



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

METODOLOGIAS PARA ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DOS
SPRAYS DE UM INJETOR DE INJEÇÃO DIRETA DE GASOLINA

MÁRCIO EXPEDITO GUZZO

Belo Horizonte, agosto de 2012.

Márcio Expedito Guzzo

METODOLOGIAS PARA ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DOS SPRAYS DE UM INJETOR DE INJEÇÃO DIRETA DE GASOLINA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Calor e Fluidos.

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Mautone Barros

Coorientador: Prof. Dr. Rudolf Huebner

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2012

À minha mãe, Márcia Cristina Ferreira Guzzo, pelo apoio, principalmente nos momentos mais difíceis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado força e capacidade para a realização deste trabalho.

À minha mãe Márcia Cristina Ferreira Guzzo, por ter estado ao meu lado nos momentos mais difíceis que passei durante a realização deste trabalho.

À minha irmã Marcella Fernandes Guzzo, pelo companheirismo e apoio.

Ao meu pai Expedito Macário Guzzo, pelo apoio financeiro, nos períodos em que fiquei sem bolsa.

Ao professor orientador deste trabalho, Doutor José Eduardo Mautone Barros pela orientação, pelos conhecimentos transmitidos e pela grande ajuda no direcionamento do trabalho.

Ao professor Doutor Rudolf Huebner pelos conhecimentos transmitidos, pelo interesse e ajuda na parte experimental.

Ao professor Doutor Ramón Molina Valle, chefe do CTM (Centro de Tecnologia da Mobilidade).

À minha avó, Maria José Fernandes, minha tia Cláudia Ferreira Fernandes Vieira e Romir Pena Vieira por terem ajudado na locação do imóvel onde resido em Belo Horizonte participando como fiadores.

Ao médico Gastroenterologista, Marcos Paulo de Lima Taranto pelo direcionamento do tratamento médico responsável pelo reestabelecimento do meu bom estado de saúde durante a período de realização do Mestrado.

Aos companheiros da sala de Pós-Graduação, Gilberto e sua esposa Adriana, Fernando e Thiago pela companhia.

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 Mestrado durante parte do período de realização deste trabalho.

À Dora, secretária do departamento de Pós-graduação.

Aos alunos de graduação Leandro e Lucas pela ajuda na parte elétrica dos experimentos.

RESUMO

A crescente demanda atual pelo desenvolvimento de motores de combustão à gasolina com maior rendimento e menor concentração de CO₂ nos gases de exaustão trouxe atenção especial aos motores de injeção direta de combustível. Alguns dos fatores que influenciam de maneira significativa o desempenho dos mesmos são as características dos sprays diretamente injetados dentro da câmara de combustão. Uma efetiva atomização tem o papel de propiciar melhor aproveitamento do combustível. Dentro deste contexto, este trabalho tem como objetivo principal o estabelecimento de estratégias de análises de importantes parâmetros associados aos sprays produzidos por um injetor de injeção direta utilizando água, gasolina e etanol como fluidos de teste. A matéria prima na aquisição de dados para este estudo consistiu nas imagens dos processos de atomização e nos campos de velocidades obtidos pela técnica de Velocimetria por Imagens de Partículas. Uma estratégia matemática foi estabelecida para identificar as fronteiras dos sprays através de uma função e um sistema de referência apropriado. Os ângulos dos sprays cônicos, o comprimento de quebra, a penetração, a taxa de penetração, o diâmetro das gotículas, os perfis lineares de velocidades e os perfis de velocidades em arcos centