42	0,537
	Erro	17,2712	8	2,1589		
	Total	18,1692	9			
1,00	Fluido	0,1381	1	0,13809	0,05	0,8291
	Erro	22,2046	8	2,77557		
	Total	22,3427	9			
1,15	Fluido	0,0954	1	0,09543	0,02	0,8821
	Erro	32,5795	8	4,07243		
	Total	32,6749	9			
1,31	Fluido	0,4722	1	0,47215	0,09	0,7779
	Erro	44,3855	8	5,54819		
	Total	44,8577	9			
1,46	Fluido	1,6184	1	1,61843	0,24	0,6373
	Erro	53,9313	8	6,74141		
	Total	55,5497	9			

5.1.6 Correlação para os volumes dos *sprays*

No trabalho de DELACOURT; DESMET; BESSON, 2005, uma relação para os volumes dos *sprays* foi obtida para injeção com injetores Diesel. O volume foi relacionado com a penetração da extremidade do *spray* S_{tip} e o ângulo de cone θ na forma mostrada na Equação (5.22).

$$V = \frac{1}{3} \pi S_{tip}(t)^3 \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\frac{1 + 2 \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}{1 + \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} \right] \quad (5.22)$$

A Equação (5.22) mostra uma proporcionalidade direta do volume do *spray* Diesel com o cubo da penetração da extremidade do *spray* uma vez que os ângulos dos *sprays* Diesel são

essencialmente constantes. Para verificar se a proporcionalidade entre volume e cubo da penetração existe para o caso dos *sprays* produzidos por injetores *pressure-swirl*, trocando a penetração da extremidade S_{Tip} pela penetração do diâmetro máximo S , o gráfico da Figura 5.21 foi construído. Um ajuste linear passando pela origem reunindo todos os dados experimentais disponíveis também está mostrado na Figura 5.21.

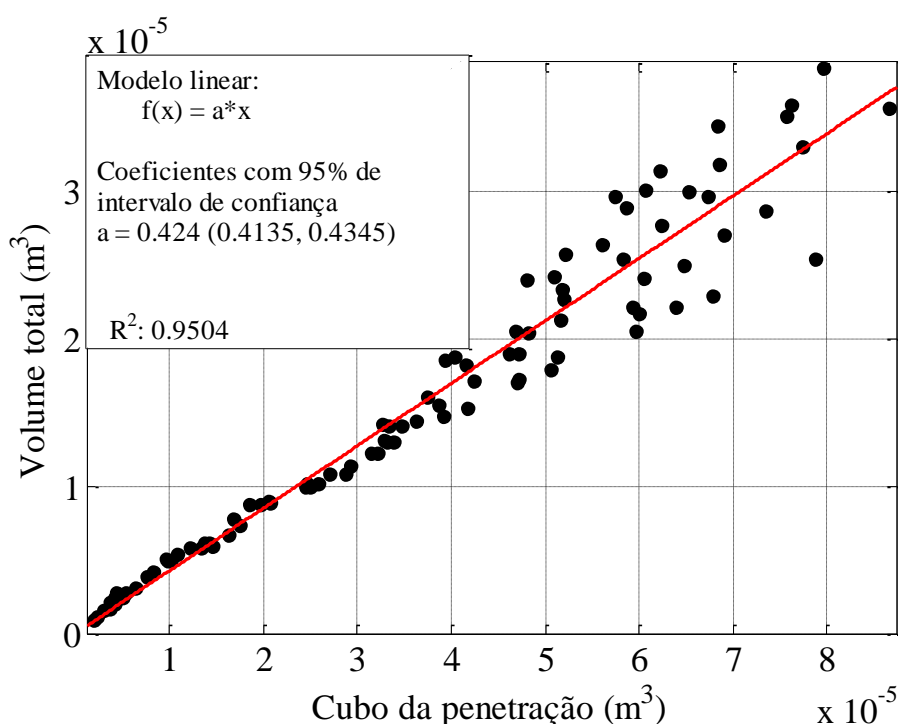


Figura 5.21 – Volume dos *Sprays* em função do cubo da penetração do diâmetro máximo.

Verifica-se uma boa concordância entre o volume dos *sprays* de cone oco com o cubo da penetração do diâmetro máximo com um coeficiente de determinação R^2 em torno de 0,95. Baseado na equação de ajuste mostrada na Figura 5.21 o volume do *spray* pode ser escrito na forma da Equação (5.23).

$$V = 0,424 \cdot S^3 \quad (5.23)$$

Se for substituída a Equação (5.7) para a penetração S na Equação (5.23) uma correlação para o volume dos *sprays* pode ser obtida. Essa correlação está mostrada na Equação (5.24)

$$\frac{V}{D_0^3} = 0,429 \cdot \left(\frac{\rho V_0 D_0}{\mu}\right)^{0,93} \cdot \left(\frac{\rho V_0^2 D_0}{\sigma}\right)^{-0,72} \cdot \left(\frac{\Delta P}{\rho V_0^2}\right)^{3,96} \cdot \left(\frac{V_0 t}{D_0}\right)^{2,19} \quad (5.24)$$

A comparação para a injeção de água a 100 bar dos valores dos volumes dos *sprays* calculados pela correlação com os valores experimentais está na Figura 5.22.

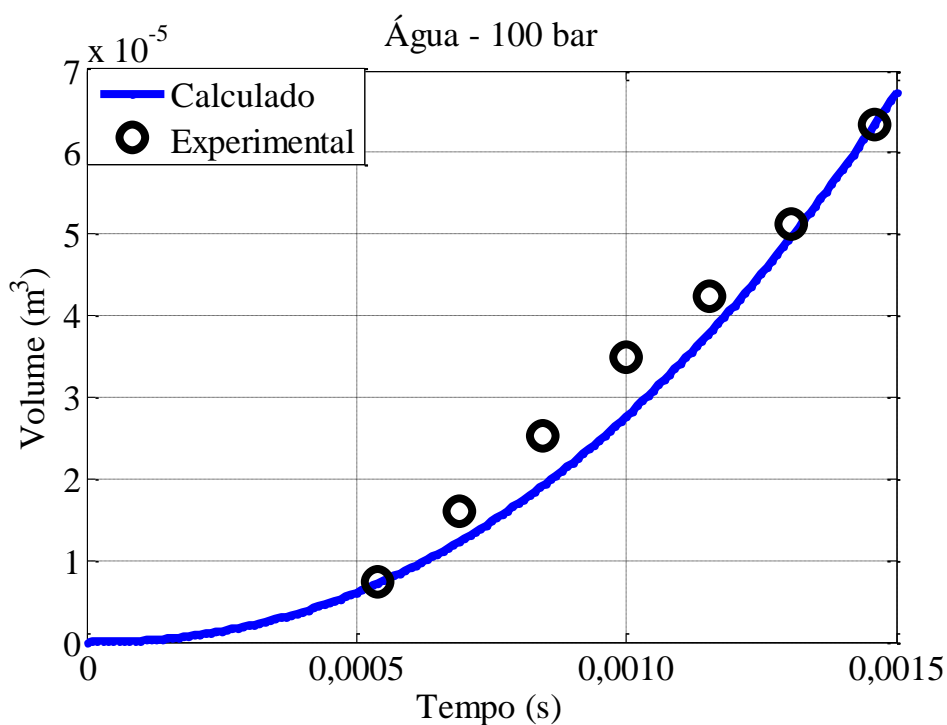


Figura 5.22 – Correlação de volume obtida com os fluidos EXXSOL D40 e EXXSOL D60 aplicada para dados de injeção de água.

Com o objetivo de comparar todos os pontos experimentais da água com a correlação obtida utilizando EXXSOL D60 e EXXSOL D40, o volume calculado da água pela correlação foi traçado em função do volume experimental na Figura 5.23 junto com a reta diagonal bissetriz, que representa o lugar geométrico onde os valores calculados e os valores experimentais são iguais.

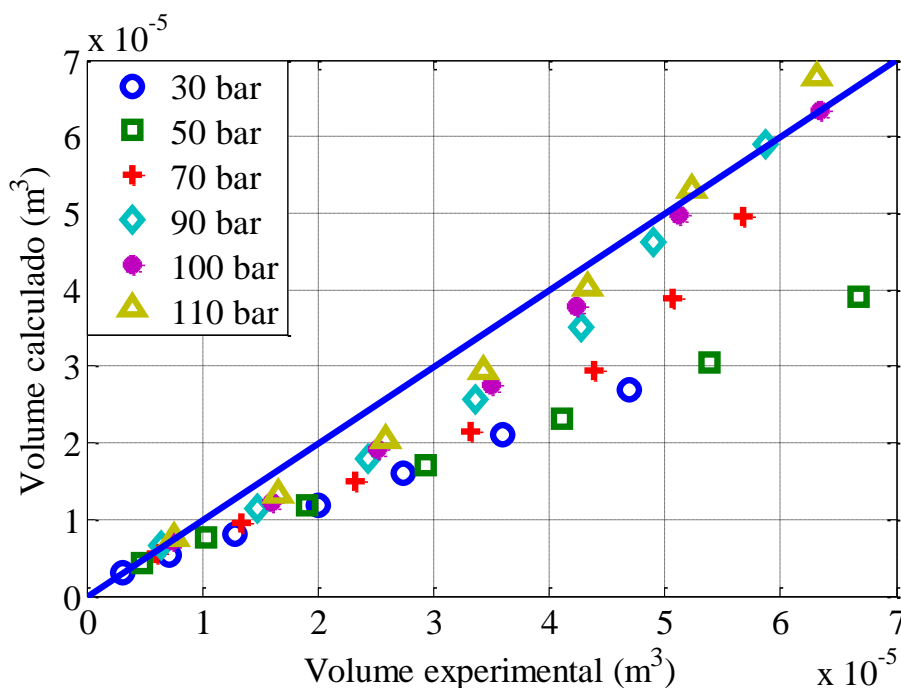


Figura 5.23 – Comparação entre os volumes calculados e volumes experimentais aplicados ao *spray* de água.

A Figura 5.23 mostra que a correlação obtida para o volume concorda melhor com os dados experimentais referentes às pressões de injeção mais altas de 90, 100 e 110 bar onde os pontos estão bem mais próximos à bissetriz e os erros médios estão abaixo de 12,3%, mas subestima os casos de injeção com pressões de 30, 50 e 70 bar com pontos abaixo da bissetriz. A Tabela 5.8 mostra os erros médios obtidos em cada pressão. As faixas dos números adimensionais válidas para erros abaixo de 12,3% e, portanto, desconsiderando a aplicação da correlação para as pressões de 30, 50 e 70 bar estão nas Equações (5.25), (5.26), (5.27) e (5.28).

Tabela 5.8 – Erros percentuais médios da Correlação para o volume aplicada à água.

Pressão de injeção (bar)	Erro percentual médio
30	29,5%
50	30,2%
70	19,8%
90	12,3%
100	10,0%
110	9,8%

$$65620 \leq Re \leq 72890 \quad (5.25)$$

$$85430 \leq We \leq 277430 \quad (5.26)$$

$$0,81 \leq \frac{\Delta P}{\rho V^2} \leq 1,20 \quad (5.27)$$

$$190 \leq \frac{V_0 t}{D_0} \leq 320 \quad (5.28)$$

Novamente verifica-se melhor adequação de uma correlação para as pressões de injeção mais realistas do injetor *pressure-swirl* de 90, 100 e 110 bar.

5.1.7 Equações para os volumes dos *sprays* em função da posição axial

A Tabela 5.9 mostra as constantes $k1$, $k2$, $k3$, $k4$ e $k5$ obtidas dos coeficientes dos ajustes de segundo grau nas bordas dos *sprays* após transformação de rotação para todas as condições testadas para o EXXSOL D60 e a Tabela 5.10 mostra as mesmas constantes para o EXXSOL D40. O tempo após o início da injeção considerado foi de 1,15 ms.

Tabela 5.9 – Equações para o volume em função da posição axial x' para o EXXSOL D60.

Equação (4.29)	$V(x') = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \left[k1 \cdot x' + k2 \cdot \frac{x'^2}{2} + k3 \cdot \frac{x'^3}{3} + k4 \cdot \frac{x'^4}{4} + k5 \cdot \frac{x'^5}{5} \right]$					
Pressão	30 bar	50 bar	70 bar	90 bar	100 bar	110 bar
$k1$ (cm ²)	0,0162	0,0113	0,0099	0,0085	0,0077	0,0079
$k2$ (cm)	0,2460	0,2442	0,2386	0,2302	0,2245	0,2273
$k3$	0,9515	1,3105	1,4148	1,5281	1,5993	1,6065
$k4$ (cm ⁻¹)	0,1495	-0,1161	-0,2158	-0,3422	-0,3893	-0,4063
$k5$ (cm ⁻²)	0,0060	0,0026	0,0081	0,0188	0,0233	0,0252

Tabela 5.10 – Equações para o volume em função da posição axial x' para o EXXSOL D40.

Equação (4.29)	$V(x') = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \left[k1 \cdot x' + k2 \cdot \frac{x'^2}{2} + k3 \cdot \frac{x'^3}{3} + k4 \cdot \frac{x'^4}{4} + k5 \cdot \frac{x'^5}{5} \right]$					
Pressão	30 bar	50 bar	70 bar	90 bar	100 bar	110 bar
$k1$ (cm ²)	0,0238	0,0110	0,0108	0,0083	0,0073	0,0073
$k2$ (cm)	0,3023	0,2488	0,2472	0,2245	0,2147	0,2166
$k3$	0,9861	1,3970	1,4019	1,4912	1,5527	1,5756
$k4$ (cm ⁻¹)	0,1567	-0,1319	-0,2193	-0,3258	-0,3900	-0,4275
$k5$ (cm ⁻²)	0,0064	0,0031	0,0085	0,0175	0,0241	0,0285

A Equação (4.29) representa o volume acumulado do *spray* desde o orifício do injetor até a posição axial x' . Assim, caso o interesse seja a área de uma seção transversal do *spray*, na forma de um círculo, na posição axial x' , basta calcular a primeira derivada da Equação (4.29) para obter a equação da área. O resultado é a Equação (5.29).

$$A(x') = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \left[k1 + k2 \cdot x' + k3 \cdot x'^2 + k4 \cdot x'^3 + k5 \cdot x'^4 \right] \quad (5.29)$$

As constantes das Tabelas 5.9 e 5.10 servem também, portanto, para calcular a área da seção transversal do *spray*. As equações dessas tabelas para o volume estão representadas graficamente na Figura 5.24. As áreas calculadas pela Equação (5.29) representam as inclinações das curvas obtidas. As inclinações aumentam com a distância axial assim como aumentam as áreas das seções transversais dos *sprays*.

Os volumes acumulados dos *sprays* não apresentam diferenças significativas com a alteração da pressão de injeção para pequenas distâncias (ou posição axial x') do orifício do injetor onde as curvas mostradas na Figura 5.24 são praticamente coincidentes. Diferenças maiores surgem quando distâncias próximas de 2,1 centímetros são consideradas. As equações obtidas valem para distâncias do orifício, correspondentes no máximo, até o limite do tamanho físico na vertical compreendido nas filmagens próximas ao injetor. Essa distância máxima é equivalente a 2,1 centímetros de distância axial do orifício do injetor.

O efeito da pressão de injeção sobre o volume acumulado nas distâncias mais afastadas do injetor ou nas distâncias axiais mais próximas de 2,1 cm é diminuir o volume do *spray*. O volume total do *spray* aumenta com o aumento da pressão devido à sua maior penetração como pode ser observado na Figura 5.19 (a) e (b). No entanto, se considerarmos apenas uma

parte do *spray* em uma faixa restrita de distâncias axiais, verificamos a diminuição do volume acumulado. Uma hipótese para essa observação seria a imposição de uma quantidade de movimento ao fluido injetado mais significativa na direção axial, do que na direção tangencial quando a pressão de injeção é aumentada. A consequência seria um menor espalhamento lateral do *spray*, fazendo as suas bordas permanecerem mais próximas e diminuindo assim o volume acumulado até a distância x' .

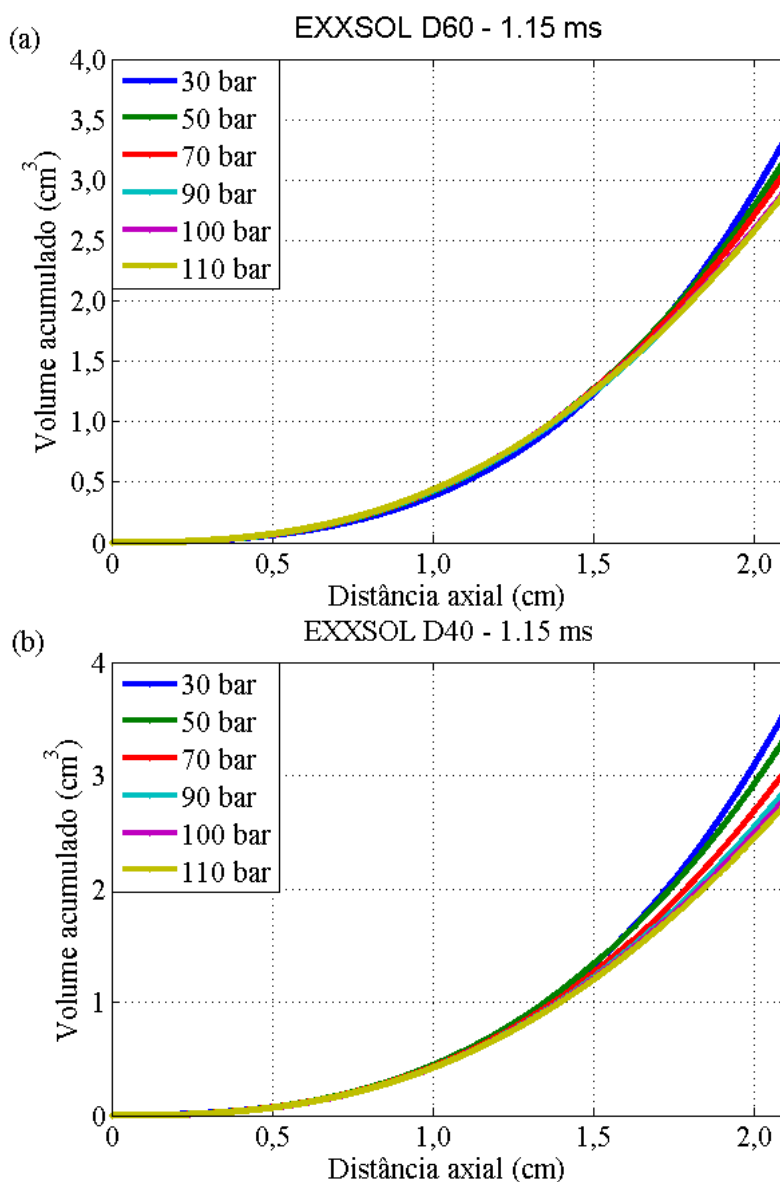


Figura 5.24 – Volume acumulado dos *sprays* em função da posição axial x' para (a) EXXSOL D60 e (b) EXXSOL D40.

5.1.8 Estimativas para a dispersão dos *sprays*

Os coeficientes de dispersão φ para o EXXSOL D60 e o EXXSOL D40 dados pela razão do volume do *spray* pelo volume de líquido contido no *spray* estão mostrados respectivamente na Figura 5.25 (a) e na Figura 5.25 (b). A faixa de erro aleatório, determinada pela repetitividade da média também está mostrada na Figura 5.25. A incerteza padrão utilizada no cálculo do erro aleatório constituiu na incerteza combinada $u_{des}(\varphi)$ das medições referentes ao volume de líquido por pulso de injeção $u_{des}(V_L)$ e o volume total do *spray* $u_{des}(V)$ calculadas através da Equação (5.30).

$$u_{des}(\varphi) = \sqrt{\left(\frac{\partial\varphi}{\partial V_L}\right)^2 \cdot [u_{des}(V_L)]^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial V}\right)^2 \cdot [u_{des}(V)]^2} \quad (5.30)$$

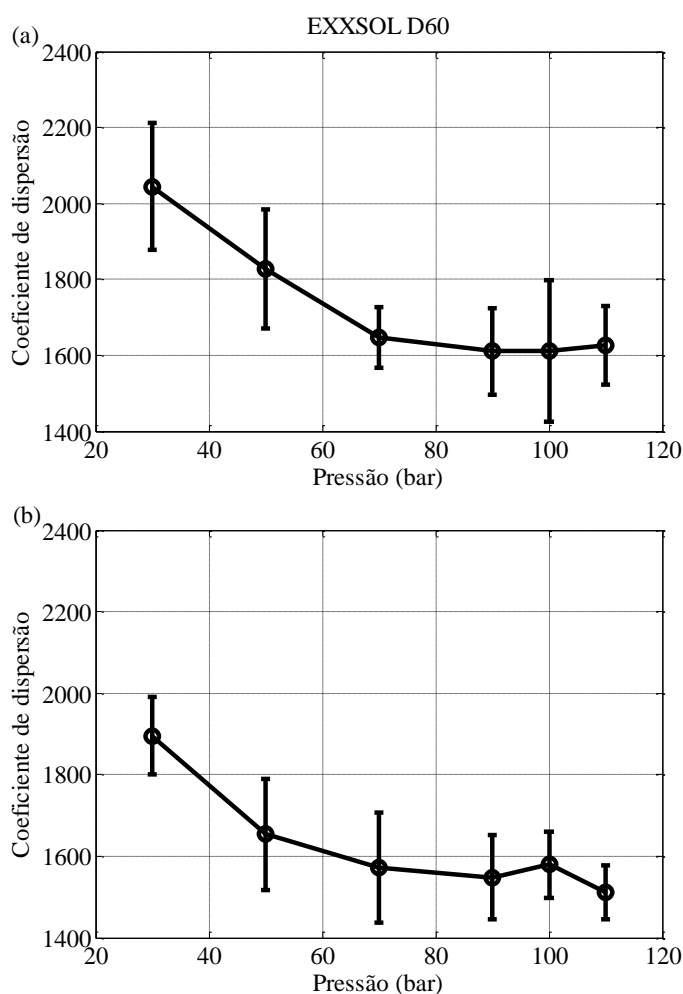


Figura 5.25 – Coeficiente de dispersão dos *sprays* de (a) EXXSOL D60 e (b) EXXSOL D40 em função da pressão de injeção.

Os coeficientes de dispersão tanto do EXXSOL D60 quanto do EXXSOL D40 possuem tendência geral de decréscimo com a pressão de injeção. Tal decréscimo é mais pronunciado para pressões pequenas na faixa entre 30 e 70 bar indicando que um incremento no valor da pressão é capaz de aumentar a quantidade em volume de líquido no *spray* de maneira mais significativa que o aumento do seu volume total. No entanto, para pressões mais próximas da faixa de operação do injetor, entre 90 e 110 bar, os coeficientes permaneceram essencialmente constantes. A Equação (5.31) com as faixas para os números adimensionais nas Equações (5.32), (5.33) e (5.34) representa a correlação obtida para o coeficiente de dispersão e a Figura 5.26 (a) mostra a comparação entre valores calculados com os valores experimentais para o EXXSOL D60 e a Figura 5.26 (b) mostra a mesma comparação para o EXXSOL D40.

$$\varphi = \left(\frac{\rho V_0 D_0}{\mu}\right)^{0,76} \left(\frac{\rho V_0^2 D_0}{\sigma}\right)^{-0,05} \left(\frac{\Delta P}{\rho V_0^2}\right)^{3,83} \quad (5.31)$$

$$17210 \leq Re \leq 72890 \quad (5.32)$$

$$27230 \leq We \leq 277430 \quad (5.33)$$

$$0,8 \leq \frac{\Delta P}{\rho V_0^2} \leq 1,20 \quad (5.34)$$

O erro da correlação para os dois fluidos testados ficou na faixa entre 1,8% e 4,4% com média de 2,2%. A Figura 5.27 também representa uma comparação entre valores calculados pela Equação (5.31) e valores experimentais, mas reunindo os dados dos dois fluidos e realizando o ajuste linear passando pela origem para obter o coeficiente de determinação R^2 de 89% mostrando boa adequação da correlação com os dados.

O coeficiente de dispersão é um parâmetro quantitativo relativo à mistura ar/combustível na pequena região determinada pelo volume do *spray* com literatura escassa em trabalhos experimentais para injetores do tipo *pressure-swirl*. DELACOURT; DESMET; BESSON, 2005, descreveram esse parâmetro em um trabalho relacionado à injeção de Diesel apenas em termos de uma definição matemática. Os coeficientes de dispersão experimentais e as

respectivas correlações valem apenas para o tempo final de injeção de 1,5 ms, pois apenas o volume líquido total por injeção foi medido. Para coeficientes instantâneos, seria necessário o conhecimento da vazão de líquido do injetor em função do tempo durante o intervalo de injeção.

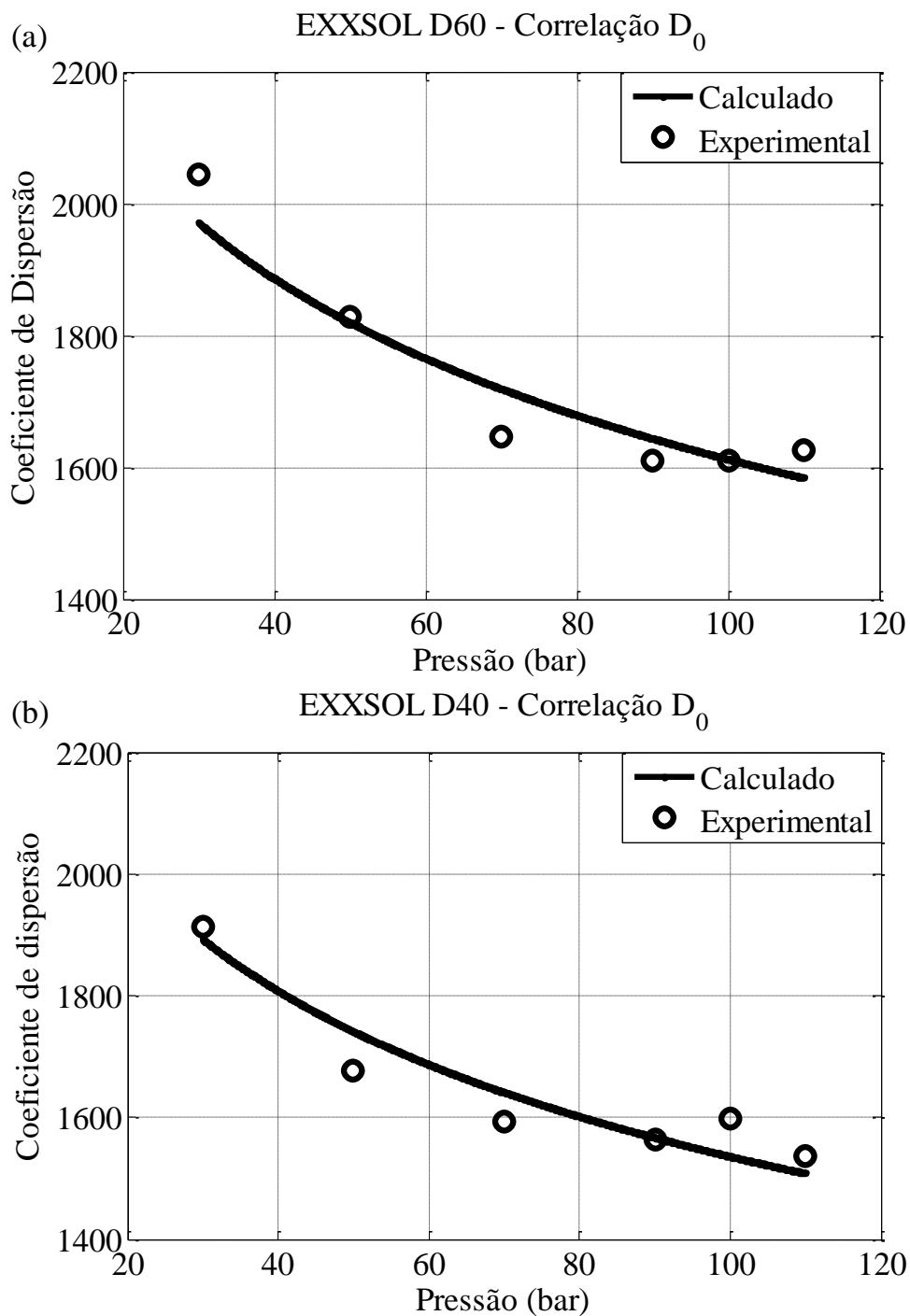


Figura 5.26 – Comparação entre valores calculados e Valores experimentais para o coeficiente de dispersão para (a) o EXXSOL D60 e (b) o EXXSOL D40.

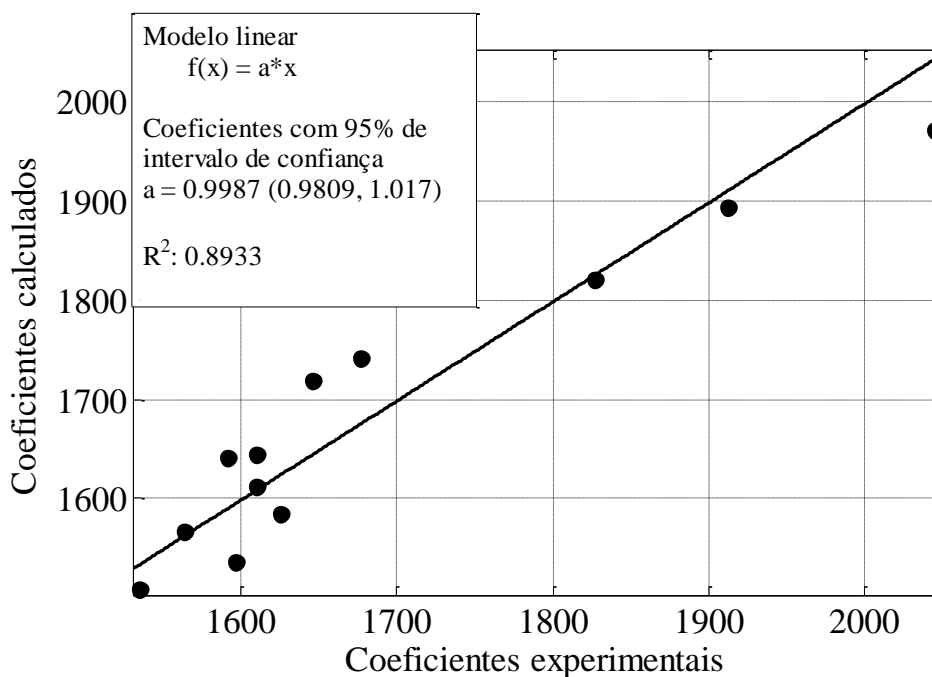


Figura 5.27 – Ajuste da Correlação para a dispersão dos *sprays* de EXXSOL D60 e EXXSOL D40.

O termo “dispersão” na forma utilizada neste trabalho é coincidente com aquele descrito em LEFEBVRE, 1989. No entanto, é possível encontrar outros parâmetros associados a esse termo na literatura. No trabalho de LEE, 2008, por exemplo, o termo dispersão foi associado com a razão da área do *spray* Diesel obtida de um processamento de imagens com a área da seção da câmara onde ocorreram as injeções do trabalho. Mesmo em LEFEBVRE, 1989, é ressaltado no capítulo 3, sobre distribuições de tamanhos e diâmetros médios, que o termo “dispersão” é algumas vezes utilizado para designar a faixa de diâmetros das gotículas de um *spray* como uma alternativa para o termo “distribuições”.

5.1.9 Ângulos de cone através dos perfis em arcos

A Figura 5.28 mostra os ângulos em função da distância para o tempo aproximado de 0,85; 1,15 e 1,46 milissegundos após o início da injeção, para o EXXSOL D60 nas pressões de 30, 50, 70, 90, 100 e 110 bar variando entre 0,1 até 1,6 centímetros a distância vertical do ponto de referência até a corda do arco.

Os dados seguem a disposição de uma curva inicialmente crescente para distâncias pequenas ao ponto de referência e logo em seguida, decrescente após atingir um máximo. Além disso, os formatos dessas curvas não apresentam significativas diferenças com relação ao instante considerado.

Os dados referentes à pressão de injeção de 30 bar em azul parecem seguir comportamento anômalo comparado com as demais pressões no tempo de 0,85 ms e 1,46 ms onde para a parte crescente da disposição dos dados foram encontrados os menores ângulos e para a parte decrescente os maiores.

A Figura 5.29 mostra os dados de medição dos ângulos em função da distância para a injeção de EXXSOL D40 em várias pressões de injeção na mesma faixa de 0,1 cm até 1,6 cm de distância vertical até o ponto de referência.

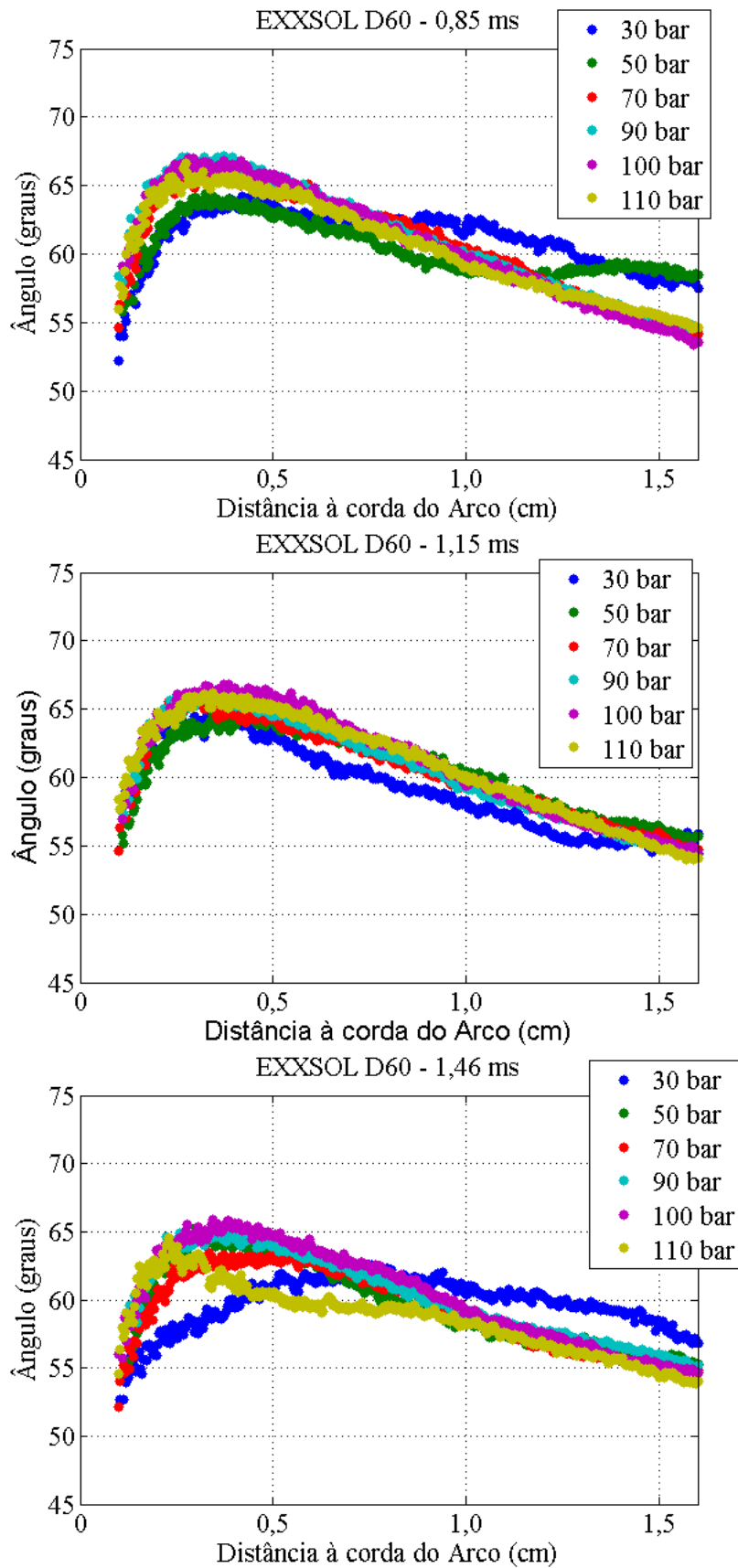


Figura 5.28 – Ângulos em função da distância vertical até a corda do arco para a injeção de EXXSOL D60.

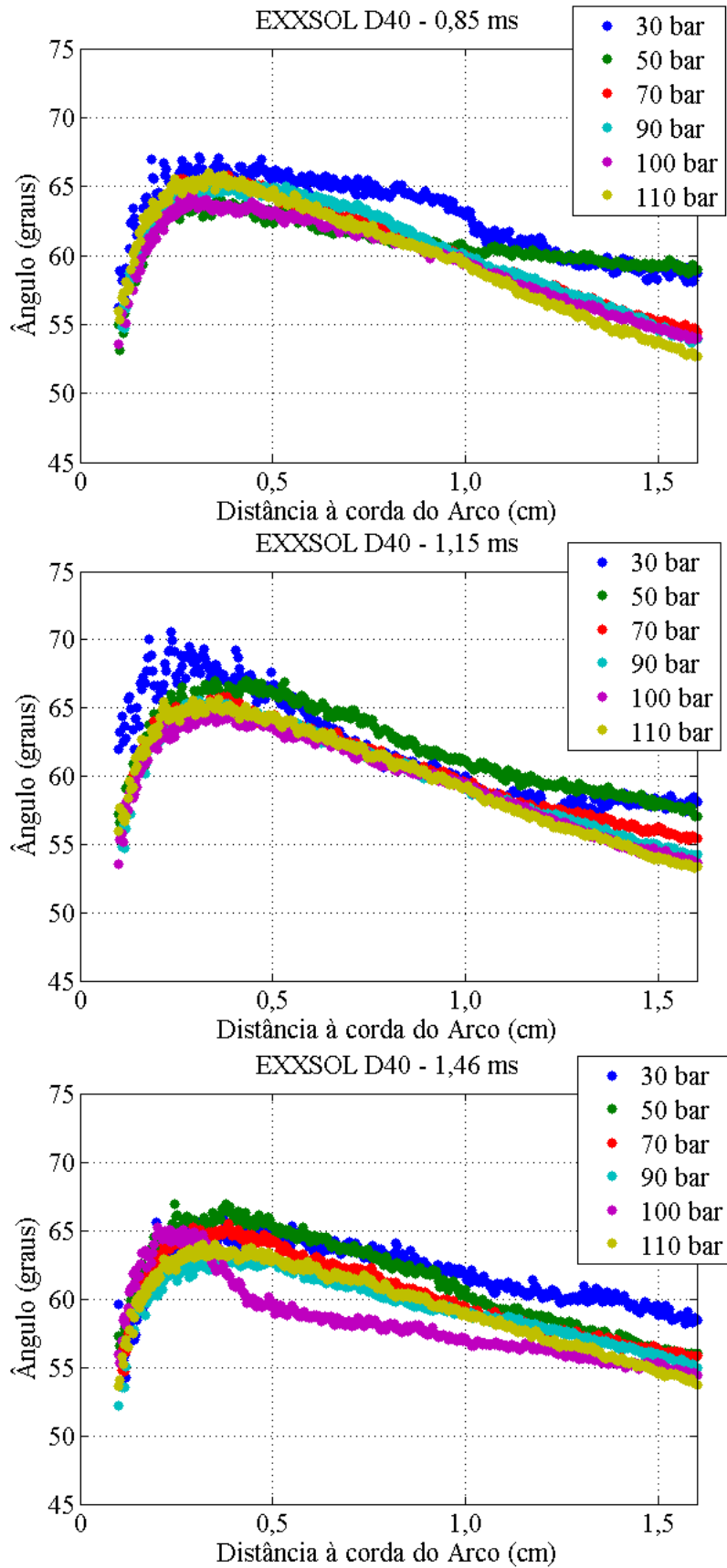


Figura 5.29 – Ângulos em função da distância vertical até a corda do arco para injeção de EXXSOL D40.

Novamente conclui-se pela observação da Figura 5.29, um comportamento inicialmente crescente seguido de um comportamento decrescente após atingir um máximo próximo a uma distância de 0,3 centímetros.

A folha de dados do injetor utilizado nos testes apresenta um valor de ângulo de cone de $60^\circ \pm 5^\circ$ para uma distância da extremidade do injetor de 1,0 centímetro com 100 bar de pressão de injeção para o fluido EXXSOL D40. Verifica-se que a medida dessa folha está muito coerente com a medição realizada neste trabalho pela observação dos gráficos da Figura 5.29.

A medição dos ângulos com referência no vértice do cone da Figura 5.28 para o EXXSOL D60 e da Figura 5.29 para o EXXSOL D40, fornece uma importante constatação já pontuada por LEFEBVRE, 1989, referente à curvatura das bordas dos *sprays* e a dificuldade que essa característica impõe na medição do ângulo de cone. Se o *spray* fosse constituído por um cone perfeito, o ângulo medido não dependeria da posição de medição referente ao vértice do cone. Essas figuras mostram claramente que este não é o caso, pois as bordas dos *sprays* possuem forte curvatura.

Em trabalhos encontrados na literatura, relacionados à análise de *sprays* de injetores de injeção direta de motores do ciclo Otto, frequentemente são fornecidos valores únicos para os ângulos de cone. LEFEBVRE, 1989, também apresenta diversas correlações da literatura para o ângulo de cone calculado como valor único dependente de parâmetros geométricos do injetor. O trabalho aqui proposto pretende fazer uma descrição mais completa e automatizada, evitando medições subjetivas manuais (como aquela apresentada na Figura 4.28) desse importante parâmetro macroscópico, mostrando que a medida do ângulo de cone é fortemente dependente da posição onde a medida é realizada e levando em consideração a real geometria curva das bordas.

Cada ponto nos gráficos das Figuras 5.28 e 5.29 é o resultado da média das medições em cinco diferentes injeções. A quantidade de dados de ângulos de cone gerados na faixa de distância analisada de 1,5 centímetros entre 0,1 cm e 1,6 cm foi 375. Para uma única pressão de injeção e sabendo que os pontos são médias de 5 medições, são necessários $375 \times 5 = 1875$ medições. Para as seis pressões testadas, são então necessárias $1875 \times 6 = 11250$ medições. Esta é a quantidade de medidas necessárias para gerar um único gráfico correspondente a um instante de tempo para qualquer uma das figuras citadas. A quantidade total de medidas realizadas para gerar todos os seis gráficos contidos nas Figuras 5.28 e 5.29 corresponde então a $11250 \times 6 = 67500$ medições. Seria impraticável a realização dessa quantidade de medições

de forma manual, em um software de CAD por exemplo. Essa quantidade de medições foi possível no presente trabalho, devido a automatização do processo de medição do ângulo de cone.

Em trabalhos relacionados com análises de *sprays* de injetores de injeção direta de motores do ciclo Otto, encontrados em periódicos internacionais, é possível encontrar resultados do ângulo de cone em função do tempo, como no trabalho de PARK; SUH; LEE, 2009. Mas a obtenção de resultados de ângulos de cone, variando a posição de medição sobre o *spray* de forma automatizada, realizando um grande número de medições em pequenos intervalos de distâncias, não foi encontrada na literatura.

A metodologia proposta no presente trabalho difere da metodologia desenvolvida no trabalho anterior de dissertação GUZZO, 2012, pela eliminação do parâmetro de entrada referente ao incremento de distâncias entre os arcos. As informações contidas nas imagens entre os arcos adjacentes são desconsideradas na metodologia do trabalho anterior. A obtenção dos ângulos através dos perfis em arcos, no entanto, utiliza melhor a resolução da imagem e assim não existe perda significativa de informações.

A Figura 5.30 mostra os valores dos ângulos para o EXXSOL D60 traçados em função dos ângulos do EXXSOL D40 com ajustes lineares passando pela origem. Os dados foram organizados com base no tempo após o início da injeção. Todas as pressões de teste foram consideradas. Os coeficientes angulares das retas ajustadas aos dados da Figura 5.30 estão mostrados na Tabela 5.11 e ficaram em 1,001; 0,9957 e 0,9913 para os respectivos tempos de 0,85 ms, 1,15 ms e 1,46 ms. Os coeficientes muito próximos da unidade indicam semelhança entre os dois fluidos. Houve, no entanto, uma maior dispersão dos dados para o caso de 1,46 ms com pontos bem afastados da reta de ajuste, denotado pelo baixo coeficiente de determinação R^2 , de 0,5259.

Tabela 5.11 – Parâmetros de ajuste na comparação dos ângulos obtidos através de arcos.

Tempo	Ajuste $y = ax$	
	a	R^2
0,85 ms	1,001	0,8284
1,15 ms	0,9957	0,7851
1,46 ms	0,9913	0,5259

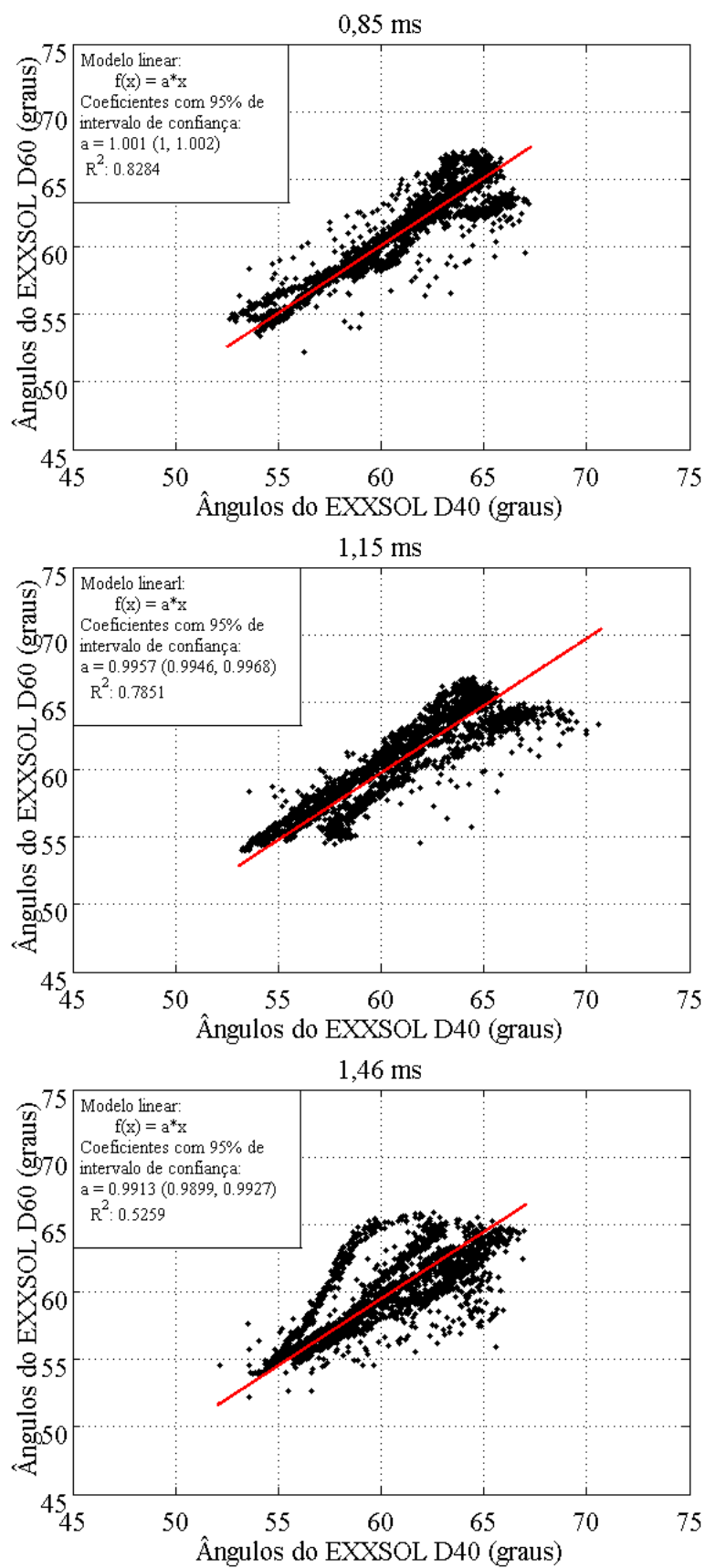


Figura 5.30 – Comparação entre os ângulos de EXXSOL D60 e EXXSOL D40 pela metodologia dos arcos.

5.1.10 Ângulos de cone através dos dados das posições das bordas

A medição dos ângulos através dos dados das posições das bordas está mostrada na Figura 5.31 para os tempos de 0,85 ms, 1,15 ms e 1,46 ms.

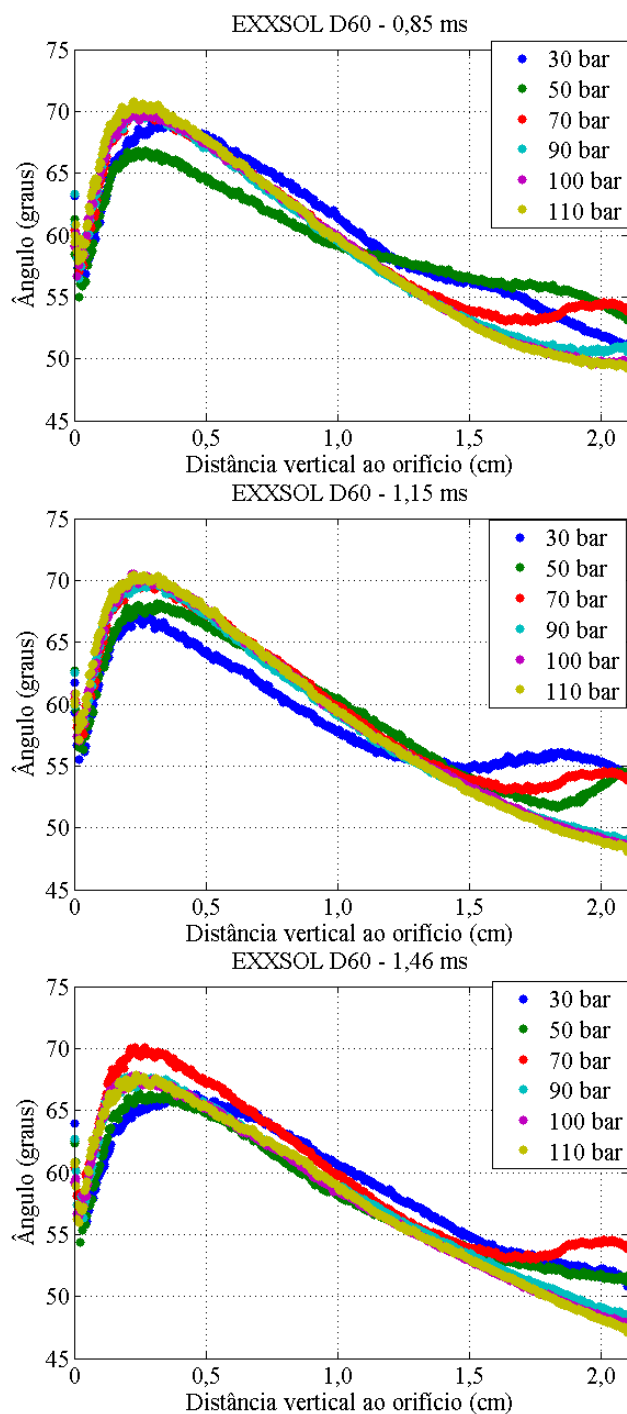


Figura 5.31 – Ângulos em função da distância vertical ao orifício para injeção de EXXSOL D60.

Os dados de ângulos possuem disposição crescente para distâncias menores que 0,3 cm e disposição decrescente para distâncias maiores, da mesma forma verificada com a metodologia utilizando arcos. A Figura 5.32 mostra os resultados das medições para o EXXSOL D40 que possui também essa mesma tendência geral.

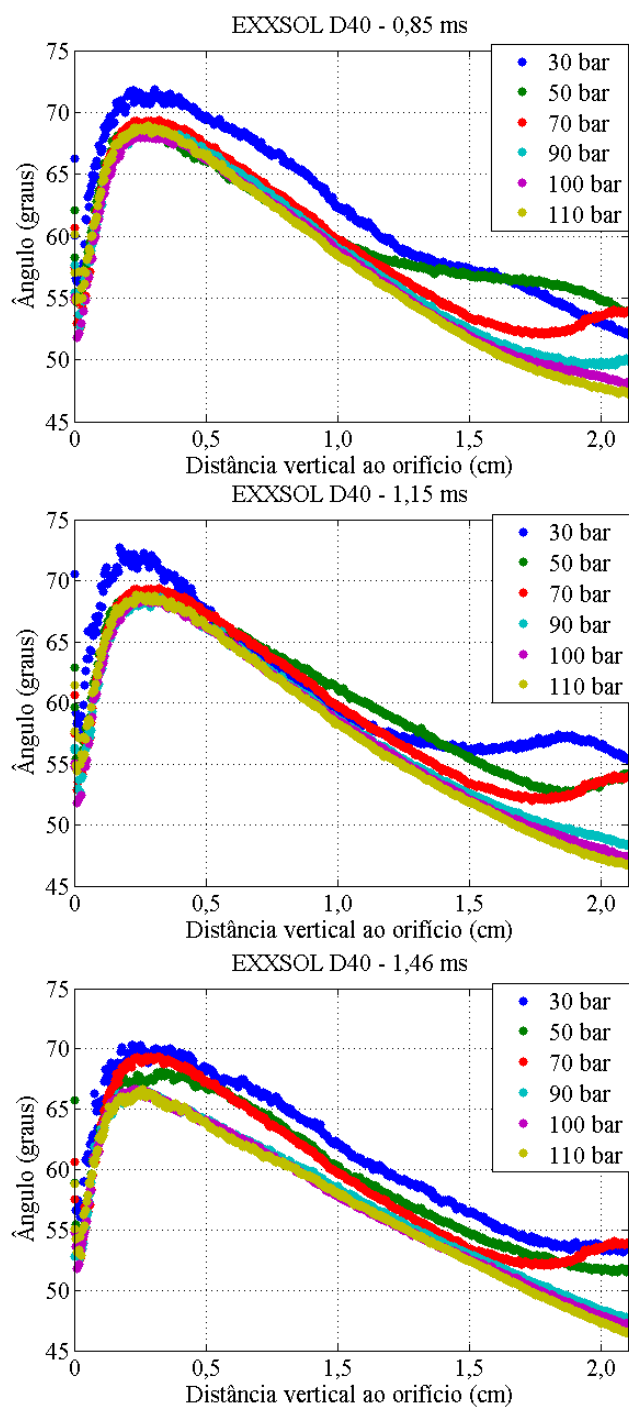


Figura 5.32 – Ângulos em função da distância vertical ao orifício para injeção de EXXSOL D40.

A Figura 5.33 mostra o histograma dos desvios sobre todos os dados da pressão de injeção de 100 bar. Considerando os três tempos após o início da injeção de 0,85 ms; 1,15 ms e 1,46 ms e os dois fluidos de teste para se ter noção dos erros aleatórios envolvidos na análise. Os desvios foram calculados com base na amostra determinada por cinco diferentes testes. O erro médio sobre todos esses dados foi de $0,71^\circ$.

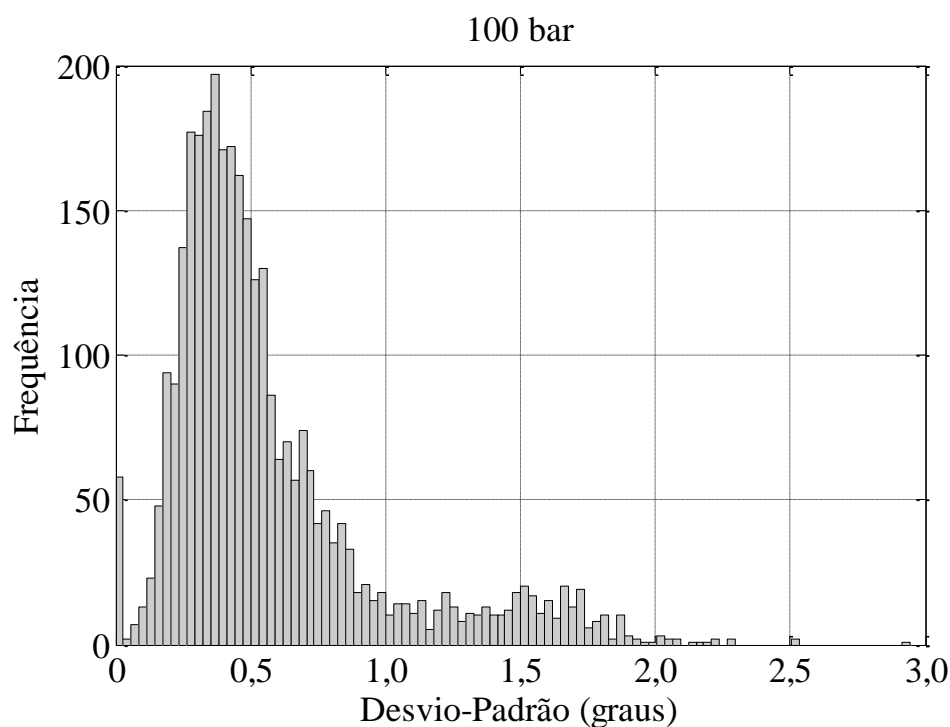


Figura 5.33 – Histograma dos desvios dos ângulos para a pressão de injeção de 100 bar e tempos de 0,85; 1,12 e 1,46 ms.

As comparações entre os dois fluidos estão mostradas na Figura 5.34 para todas as pressões e para os três tempos considerados. A Tabela 5.12 mostra os coeficientes angulares das retas obtidas dos ajustes lineares na comparação. Novamente são verificados coeficientes angulares dos ajustes lineares próximos da unidade indicando semelhança entre os dois fluidos.

Tabela 5.12 – Parâmetros de ajuste na comparação dos ângulos obtidos por dados de posição.

Tempo	Ajuste $y = ax$	
	a	R^2
0,85 ms	1,003	0,9473
1,15 ms	1,001	0,9339
1,46 ms	0,9973	0,9293

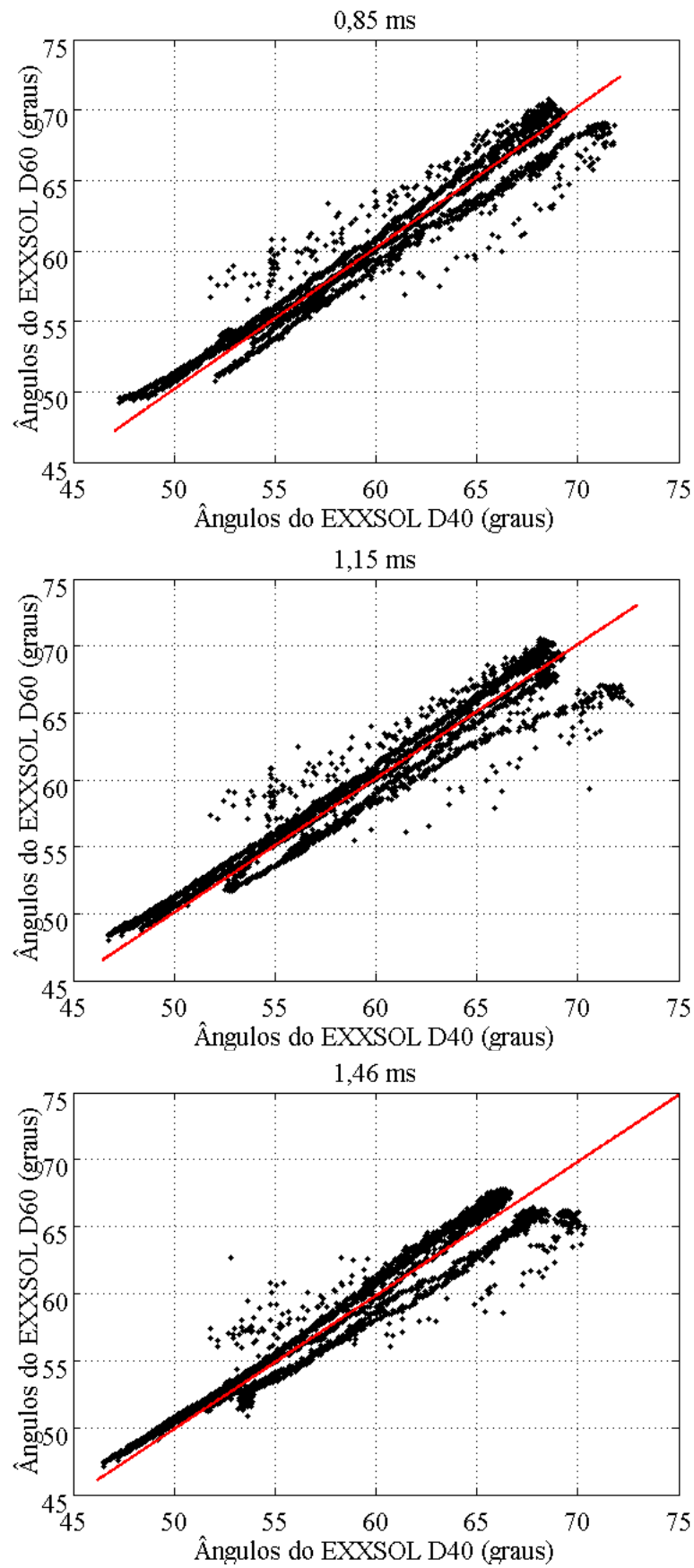


Figura 5.34 – Comparação entre os ângulos de EXXSOL D60 e EXXSOL D40 pela metodologia dos dados de posição das bordas.

5.1.11 Correlação para o ângulo de cone

A Figura 5.35 (a) mostra em um mesmo gráfico, os dados disponíveis para a obtenção da correlação para o ângulo de cone considerando todas as pressões testadas, todos os tempos após o início da injeção, e os dois fluidos: EXXSOL D60 e EXXSOL D40.

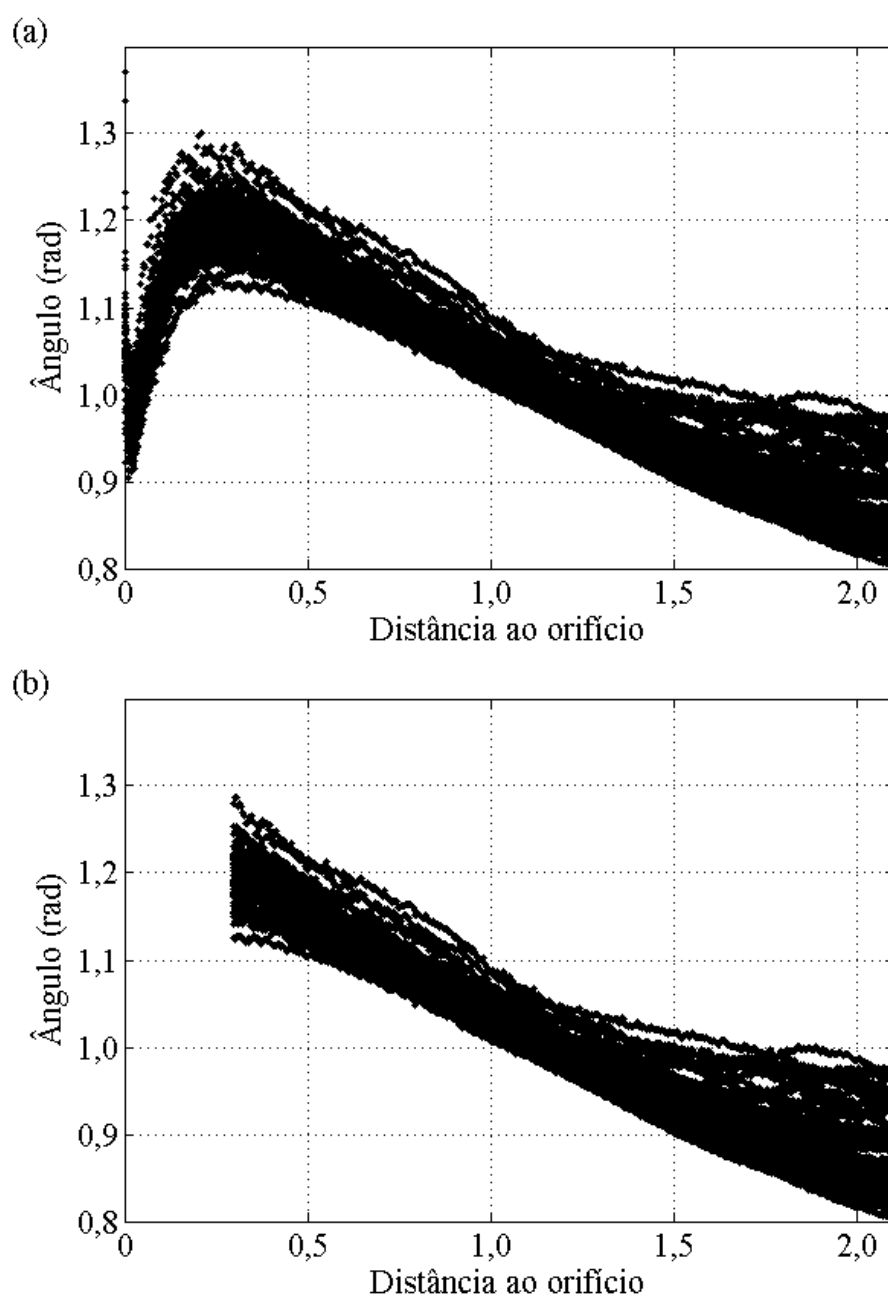


Figura 5.35 – (a) Todos os dados de ângulos medidos. (b) Dados usados para a obtenção da correlação de ângulo.

Devido à mudança de comportamento (ângulos inicialmente crescentes e depois decrescentes) que torna difícil a aquisição de uma relação matemática satisfatoriamente preditiva, optou-se por restringir os dados a uma faixa entre 0,3 cm e 2,1 cm de distância vertical Δy do orifício do injetor. Esses dados estão mostrados na Figura 5.35 (b). Assim, a tendência geral não exhibe mudança de comportamento e a correlação que se obtém, possui melhor adequação aos dados experimentais. Os ângulos utilizados para a obtenção da correlação foram obtidos da metodologia dos dados de posição das bordas.

A correlação obtida pela análise dimensional, para os ângulos dos *sprays*, tomando o comprimento característico D como o diâmetro do orifício do injetor D_0 , está mostrada na Equação (5.35) e os valores calculados por essa equação em função dos dados experimentais encontram-se na Figura 5.36. Também na Figura 5.36 está mostrada a reta bissetriz ou lugar geométrico onde valor calculado é igual ao valor experimental.

$$\theta = \left(\frac{\rho V_0 D_0}{\mu}\right)^{0,09} \cdot \left(\frac{\rho V_0^2 D_0}{\sigma}\right)^{-0,02} \cdot \left(\frac{\Delta P}{\rho V_0^2}\right)^{0,36} \cdot \left(\frac{V_0 t}{D_0}\right)^{-0,02} \cdot \left(\frac{\Delta y}{D_0}\right)^{-0,19} \quad (5.35)$$

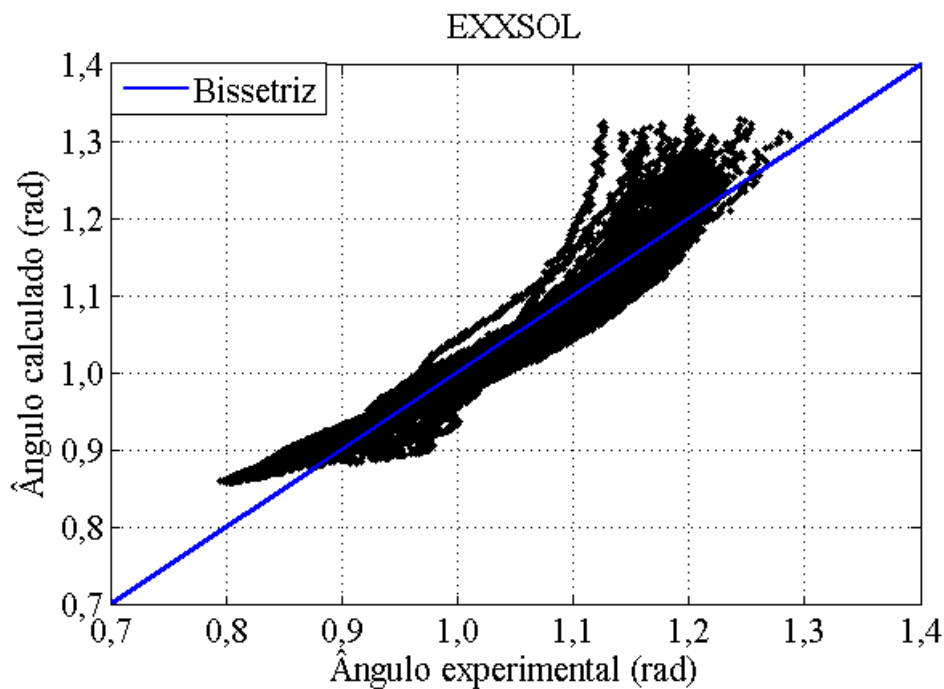


Figura 5.36 – Valores calculados em função dos valores experimentais dos ângulos de cone dos fluidos EXXSOL D60 e EXXSOL D40.

Houve um ajuste de 0,91 em termos do coeficiente de determinação R^2 . Devido à proximidade entre os expoentes do número de Weber e do número adimensional dependente do tempo após o início da injeção $t (V_0 t / D_0)$, que para a aproximação na segunda casa decimal são iguais a - 0,02, a Equação (5.35) pode ser simplificada na forma da Equação (5.36). As faixas dos números adimensionais para a correlação correspondem as mesmas faixas obtidas para a correlação da penetração do diâmetro máximo com o diâmetro do orifício como comprimento característico junto com a faixa para $\Delta y / D_0$ entre 5 e 40.

$$\theta = \left(\frac{\rho V_0 D_0}{\mu} \right)^{0,09} \cdot \left(\frac{\rho V_0^3 t}{\sigma} \right)^{-0,02} \cdot \left(\frac{\Delta P}{\rho V_0^2} \right)^{0,36} \cdot \left(\frac{\Delta y}{D_0} \right)^{-0,19} \quad (5.36)$$

A Figura 5.37 foi construída aplicando a correlação obtida com os fluidos EXXSOL D60 e EXXSOL D40 para o caso específico da injeção de água com pressão de 100 bar e tempo após o início da injeção de 1,15 ms para comparar resultados calculados com os resultados experimentais.

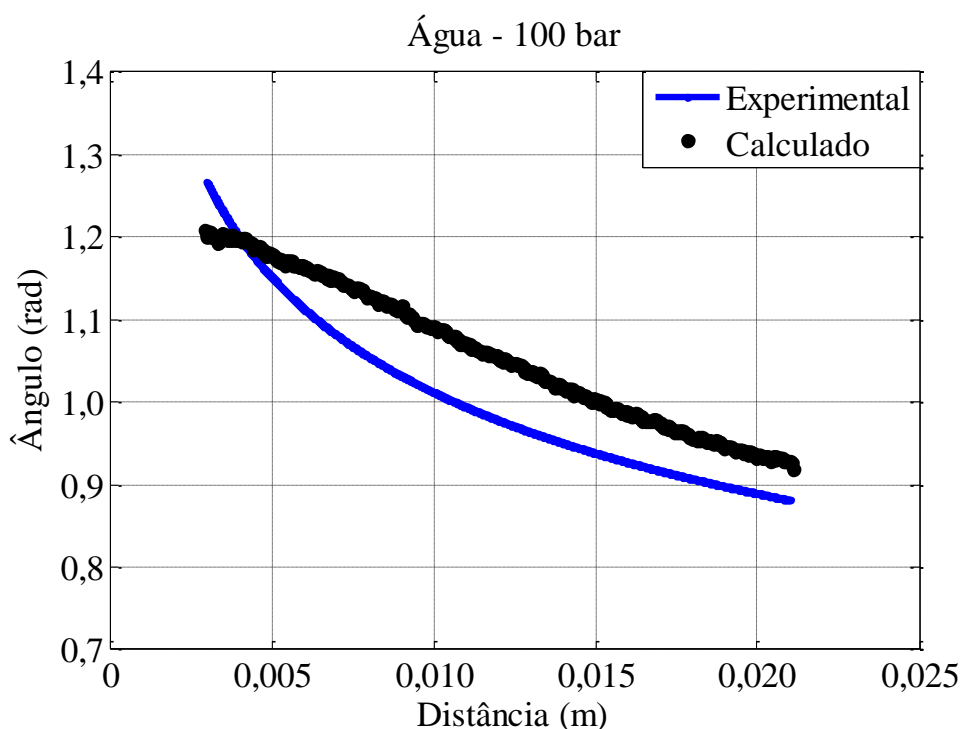


Figura 5.37 – Aplicação da correlação de ângulo de cone para o caso da injeção de água a 100 bar para o tempo de 1,15 ms.

A correlação subestima os ângulos experimentais na maior parte da faixa de distância vertical ao orifício do injetor Δy analisada. A comparação da correlação com os dados disponíveis para todas as pressões e todos os tempos após o início da injeção para a água está mostrada na Figura 5.38. Também na Figura 5.38 foi traçada a reta bissetriz.

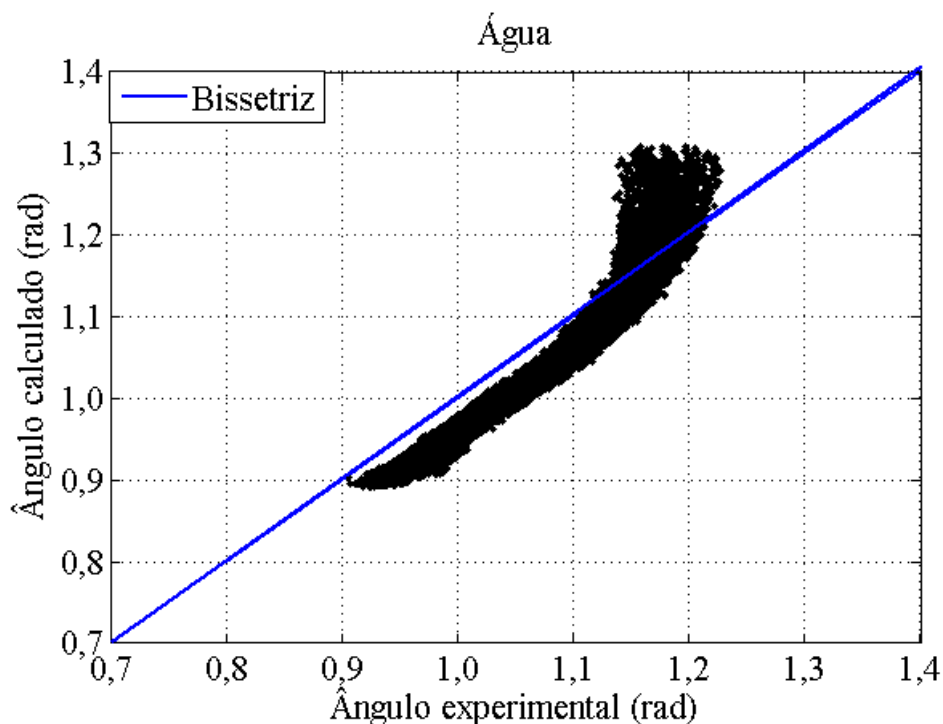


Figura 5.38 – Comparação entre ângulo calculado e ângulo experimental para os *sprays* de Água para todas as condições testadas.

A Figura 5.38 mostra que de forma geral, os ângulos calculados menores que aproximadamente 1,1 radiano ($\sim 63^\circ$) são menores que aqueles obtidos experimentalmente, enquanto valores calculados acima desse valor são maiores que os ângulos experimentais. As diferenças, no entanto, não são significativas e a diferença percentual média entre correlação e dados experimentais para a água foi de 3,8 %, e sugere que a correlação obtida com EXXSOL D40 e EXXSOL D60 é mais geral e pode ser aplicada para fluidos com propriedades diferentes. O histograma com a distribuição de todos os erros da correlação para a água está na Figura 5.39 que mostra que a maior parte dos erros está entre 2 e 6% com erro máximo próximo de 13%.

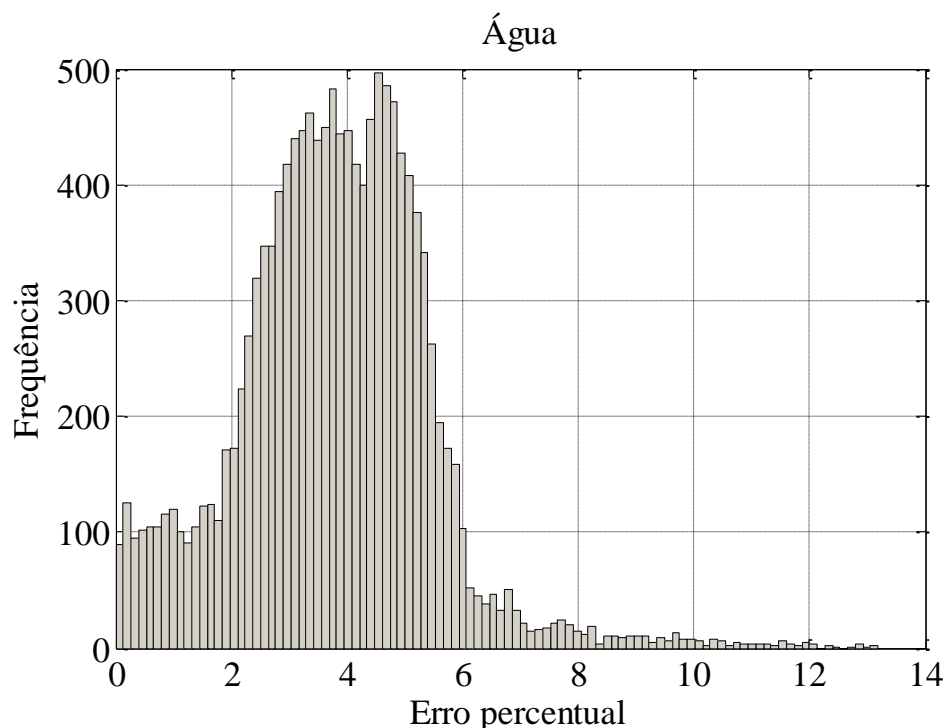


Figura 5.39 – Histograma para os erros da Correlação de ângulo comparados aos dados experimentais da água.

5.2 Análise experimental dinâmica do *spray* de etanol

A Figura 5.40 mostra as penetrações médias de etanol junto à uma faixa de erro aleatório definida pela repetitividade da média das medições de três injeções para cada condição de rotação do motor em ciclos consecutivos.

A medição da penetração para o caso da rotação de 1000 RPM ocorreu até o *spray* atingir o pistão. Tal fato ocorre antes do fim da injeção. Para os casos de 2000 e 3000 RPM, os *sprays* não atingem o pistão e as medições consideraram também instantes um pouco além do fim da injeção. O início da injeção ocorre em 120° e o término da injeção ocorre em 105° antes do ponto morto superior na compressão para os três casos. As repetitividades (metades das faixas de erros) médias ficaram em 0,5 cm para 1000 RPM, 0,6 cm para 2000 RPM e 0,3 cm para 3000 RPM.

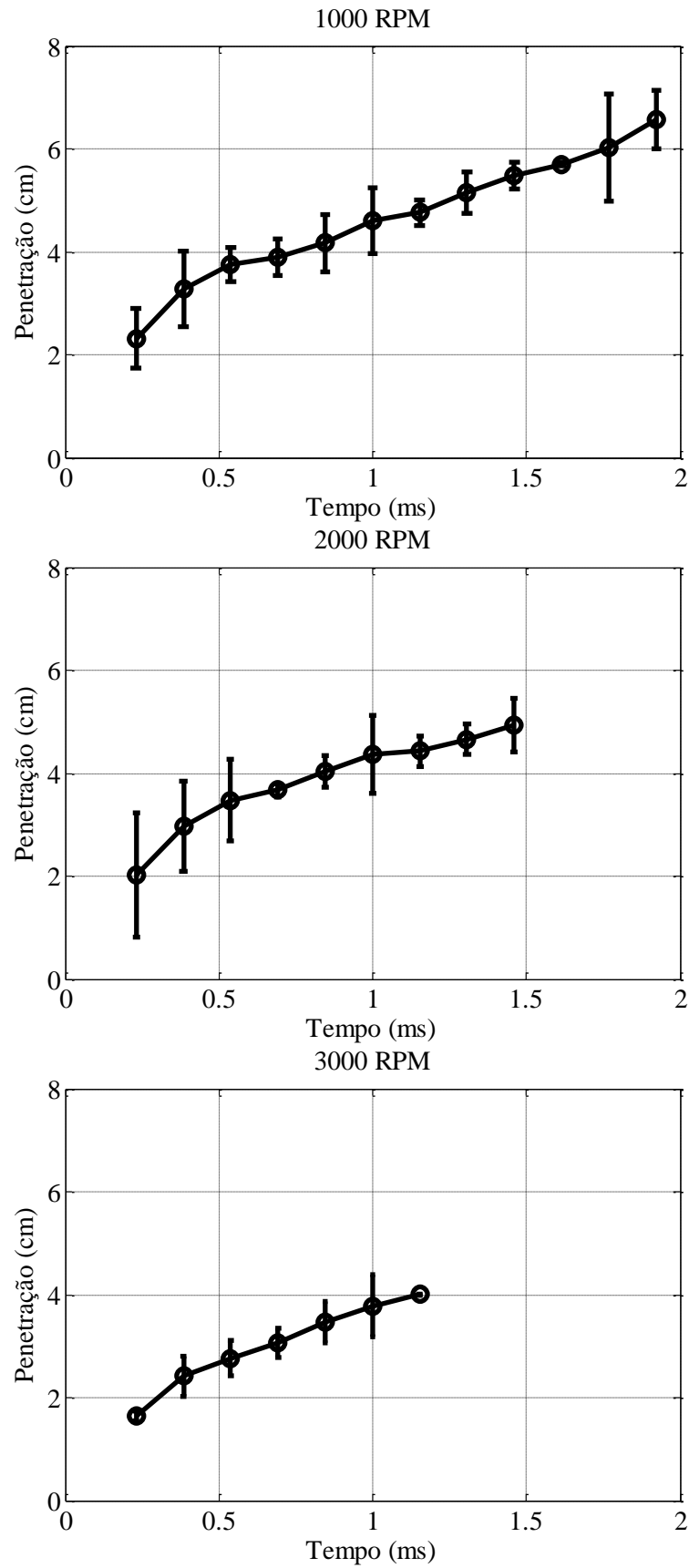


Figura 5.40 – Penetração para as injeções no tempo de compressão em três diferentes condições de rotação do motor.

O tempo em milissegundos no eixo horizontal não é equivalente a um mesmo estágio do tempo de compressão do motor, porque as rotações são diferentes. O gráfico da Figura 5.41 (a) por sua vez compara as três penetrações normalizadas com a posição angular do virabrequim. Na Figura 5.41 (b) os dados da Figura 5.40 foram reunidos para a comparação no tempo.

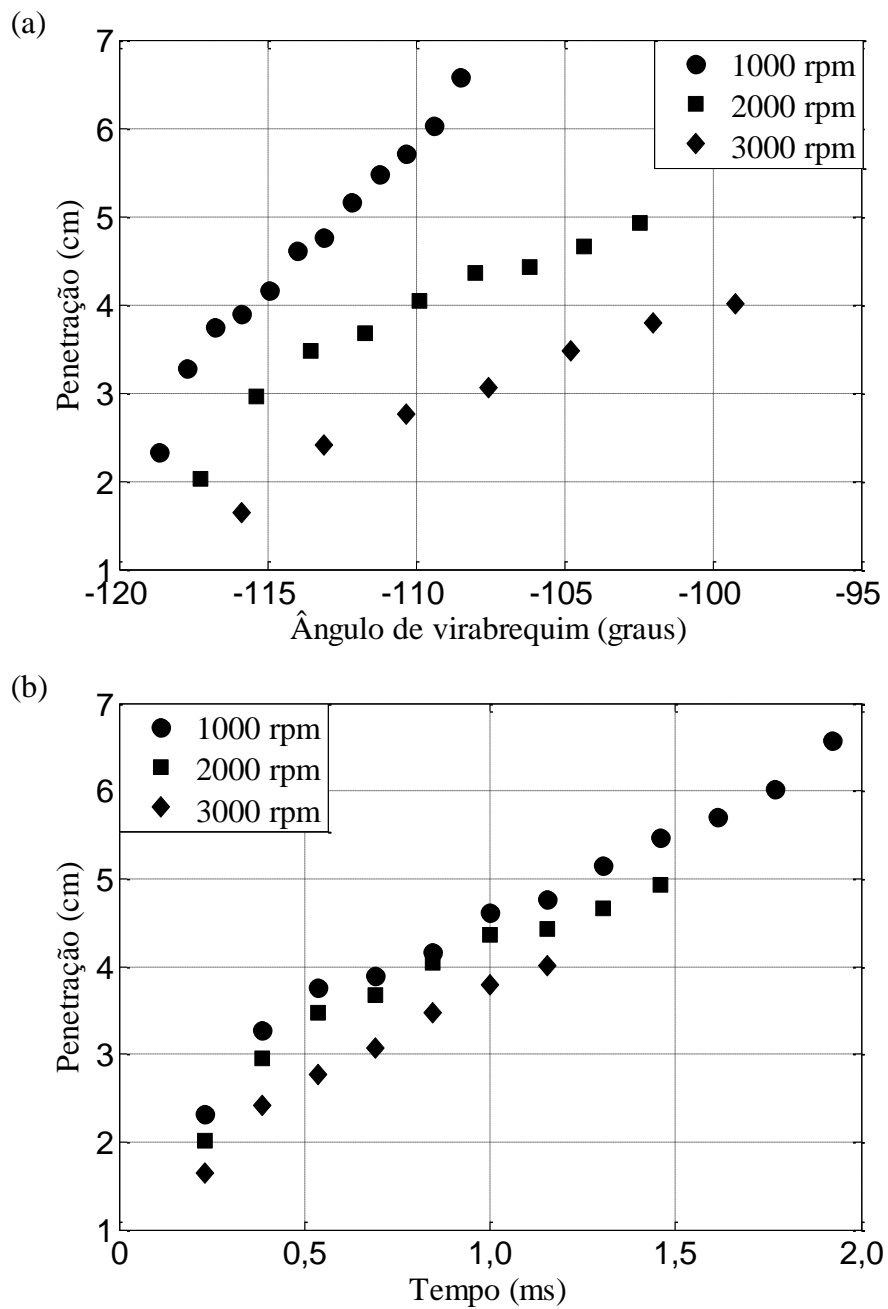


Figura 5.41 – (a) Comparação da penetração para o ângulo de virabrequim e (b) comparações da penetração para o tempo.

O resultado mostrado na Figura 5.41, de redução da penetração com o aumento da rotação está dentro da expectativa do comportamento dos *sprays* dentro do motor.

A taxa de penetração ou velocidade do *spray* no início da injeção é mais alta. Isso pode ser constatado, por exemplo, comparando a inclinação da disposição dos dados para os três primeiros pontos mais próximos do início da injeção em -120° para a rotação de 1000 RPM com os demais pontos dessa mesma condição. A pressão para o cilindro nas três rotações, em função do ângulo de virabrequim está mostrada na Figura 5.42 (a) para um intervalo desde o início da injeção até o fim da compressão e Figura 5.42 (b) para apenas o intervalo de injeção entre -120° e -105° . A injeção nesse intervalo ocorre em um período onde a curva de pressão é levemente crescente, o que tende progressivamente a reduzir a taxa de penetração do *spray* devido à maior resistência do ar sobre o combustível líquido.

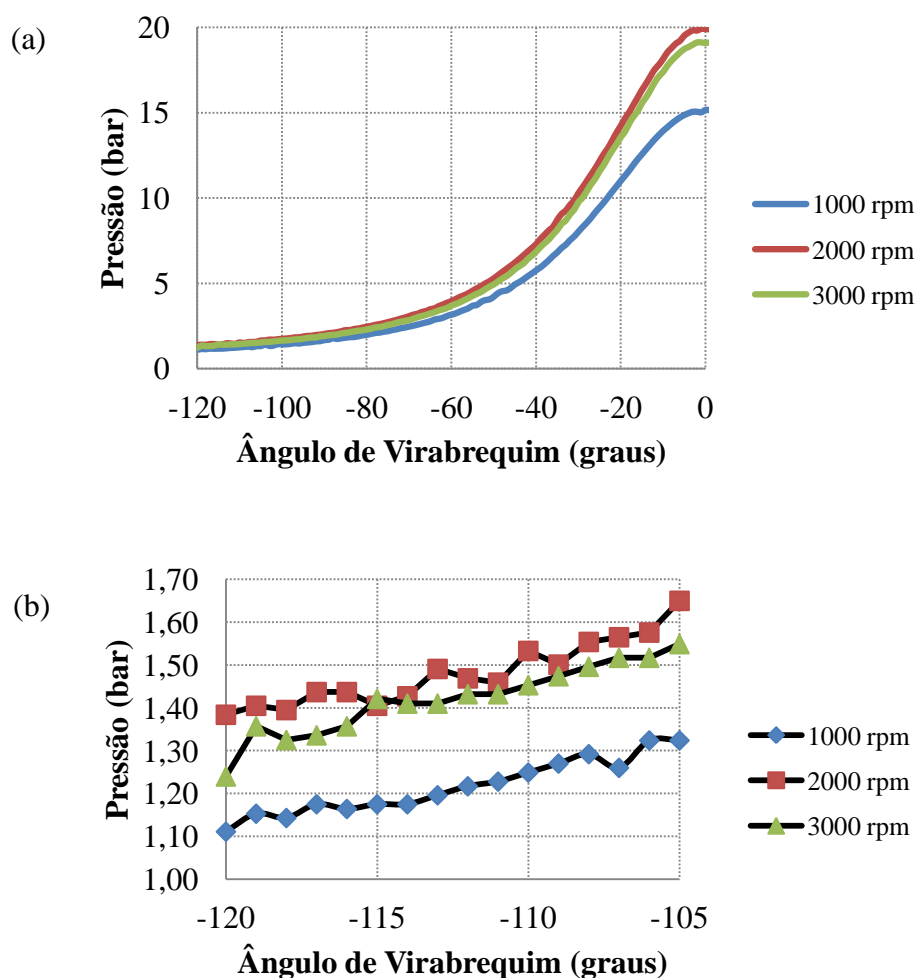


Figura 5.42 – Pressão no cilindro em função do ângulo de virabrequim (a) desde o início da injeção até o final da compressão e (b) para o intervalo correspondente à injeção.

Outro fator que tende a reduzir a penetração dos *sprays* é o deslocamento ascendente de ar induzido pela aceleração do pistão. A Figura 5.43 mostra a velocidade do pistão para as três condições de rotação do motor. No ângulo de 120° APMS o pistão está em aceleração até próximo do ângulo de -90°. A inclinação da curva em 120° APMS que caracteriza a aceleração do pistão é tanto maior quanto maior é a rotação do motor.

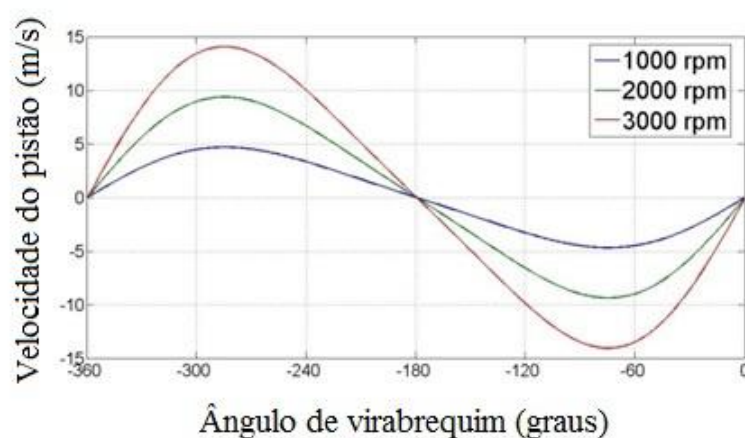


Figura 5.43 – Velocidade do pistão em função do ângulo de virabrequim para as três condições de rotações utilizadas nos testes de injeção direta de etanol.

A Figura 5.44 mostra os ângulos de cone dos *sprays* de etanol hidratado nas três diferentes rotações testadas. As medições mostradas se referem ao estágio próximo do ângulo de 110° APMS de compressão e representam a média em três injeções. A análise dessa figura revela que é perceptível o aumento do ângulo do *spray* com o aumento da rotação do motor. A faixa analisada foi entre 6 e 7 centímetros na posição *x*.

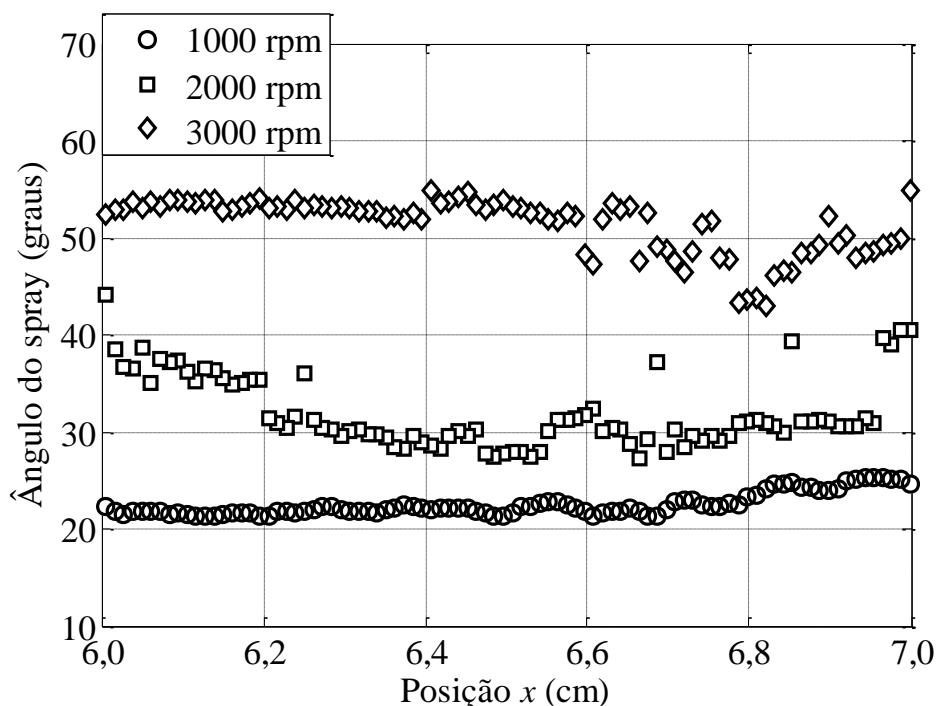


Figura 5.44 – Ângulos de Cone para o *Spray* de etanol em diferentes rotações para 110° APMS de compressão.

A Figura 5.45 mostra os resultados da identificação das bordas dos *sprays* para 110° antes do PMS de compressão nas três rotações testadas.

Os *sprays* permanecem na parte superior do cilindro com as injeções nas rotações de 2000 RPM e 3000 RPM tanto pela maior pressão dentro do cilindro quanto pelo maior fluxo do ar em sentido ascendente e assim não existe colisão com o pistão. No entanto foi considerado o mesmo intervalo em posição angular do virabrequim para as injeções nos experimentos. Se o parâmetro fixo fosse a quantidade de combustível ou mesmo o tempo de injeção, o aumento da rotação seria acompanhado por um aumento no intervalo de posição angular do virabrequim para a injeção, aumentando a probabilidade de colisão do *spray* com o pistão.

Os gráficos mostrados na Figura 5.45 estão coerentes com a Figura 5.41 (a) e com a Figura 5.44 que mostram respectivamente a redução da penetração e o aumento do ângulo do *spray* com a rotação do motor. De forma geral, conclui-se que o aumento da condição de rotação do motor, reduz a penetração do *spray* e aumenta o ângulo de cone.

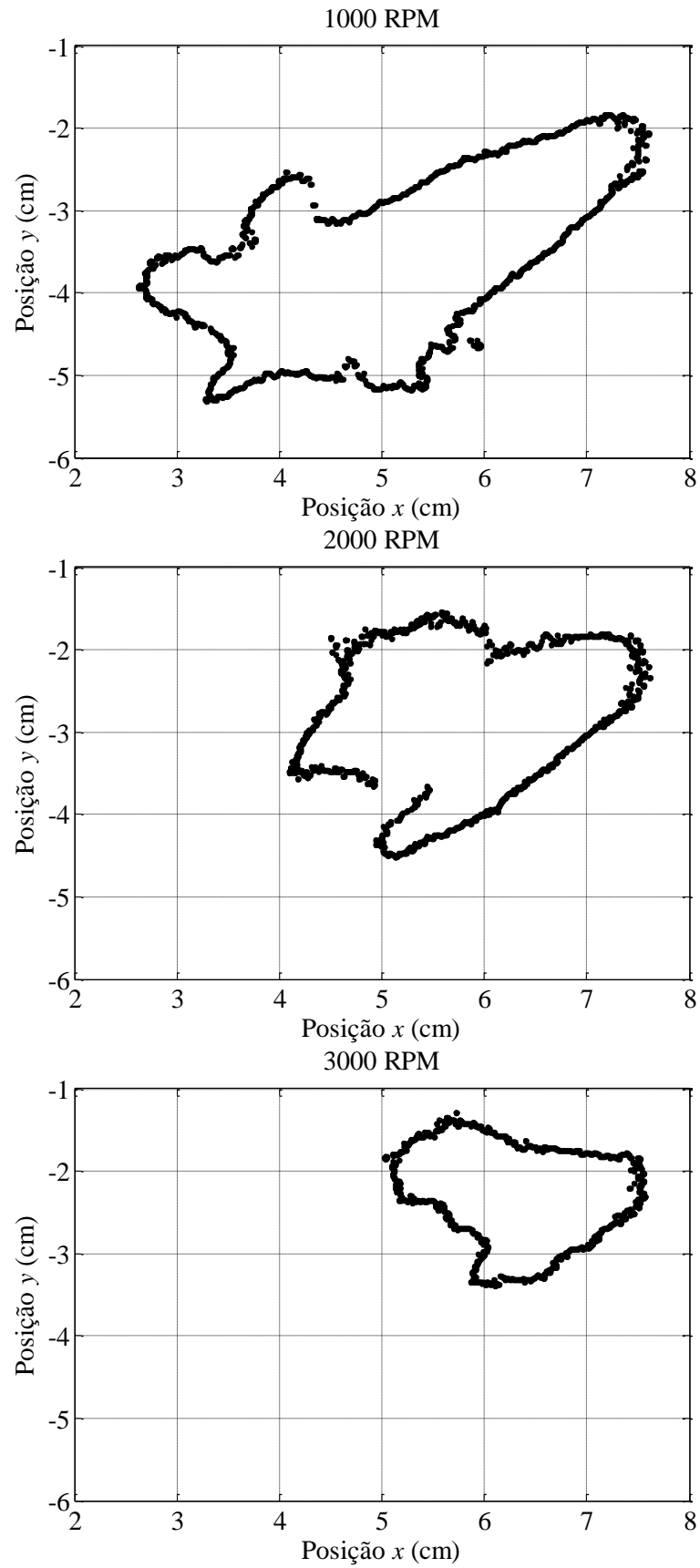


Figura 5.45 – Posições das bordas dos *sprays* para 110° APMS de compressão para o motor operando a 1000, 2000 e 3000 RPM.

6 CONCLUSÕES

Nesta Tese foi demonstrada a aplicação de uma série de estratégias e metodologias para análise e caracterização de *sprays*. A utilização dessas metodologias evita procedimentos manuais e critérios subjetivos como aqueles usualmente empregados para medições de características macroscópicas dos *sprays*, ainda encontrados na literatura. As metodologias são baseadas no tratamento matemático das matrizes numéricas das imagens obtidas da filmagem de alta frequência do processo de injeção.

Dentro da proposta do objetivo geral de formulação de estratégias automatizadas, os resultados apresentados neste trabalho podem ser considerados como análises possíveis das técnicas empregadas. No entanto, muitas outras análises podem ser realizadas, incluindo, por exemplo, a comparação da forma de um *spray* obtido por simulação numérica com a geometria do *spray* experimental, também as validações de modelos numéricos com os dados experimentais de ângulo, penetração, volume e dispersão dos *sprays* poderiam ser realizadas. Trabalhos de graduação e mestrado comparando os resultados numéricos com os resultados fornecidos pelas metodologias aqui desenvolvidas já foram realizados no Centro de Tecnologia da Mobilidade, de forma que o objetivo específico constituído na criação de ferramentas capazes de gerar resultados e dados de condições de contorno para simulações numéricas foi cumprido com o trabalho desenvolvido na presente Tese.

As técnicas inicialmente desenvolvidas para a análise de injeções em condições estáticas, fora do motor, e para injetor do tipo *pressure-swirl*, foram adaptadas para serem empregadas em condições dinâmicas utilizando motor de acesso óptico com injetor de orifícios múltiplos e tratando o cone global formado pelos jatos dos orifícios. Um exemplo de sugestão de análise foi dado no presente trabalho e serviu para constatar diferentes características dos *sprays* de etanol hidratado com a condição de rotação do motor.

A primeira etapa da metodologia de processamento de imagens consistiu em identificar as bordas dos *sprays* em coordenadas de posição. A identificação ocorreu através da diferença das intensidades dos pixels na região com *spray* em relação às regiões fora do *spray* nas imagens. Os dados de posição das bordas são armazenados em matrizes multidimensionais. Próximo ao orifício do injetor (até uma distância de pouco mais de dois centímetros) existe

pouca variabilidade entre diferentes testes de injeção com erros menores que 1 milímetro nas posições horizontais para a mesma pressão e mesmo tempo após o início da injeção. A identificação das bordas consistiu no estágio inicial dos cálculos de várias características macroscópicas e ela foi realizada também para as imagens com maior área de observação obtidas com a filmagem utilizando a câmera mais afastada do injetor.

No trabalho precedente de dissertação, em GUZZO, 2012, técnicas computacionais para a medição do ângulo de cone já haviam sido propostas. No entanto, foram desenvolvidas duas novas formas de análise, com a vantagem da utilização mais efetiva das informações fornecidas por toda a resolução da imagem. As curvaturas das bordas dos *sprays* são consideradas nos cálculos e assim os ângulos não são caracterizados como valores únicos. Além disso, os métodos de medição da penetração, penetração do diâmetro máximo e do volume dos *sprays*, foram técnicas desenvolvidas neste novo trabalho não publicadas no estudo anterior.

A penetração foi medida de duas diferentes formas: a primeira caracterizada pela distância da extremidade do *spray* até o injetor ou penetração vertical máxima e a segunda através da distância da posição do diâmetro máximo do *spray* até o orifício do injetor. A medição da penetração da extremidade leva em consideração o comportamento transiente do pré-*spray* e dificulta a análise. Nas pressões de injeções mais baixas de 30 e 50 bar ocorreram dificuldades na identificação do pré-*spray* nas imagens pelo critério de corte nas intensidades dos pixels. Isso ocorreu pela dispersão do pré-*spray* que diminuiu a concentração de líquido e conseqüentemente a intensidade luminosa das imagens. Assim o estudo da penetração do *spray* principal, por meio da localização da posição do diâmetro máximo, tem melhor adequação nas técnicas de análise aqui consideradas.

Os volumes dos *sprays* foram calculados com base na soma de pequenos volumes de discos desde o orifício do injetor até a extremidade mais afastada das suas bordas. Os volumes dos *sprays*, juntos com dados de vazão do injetor foram utilizados para estimar a razão do volume total do *spray* com o volume de líquido contido no *spray*. Essa razão é sugerida em LEFEBVRE, 1989 como parâmetro para medir a dispersão dos *sprays*. As dispersões estimadas mostraram curvas decrescentes com a pressão de injeção. Assim o aumento da pressão de injeção aumenta a quantidade de líquido do *spray* de forma mais significativa que o aumento do volume total.

Correlações preditivas do comportamento dos *sprays* envolvendo parâmetros macroscópicos são comuns para injetores de Diesel. No caso dos injetores do tipo *pressure-swirl*, correlações são encontradas na literatura para parâmetros microscópicos como o diâmetro de Sauter por exemplo. Nesta Tese foram propostas correlações envolvendo propriedades macroscópicas e também correlações com conexões entre propriedades macroscópicas e microscópicas. As correlações envolvendo apenas propriedades macroscópicas tem generalidade maior. Elas foram obtidas pelos dados experimentais dos fluidos EXXSOL D60 e EXXSOL D40, mas mostraram boa concordância com os dados experimentais da água para a penetração com erros médios em torno de 7,8% e para o ângulo com erros médios de 3,8%. Os erros para os volumes ficaram abaixo de 12,3% para as pressões de 90, 100 e 110 bar. As correlações envolvendo conexões entre propriedades macroscópicas e microscópicas para penetração e a correlação obtida para o coeficiente de dispersão são válidas para fluidos semelhantes aos dois fluidos de teste sendo, portanto menos gerais. As equações preditivas junto à proposição de metodologias automatizadas e não subjetivas para a análise de *sprays* constituem em novas contribuições para a literatura atual.

Quanto às diferenças macroscópicas dos dois fluidos testados, parte integrante dos objetivos específicos propostos, foram observados comportamentos semelhantes quanto aos ângulos, penetrações, e volumes dos *sprays*, especialmente quando os injetores operaram próximos às faixas de pressões normais das suas condições de utilização, correspondentes as mais altas pressões dos testes realizados no trabalho.

Por fim, foi possível aplicar e adaptar as metodologias previamente desenvolvidas para os testes com injetor *pressure-swirl* fora do motor, para o caso da injeção de etanol hidratado através de um injetor com múltiplos orifícios dentro de um motor de pesquisa funcionando sem combustão. A análise do *spray* de etanol hidratado, quanto à disposição das suas bordas, em condições dinâmicas se mostrou fortemente dependente da condição de rotação do motor. Na injeção no tempo de compressão, em 120° antes do PMS de compressão, existe um significativo deslocamento do *spray* para a direção superior do cilindro, próximo à vela quando a rotação do motor é aumentada. Também há uma redução da penetração e um aumento do ângulo do *spray* devido ao incremento de pressão e ao escoamento de ar na direção ascendente dentro do cilindro.

7 TRABALHOS FUTUROS

Como proposta para trabalhos futuros pode-se planejar testes com outros fluidos para incluir razões entre as propriedades físicas dos líquidos com as propriedades do gás ambiente como a massa específica e a viscosidade e assim modificar e melhorar as correlações obtidas. Câmaras fechadas pressurizadas podem ser utilizadas para variar as propriedades do gás ambiente.

Trabalhos de simulação de *sprays* também podem ser realizados para a proposição de modelos numéricos que seriam validados com as correlações preditivas obtidas e com os dados experimentais gerados pela metodologia empregada no trabalho.

Os testes com motor de pesquisa podem incluir a análise da combustão. A taxa de filmagem pode ser alterada com a condição de rotação do motor para obter imagens nos mesmos estágios do tempo do motor determinados pelo ângulo de virabrequim. Análises do *spray* injetado no tempo de admissão também poderiam ser realizadas. As chamas da combustão poderiam passar por um processo de tratamento de imagens semelhante à identificação das bordas dos *sprays* para identificar a frente de chama e também calcular a sua velocidade.

O injetor de múltiplos orifícios do motor de pesquisa poderia ser utilizado para realizar testes estáticos fora do motor para obtenção de uma base de dados para validação numérica, da mesma forma que os testes realizados para o injetor *pressure-swirl* deste trabalho. As análises das diferenças entre testes estáticos com injetor de múltiplos orifícios com os testes dinâmicos constituiriam também em interessantes propostas de trabalhos futuros.

8 BIBLIOGRAFIA

AFTAB, S. M. A.; YOUNIS, O.; AL-ATABI, M. Four Decades of Utilizing Shadowgraph Techniques to study Natural Convection in Cavities: Literature Review. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 36, p. 12021, 2012.

ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. R. DE. Fundamentos de metrologia científica e industrial. **Editora Barueri**, 2008.

ALEIFERIS, P. G.; ROSATI, M. F. Controlled autoignition of hydrogen in a direct-injection optical engine. **Combustion and Flame**, v. 159, n. 7, p. 2500–2515, 2012.

ALEIFERIS, P. G.; VAN ROMUNDE, Z. R. An analysis of spray development with iso-octane, n-pentane, gasoline, ethanol and n-butanol from a multi-hole injector under hot fuel conditions. **Fuel**, v. 105, p. 143–168, 2013.

ALFUSO, S. et al. Time-and Space Characterization of Multi-hole GDI Sprays for IC Engines by Images Processing and PDA Techniques. **Jets**, v. 20, p. 21, 2008.

AMARAL, A. C. N. et al. **Boletim do Etanol n° 09/2017**. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/wwwanp/images/publicacoes/boletins-anp/Boletim_do_Etanol/Boletim_do_Etanol_No06_FEVEREIRO_2016.pdf>.

AMINI, G. Liquid flow in a simplex swirl nozzle. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 79, p. 225–235, 2016.

ANP. Resolução N° 30, de 29 de junho de 2015 - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Diário Oficial da União**, 2015a.

ANP. Resolução N° 19, de 15 de Abril de 2015 - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Diário Oficial da União**, p. (n° 73, Seção 1, pág 44), 2015b.

ANP. **Gasolina**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/petroleo-derivados/155-combustiveis/1855-gasolina>>. Acesso em: 7 fev. 2017a.

ANP. **Etanol**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/biocombustiveis/etanol>>. Acesso em: 7 fev. 2017b.

AZEVEDO, E.; CONCI, A. **Computação gráfica: geração de imagens**. Rio de Janeiro: Campus, c2003. 353 p. ISBN 9788535212525 (broch.)Número, , 2003.

BAÊTA, J. G. C.; PONTOPPIDAN, M.; SILVA, T. R. V. Exploring the limits of a down-sized ethanol direct injection spark ignited engine in different configurations in order to replace high-displacement gasoline engines. **Energy Conversion and Management**, v. 105, p. 858–871, 2015.

BAUMGARTEN, C. **Mixture formation in internal combustion engines**. Springer Science & Business Media, 2006.

BRASIL, P. **Governo estabelece adição de 27% de etanol na gasolina**. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2015/03/adicao-de-27-de-etanol-na-gasolina-e-estabelecida-pelo-governo>>. Acesso em: 7 fev. 2017.

CASTREJÓN-GARCÍA, R. et al. The shadowgraph imaging technique and its modern application to fluid jets and drops. **Revista mexicana de física**, v. 57, n. 3, p. 266–275, 2011.

ÇENGEL, Y.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos Fundamentos e Aplicações**. MCGRAW-HILL BRASIL, 2007.

CHEREMISINOFF, N. P. **Industrial Solvents Handbook, Revised and Expanded**. CRC Press, 2003.

CHIGIER, N. Challenges for future research in atomization and spray technology: Arthur lefebvre memorial lecture. **Atomization and sprays**, v. 16, n. 7, 2006.

CHINN, J. J. The internal flow and exit conditions of pressure swirl atomizers. **Atomization and Sprays**, v. 10, n. 2, 2000.

CIMA. Resolução N° 1 de 4 de Março de 2015 - Conselho Interministerial do Açúcar e do Álcool. **Diário Oficial da União**, 2015.

CONCI, A.; AZEVEDO, E.; LETA, F. R. **Computação Gráfica—Teoria e Prática**, vol. 2Elsevier, New York, NY, USA, , 2008.

COUTO, H. S. **Curso de Atomização e Sprays**. Florianópolis: Escola de Combustão, 2007.

DA COSTA, R. B. R. et al. E100 Stratified Lean Combustion Analysis in a Wall-Air Guided Type GDI Optical Engine. 2015.

DA ROCHA, D. D. et al. Diesel Spray Characterization and Numerical Simulation Using Eulerian-Lagrangian Model. 2014.

DANTEC DYNAMICS. **LDA and PDA Reference Manual**. 1st. ed.

DANTEC DYNAMICS. **Measurements Principles of PDA**. Disponível em: <<http://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-pda>>. Acesso em: 7 jan. 2015.

DE FREITAS, L. C.; KANEKO, S. Ethanol demand under the flex-fuel technology regime in Brazil. **Energy Economics**, v. 33, n. 6, p. 1146–1154, 2011.

DELACOURT, E.; DESMET, B.; BESSON, B. Characterisation of very high pressure diesel sprays using digital imaging techniques. **Fuel**, v. 84, n. 7–8, p. 859–867, 2005.

DELGADO, R. C. O. B.; ARAUJO, A. S.; FERNANDES, V. J. Properties of Brazilian gasoline mixed with hydrated ethanol for flex-fuel technology. **Fuel Processing Technology**, v. 88, n. 4, p. 365–368, 2007.

DING, H. et al. **Experimental study on spray structure of a multi-hole GDI injector**. Electric Information and Control Engineering (ICEICE), 2011 International Conference on. **Anais...IEEE**, 2011

DU, Y. et al. ScienceDirect Research on combustion and emission characteristics of a lean burn gasoline engine with hydrogen direct-injection. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 4, p. 3240–3248, 2016.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos fluidos**. 8^a ed. LTC Editora, 2014.

GANESAN, V. **Internal combustion engines**. McGraw Hill Education (India) Pvt Ltd, 1995.

GOMES, C. A. et al. Comparative Analysis of Atomization Microscopic Characteristics of Gasoline and Ethanol in a GDI injector. SAE Technical Paper, 2015.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de imagens digitais**. Edgard Blucher, 2000.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E.; EDDINS, S. L. **Digital Image Processing Using MATLAB®**. McGraw Hill Education, 2010.

GUZZO, M. E. Metodologias para análise e caracterização dos sprays de um injetor de injeção direta de gasolina. Belo Horizonte. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. 2012.

GUZZO, M. E. et al. **A Computational Methodology for Studying Sprays Characteristics of a Gasoline Direct Injection Injector**. SAE Technical Paper, 2012.

GUZZO, M. E. et al. Analysis of Ethanol Spray Produced by Direct Injection into a Single Cylinder Optical Research Engine. SAE Technical Paper, 2014.

HEYWOOD, J. **Internal combustion engine fundamentals**. McGraw-Hill Education, 1988.

HIROYASU, H.; ARAI, M. **Structures of fuel sprays in diesel engines**. SAE Technical Paper, 1990.

HUANG, S. et al. Visualization research on spray atomization , evaporation and combustion processes of ethanol – diesel blend under LTC conditions. v. 106, p. 911–920, 2015.

ISMAILOV, M. M. et al. LDA/PDA measurements of instantaneous characteristics in high pressure fuel injection and swirl spray. **Experiments in Fluids**, v. 27, n. 1, p. 1–11, 1999.

JÚNIOR, C. A. G.; BARROS, J. E. M.; HUEBNER, R. COMPARATIVE ANALYSIS OF ATOMIZATION'S CHARACTERISTICS IN A NEW, USED AND RECONDITIONED DIESEL SPRAY NOZZLES OF COMMON RAIL SYSTEM. 2013.

KAY, P. J. et al. Studies of gasoline direct-injection sprays at elevated ambient gas temperatures and pressures. **Atomization and Sprays**, v. 22, n. 4, 2012.

KIM, H. J.; PARK, S. H.; LEE, C. S. Light intensity and image visualization of GDI injector sprays according to nozzle hole arrangements. **Optik**, v. 125, n. 12, p. 2763–2767, 2014.

KUO, K. K. **PRINCIPLES OF COMBUSTION**Wiley ББК: 3350. 41, 0 Г543. 1, 07, , 2005.

LABRUTO, N. Geoforum Experimental biofuel governance : Historicizing social certification in Brazilian ethanol production. **Geoforum**, v. 54, p. 272–281, 2014.

LANZER, T.; VON MEIEN, O. F.; YAMAMOTO, C. I. A predictive thermodynamic model for the Brazilian gasoline. **Fuel**, v. 84, n. 9, p. 1099–1104, 2005.

LEE, C. H. An empirical correlation between spray dispersion and spray tip penetration from

an edge detection of visualized images under the flow condition of a solid body rotating swirl. **Journal of Visualization**, v. 11, n. 1, p. 55–62, 2008.

LEFEBVRE, A. H. Atomization and sprays. 1989.

LIU, Y.; LI, J.; JIN, C. Fuel spray and combustion characteristics of butanol blends in a constant volume combustion chamber. **Energy Conversion and Management**, v. 105, p. 1059–1069, 2015.

MAPA. Portaria N 75, de 5 de Março de 2015 - Ministério da Agricultura , Pecuária e Abastecimento. **Diário Oficial da União**, p. 17 Seção 1, 2015.

NOVACANA.COM. **Processos de Fabricação do Etanol**. Disponível em: <<https://www.novacana.com/etanol/fabricacao/>>. Acesso em: 18 maio. 2017.

PACÍFICO, A. L. et al. **Curso Técnicas Avançadas de Diagnóstico em Combustão**. São Paulo: V Escola de Combustão, 2015.

PARK, S. H. et al. Atomization and spray characteristics of bioethanol and bioethanol blended gasoline fuel injected through a direct injection gasoline injector. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 30, n. 6, p. 1183–1192, 2009.

PASTOR, J. V et al. Analysis of transient liquid and vapor phase penetration for diesel sprays under variable injection conditions. **Atomization and Sprays**, v. 21, n. 6, p. 503–520, 2011.

PAYRI, R. et al. Phase doppler measurements: System set-up optimization for characterization of a diesel nozzle. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 22, n. 8, p. 1620–1632, 2008.

PETROBRAS. **Refino**. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/refino/>>. Acesso em: 18 maio. 2017.

QIN, W.; HUNG, D. L. S.; XU, M. Investigation of the temporal evolution and spatial variation of in-cylinder engine fuel spray characteristics. **Energy Conversion and Management**, v. 98, p. 430–439, 2015.

RAFFEL, M.; WILLERT, C. E.; KOMPENHANS, J. **Particle image velocimetry: a practical guide**. Springer Science & Business Media, 2007.

RASHAD, M.; YONG, H.; ZEKUN, Z. Effect of geometric parameters on spray

characteristics of pressure swirl atomizers. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 35, p. 15790–15799, 2016.

REIS, L. M. **Análise Numérica do Spray de Etanol em Câmara Atmosférica**. Belo Horizonte. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

REITZ, R. D.; BRACCO, F. V. Mechanisms of breakup of round liquid jets. **Encyclopedia of fluid mechanics**, v. 3, p. 233–249, 1986.

RIVAS, J. R. R.; PIMENTA, A. P.; RIVAS, G. A. R. DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL AND 3D NUMERICAL SIMULATION OF THE INTERNAL FLOW IN A CONICAL SWIRL ATOMIZER. **Atomization and Sprays**, v. 24, n. 2, 2014.

ROCHA, D. D. DA. **Caracterização do Spray de Etanol Utilizando Técnicas Numéricas de Simulação com Validação Experimental**. Belo Horizonte. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

ROSILLO-CALLE, F.; CORTEZ, L. A. B. Towards ProAlcool II—a review of the Brazilian bioethanol programme. **Biomass and Bioenergy**, v. 14, n. 2, p. 115–124, 1998.

ROY, M. K.; KAWAHARA, N.; TOMITA, E. Jet-guided combustion characteristics and local fuel concentration measurements in a hydrogen direct-injection spark-ignition engine. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 34, n. 2, p. 2977–2984, 2013.

SALLEVELT, J. L. H. P.; POZARLIK, A. K.; BREM, G. Characterization of viscous biofuel sprays using digital imaging in the near field region. **Applied Energy**, v. 147, p. 161–175, 2015.

SERRAS-PEREIRA, J.; ALEIFERIS, P. G.; RICHARDSON, D. Imaging and heat flux measurements of wall impinging sprays of hydrocarbons and alcohols in a direct-injection spark-ignition engine. **Fuel**, v. 91, n. 1, p. 264–297, 2012.

SETTLES, G. S. **Schlieren and Shadowgraph Techniques**. Springer Science & Business Media, 2001.

SHARMA, S. P.; MOHAN, C. Fuels and combustion. 1984.

SHI, W. et al. ScienceDirect Effect of spark timing on combustion and emissions of a hydrogen direct injection stratified gasoline engine. **International Journal of Hydrogen**

Energy, p. 2–9, 2016.

SHUDO, T.; OBA, S. Mixture distribution measurement using laser induced breakdown spectroscopy in hydrogen direct injection stratified charge. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 34, n. 5, p. 2488–2493, 2009.

SIRIGNANO, W. A. **Fluid dynamics and transport of droplets and sprays**. Cambridge university press, 1999.

SONG, J.; PARK, S. Effect of injection strategy on the spray development process in a single-cylinder optical GDI engine. **Atomization and Sprays**, v. 25, n. 9, 2015.

WALKER, J.; RESNICK, R.; HALLIDAY, D. **Fundamentals of physics**. Wiley, 2008.

WIGLEY, G. et al. Imaging and PDA analysis of a GDI spray in the near-nozzle region. **Experiments in fluids**, v. 36, n. 4, p. 565–574, 2004.

WIMMER, E.; BRENN, G. Viscous flow through the swirl chamber of a pressure-swirl atomizer. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 53, p. 100–113, 2013.

ZENG, W. et al. Macroscopic characteristics for direct-injection multi-hole sprays using dimensionless analysis. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 40, p. 81–92, 2012.

ZHAO, F.; LAI, M.-C.; HARRINGTON, D. L. Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines. **Progress in energy and combustion science**, v. 25, n. 5, p. 437–562, 1999.

ZHAO, H. **Advanced Direct Injection Combustion Engine Technologies and Development: Diesel Engines**. Elsevier, 2009. v. 1

ZHAO, H. **Advanced direct injection combustion engine technologies and development - Volume 1: Gasoline and gas engines**. Woodhead Publishing Limited, 2010.

ZIGAN, L. et al. Effect of fuel properties on spray breakup and evaporation studied for a multihole direct injection spark ignition injector. **Energy & Fuels**, v. 24, n. 8, p. 4341–4350, 2010.

ANEXOS

Anexo A – Rotina Computacional para identificação das bordas dos *sprays*

A rotina mostrada a seguir trata imagens em escala de cinzas dos *sprays*. As imagens foram armazenadas no mesmo diretório do arquivo contendo o código do programa. Os nomes das imagens seguem uma lógica que indica fluido injetado, a pressão de injeção, o número do teste, e o número da imagem após o início da injeção. A imagem 1 é a primeira imagem com *spray*, a imagem 2 é a segunda e assim sucessivamente. A injeção de EXXSOL D60 com pressão de 100 bar, correspondente ao teste de número 3 e para a 8ª imagem após o início da injeção, por exemplo, foi armazenada com o nome D60_100bar_3_8.pgm neste diretório. O programa busca nomes com este formato.

Da forma como exibida neste anexo, o programa trata imagens do fluido EXXSOL D60 para as seis pressões testadas, os cinco testes realizados (cinco injeções) e para as imagens 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 após o início da injeção. Os dados de posição x das bordas são armazenados nas matrizes dx_{d1} , dx_{e1} , dx_{s1} e dx_{i1} . Os dados de posição y das bordas são armazenados nas matrizes dy_{d1} , dy_{e1} , dy_{s1} e dy_{i1} . A designação $d1$, $e1$, $s1$ e $i1$ no nome dessas matrizes se referem às bordas direita, esquerda, superior e inferior respectivamente. No total são analisadas 240 imagens, mas o programa pode ser modificado para incluir uma quantidade maior.

O programa mostrado no item A.1 faz a identificação das bordas em matrizes de posição x (cm) e posição y (cm) enquanto o programa A.2 faz o pós-processamento dos dados com os cálculos de características macroscópicas como a penetração do diâmetro máximo, os volumes dos *sprays* e os coeficientes de dispersão. Dados experimentais das vazões do injetor também estão inseridas no código para o cálculo das dispersões.

A.1 Identificação das bordas

```

clear all
i1 = 1;
i2 = 600;
j1 = 1;
j2 = 800;
DR = 72.72;
corte = 60;
for n = 1:1:5 % define qual injeção
    if n == 1
        inj = '_1';
    elseif n == 2
        inj = '_2';
    elseif n == 3
        inj = '_3';
    elseif n == 4
        inj = '_4';
    elseif n == 5
        inj = '_5';
    end
for l = 1:1:6 %Define a condição de pressão
    if l == 1
        P = 'D60_30bar';
    elseif l == 2
        P = 'D60_50bar';

    elseif l == 3
        P = 'D60_70bar';

    elseif l == 4
        P = 'D60_90bar';

    elseif l == 5
        P = 'D60_100bar';

    elseif l == 6
        P = 'D60_110bar';

    end
c=1;
while c <= 8 %Define o tempo
    if c == 1
        time = '_3.pgm';
        A = imread(cell2mat(strcat({P},{inj},{time})));
        c = c+1;
    elseif c == 2
        time = '_4.pgm';
        A = imread(cell2mat(strcat({P},{inj},{time})));
        c = c+1;
    elseif c == 3
        time = '_5.pgm';
        A = imread(cell2mat(strcat({P},{inj},{time})));
        c = c+1;
    elseif c == 4
        time = '_6.pgm';
        A = imread(cell2mat(strcat({P},{inj},{time})));
        c = c+1;
    elseif c == 5

```

```

time = '_7.pgm';
A = imread(cell2mat(strcat({P},{inj},{time})));
c = c+1;
elseif c == 6
time = '_8.pgm';
A = imread(cell2mat(strcat({P},{inj},{time})));
c = c+1;
elseif c == 7
time = '_9.pgm';
A = imread(cell2mat(strcat({P},{inj},{time})));
c = c+1;
elseif c == 8
time = '_10.pgm';
A = imread(cell2mat(strcat({P},{inj},{time})));
c = c+1;
elseif c == 9
time = '_11.pgm';
A = imread(cell2mat(strcat({P},{inj},{time})));
c = c+1;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%PerfisHorizontais%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Detecção da borda inferior
k=0;
for j = j1:1:j2
m=0;
for i = i2:-1:i1
x(i,j) = (j)/DR;
y(i,j) = -(i)/DR;
if A(i,j) >= corte & m == 0
m = 1;
k = k+1;
dx_il(k,c-1,l,n) = x(i,j);
dy_il(k,c-1,l,n) = y(i,j);
A(i,j) = 255;
end
end
end
%Detecção da borda esquerda
k=0;
for i = i1:1:i2
m=0;
for j = j1:1:j2
if A(i,j) >= corte & m == 0
m = 1;
k = k+1;
%if c ==2
dx_e1(k,c-1,l,n) = x(i,j);
dy_e1(k,c-1,l,n) = y(i,j);

%end
%if c == 3

%end
end
end
end
%detecção da borda direita
k=0;
for i = i1:1:i2
m=0;

```

```

for j = j2:-1:j1
    if A(i,j) >= corte & m == 0
        m = 1;
        k = k+1;
        %if c ==2
            dx_d1(k,c-1,l,n) = x(i,j);
            dy_d1(k,c-1,l,n) = y(i,j);
            diametro(k,c-1,l,n) = dx_d1(k,c-1,l,n)-dx_e1(k,c-1,l,n);
        %end
        %if c == 3

        %end
    end
end
end

```

```

%Detecção da borda superior

```

```

k=0;
for j = j1:1:j2
    m=0;
    for i = i1:1:i2
        if A(i,j) >= corte & m == 0
            m = 1;
            k = k+1;
            %if c ==2
                dx_s1(k,c-1,l,n) = x(i,j);
                dy_s1(k,c-1,l,n) = y(i,j);

            end
        end
    end
end
end
end
end

```

```

%Excluindo os zeros das matrizes

```

```

dx_d1(dx_d1==0)=NaN;
dy_d1(dy_d1==0)=NaN;
dx_e1(dx_e1==0)=NaN;
dy_e1(dy_e1==0)=NaN;
dx_i1(dx_i1==0)=NaN;
dx_i1(dx_i1==0)=NaN;
dx_s1(dx_s1==0)=NaN;
dy_s1(dy_s1==0)=NaN;
dx_i1(dx_i1==0)=NaN;
dy_i1(dy_i1==0)=NaN;

```

```

for n = 1:1:5
    if n ==1
        injecao = '-1';
    elseif n == 2
        injecao = '-2';
    elseif n == 3

```

```

        injecao = '-3';
    elseif n == 4
        injecao = '-4';
    elseif n == 5
        injecao = '-5';
    end
for l = 1:1:6
    figure

    if l == 1
        Pressao = '30bar';
    elseif l == 2
        Pressao = '50bar';
    elseif l == 3
        Pressao = '70bar';
    elseif l == 4
        Pressao = '90bar';
    elseif l == 5
        Pressao = '100bar';
    elseif l == 6
        Pressao = '110bar';
    end
for c = 1:1:8

plot(dx_il(:,c,l,n),dy_il(:,c,l,n),'.',dx_dl(:,c,l,n),dy_dl(:,c,l,n),'.',dx
_e1(:,c,l,n),dy_e1(:,c,l,n),'.');
    %pen_max(c,l,n) = max(dy_dl(:,c,l,n))-min(dy_dl(:,c,l,n));
    tempo(c) = (1/(6504*2))*1000+((c+1)/6504)*1000; %em ms
    hold on
end
xlabel('Posição (cm)','fontsize',16);
ylabel('Posição (cm)','fontsize',16);
axis([0 (800)/DR -(600)/DR 0]);
title(strcat({Pressao},{injecao}),'fontsize',16);
set(gca,'fontsize',16);
grid on
end
end
end

```

A.2 Pós-Processamento das bordas

```

diametromaximo = max(diametro);
posicao1 = max(dy_dl);
posicao3 = min(dy_dl);

for c = 1:1:length(tempo)
    for l = 1:1:6
        for n = 1:1:5
            tamanho(l,c,l,n)=length(diametro(:,c,l,n));
        end
    end
end
for c = 1:1:length(tempo)
    for l = 1:1:6
        for n = 1:1:5
            for k = 1:1:tamanho(l,c,l,n)
                if diametromaximo(l,c,l,n) == diametro(k,c,l,n)

```



```

    for l = 1:1:6
        MediaPendiamaximo(c,l)=(Pendiamaximo(1,c,l,1)+Pendiamaximo(1,c,l,2)+Pendiamaximo(1,c,l,3)+Pendiamaximo(1,c,l,4)+Pendiamaximo(1,c,l,5))/5;
        MediaV(c,l) =
            (V(1,c,l,1)+V(1,c,l,2)+V(1,c,l,3)+V(1,c,l,4)+V(1,c,l,5))*(1/5);
        Mediadiametromaximo(c,l) =
            (diametromaximo(1,c,l,1)+diametromaximo(1,c,l,2)+diametromaximo(1,c,l,3)+diametromaximo(1,c,l,4)+diametromaximo(1,c,l,5))*(1/5);
        MediaPenTip(c,l) =
            (PenTip(1,c,l,1)+PenTip(1,c,l,2)+PenTip(1,c,l,3)+PenTip(1,c,l,4)+PenTip(1,c,l,5))/5;
        MediaDifPen(c,l) =
            (DifPen(1,c,l,1)+DifPen(1,c,l,2)+DifPen(1,c,l,3)+DifPen(1,c,l,4)+DifPen(1,c,l,5))/5;
        MediaPendiamaximocubo(c,l) =
            (Pendiamaximocubo(1,c,l,1)+Pendiamaximocubo(1,c,l,2)+Pendiamaximocubo(1,c,l,3)+Pendiamaximocubo(1,c,l,4)+Pendiamaximocubo(1,c,l,5))/5;
    end
end
for c = 1:1:length(tempo)
    for n = 1:1:5
        matrizstd30Pendiamaximo(n,c) = Pendiamaximo(1,c,1,n);
        matrizstd50Pendiamaximo(n,c) = Pendiamaximo(1,c,2,n);
        matrizstd70Pendiamaximo(n,c) = Pendiamaximo(1,c,3,n);
        matrizstd90Pendiamaximo(n,c) = Pendiamaximo(1,c,4,n);
        matrizstd100Pendiamaximo(n,c) = Pendiamaximo(1,c,5,n);
        matrizstd110Pendiamaximo(n,c) = Pendiamaximo(1,c,6,n);
        matrizstd30Pentip(n,c) = PenTip(1,c,1,n);
        matrizstd50Pentip(n,c) = PenTip(1,c,2,n);
        matrizstd70Pentip(n,c) = PenTip(1,c,3,n);
        matrizstd90Pentip(n,c) = PenTip(1,c,4,n);
        matrizstd100Pentip(n,c) = PenTip(1,c,5,n);
        matrizstd110Pentip(n,c) = PenTip(1,c,6,n);
        matrizstd30V(n,c) = V(1,c,1,n);
        matrizstd50V(n,c) = V(1,c,2,n);
        matrizstd70V(n,c) = V(1,c,3,n);
        matrizstd90V(n,c) = V(1,c,4,n);
        matrizstd100V(n,c) = V(1,c,5,n);
        matrizstd110V(n,c) = V(1,c,6,n);
    end
end
S = MediaPendiamaximo;
theta = mediaangulosrad;
for l = 1:1:6
    for c = 1:1:5
        Vcalculado(c,l) =
            (1/3)*pi*(S(c+3,l)^3)*tan(theta(c,l)/2)*((1+2*tan(theta(c,l)/2))/(1+tan(theta(c,l)/2)));
    end
end
VcalculadoVetor(:,1) =
[Vcalculado(1:5,1);Vcalculado(1:5,2);Vcalculado(1:5,3);Vcalculado(1:5,4);Vcalculado(1:5,5)];
Vexp(:,1) =
[MediaV(4:8,1);MediaV(4:8,2);MediaV(4:8,3);MediaV(4:8,4);MediaV(4:8,5)];

%Gráfico Tip Penetration
figure
plot(tempo,MediaPenTip(:,1:6),'.')
grid on

```

```

ylabel('Penetração Vertical Máxima (cm)', 'fontsize', 16)
xlabel('Tempo (ms)', 'fontsize', 16)
legend('30 bar', '50 bar', '70 bar', '90 bar', '100 bar', '110 bar');
grid on
set(gca, 'fontsize', 16)
%Gráfico Penetracão diâmetro máximo
figure
plot(tempo, MediaPendiamaximo(:, 1:6), '.')
grid on
ylabel('Penetração Diâmetro Máximo (cm)', 'fontsize', 16)
xlabel('Tempo (ms)', 'fontsize', 16)
legend('30 bar', '50 bar', '70 bar', '90 bar', '100 bar', '110 bar');
grid on
set(gca, 'fontsize', 16)
%Gráfico Volume
figure
plot(tempo, MediaV(:, 1:6), '.')
grid on
ylabel('Volume (cm^3)', 'fontsize', 16)
xlabel('Tempo (ms)', 'fontsize', 16)
legend('30 bar', '50 bar', '70 bar', '90 bar', '100 bar', '110 bar');
grid on
set(gca, 'fontsize', 16)
figure
plot(MediaPendiamaximo(:, 1:6), MediaV(:, 1:6), '.');
grid on
xlabel('Penetração (cm)', 'fontsize', 16);
ylabel('Volume (cm^3)', 'fontsize', 16);
legend('30 bar', '50 bar', '70 bar', '90 bar', '100 bar', '110 bar');
set(gca, 'fontsize', 16)
grid on;

%if l == 1
    figure

    errorbar(tempo, mean(matrizstd30Pendiamaximo), std(matrizstd30Pendiamaximo)*t
student/raizn, std(matrizstd30Pendiamaximo)*tstudent/raizn)
        hold on

    errorbar(tempo, mean(matrizstd30Pentip), std(matrizstd30Pentip)*tstudent/raiz
n, std(matrizstd30Pentip)*tstudent/raizn)
        title('30 bar', 'fontsize', 16);
        legend('Diâmetro Máximo', 'Extremidade');
        ylabel('Penetração (cm)', 'fontsize', 16);
        xlabel('Tempo (ms)', 'fontsize', 16);
        set(gca, 'fontsize', 16);
        axis([0.3 1.5 1 7]);
        grid on;
%elseif l == 2
    figure

    errorbar(tempo, mean(matrizstd50Pendiamaximo), std(matrizstd50Pendiamaximo)*t
student/raizn, std(matrizstd50Pendiamaximo)*tstudent/raizn)
        hold on

    errorbar(tempo, mean(matrizstd50Pentip), std(matrizstd50Pentip)*tstudent/raiz
n, std(matrizstd50Pentip)*tstudent/raizn)
        title('50 bar', 'fontsize', 16);
        legend('Diâmetro Máximo', 'Extremidade');
        ylabel('Penetração (cm)', 'fontsize', 16);
        xlabel('Tempo (ms)', 'fontsize', 16);

```

```

        set(gca, 'fontsize', 16);
        axis([0.3 1.5 1 7]);
        grid on;
%elseif l == 3
    figure

    errorbar(tempo, mean(matrizstd70Pendiamaximo), std(matrizstd70Pendiamaximo) * t
student/raizn, std(matrizstd70Pendiamaximo) * tstudent/raizn)
        hold on

    errorbar(tempo, mean(matrizstd70Pentip), std(matrizstd70Pentip) * tstudent/raiz
n, std(matrizstd70Pentip) * tstudent/raizn)
        title('70 bar', 'fontsize', 16);
        legend('Diâmetro Máximo', 'Extremidade');
        ylabel('Penetração (cm)', 'fontsize', 16);
        xlabel('Tempo (ms)', 'fontsize', 16);
        set(gca, 'fontsize', 16);
        axis([0.3 1.5 1 7]);
        grid on;
%elseif l == 4
    figure

    errorbar(tempo, mean(matrizstd90Pendiamaximo), std(matrizstd90Pendiamaximo) * t
student/raizn, std(matrizstd90Pendiamaximo) * tstudent/raizn)
        hold on

    errorbar(tempo, mean(matrizstd90Pentip), std(matrizstd90Pentip) * tstudent/raiz
n, std(matrizstd90Pentip) * tstudent/raizn)
        title('90 bar', 'fontsize', 16);
        legend('Diâmetro Máximo', 'Extremidade');
        ylabel('Penetração (cm)', 'fontsize', 16);
        xlabel('Tempo (ms)', 'fontsize', 16);
        set(gca, 'fontsize', 16);
        axis([0.3 1.5 1 7]);
        grid on;
%elseif l == 5
    figure

    errorbar(tempo, mean(matrizstd100Pendiamaximo), std(matrizstd100Pendiamaximo)
*tstudent/raizn, std(matrizstd100Pendiamaximo) * tstudent/raizn)
        hold on

    errorbar(tempo, mean(matrizstd100Pentip), std(matrizstd100Pentip) * tstudent/ra
izn, std(matrizstd100Pentip) * tstudent/raizn)
        title('100 bar', 'fontsize', 16);
        legend('Diâmetro Máximo', 'Extremidade');
        ylabel('Penetração (cm)', 'fontsize', 16);
        xlabel('Tempo (ms)', 'fontsize', 16);
        set(gca, 'fontsize', 16);
        axis([0.3 1.5 1 7]);
        grid on;
%elseif l == 6
    figure

    errorbar(tempo, mean(matrizstd110Pendiamaximo), std(matrizstd110Pendiamaximo)
*tstudent/raizn, std(matrizstd110Pendiamaximo) * tstudent/raizn)
        hold on

    errorbar(tempo, mean(matrizstd110Pentip), std(matrizstd110Pentip) * tstudent/ra
izn, std(matrizstd110Pentip) * tstudent/raizn)
        title('110 bar', 'fontsize', 16);

```

```

legend('Diâmetro Máximo','Extremidade');
ylabel('Penetração (cm)','fontsize',16);
xlabel('Tempo (ms)','fontsize',16);
set(gca,'fontsize',16);
axis([0.3 1.5 1 7]);
grid on;

figure
plot(tempo,MediaDifPen(:,1:6),'.')
grid on
ylabel('Diferença Penetração (cm)','fontsize',16)
xlabel('Tempo (ms)','fontsize',16)
legend('30 bar','50 bar','70 bar','90 bar','100 bar','110 bar');
grid on
set(gca,'fontsize',16)
MediaPendiamaximocubotudo =
[MediaPendiamaximocubo(:,1);MediaPendiamaximocubo(:,2);MediaPendiamaximocub
o(:,3);MediaPendiamaximocubo(:,4);MediaPendiamaximocubo(:,5);MediaPendiamax
imocubo(:,6)];
MediaVtudo =
[MediaV(:,1);MediaV(:,2);MediaV(:,3);MediaV(:,4);MediaV(:,5);MediaV(:,6)];
%Grafico volume com penetração ao cubo
figure
plot(MediaPendiamaximocubo(:,1:6),MediaV(:,1:6),'.')
grid on
xlabel('Cube of Penetration (cm^3)','fontsize',16)
ylabel('Volume (cm^3)','fontsize',16)
legend('30 bar','50 bar','70 bar','90 bar','100 bar','110 bar');
grid on
set(gca,'fontsize',16)

%Escrever Vetores colunas com os resultados
MediaPendiamaximoVetor =
[MediaPendiamaximo(1:length(tempo),1);MediaPendiamaximo(1:length(tempo),2);
MediaPendiamaximo(1:length(tempo),3);MediaPendiamaximo(1:length(tempo),4);M
ediaPendiamaximo(1:length(tempo),5);MediaPendiamaximo(1:length(tempo),6)];
MediaVolumeVetor =
[MediaV(1:length(tempo),1);MediaV(1:length(tempo),2);MediaV(1:length(tempo)
,3);MediaV(1:length(tempo),4);MediaV(1:length(tempo),5);MediaV(1:length(tem
po),6)];
MaximodiametroVetor =
[Mediadiametromaximo(1:length(tempo),1);Mediadiametromaximo(1:length(tempo)
,2);Mediadiametromaximo(1:length(tempo),3);Mediadiametromaximo(1:length(tem
po),4);Mediadiametromaximo(1:length(tempo),5);Mediadiametromaximo(1:length(
tempo),6)];
tempoVetor = [tempo';tempo';tempo';tempo';tempo';tempo'];
MatrizD60 = [tempoVetor MediaPendiamaximoVetor MaximodiametroVetor
MediaVolumeVetor];

```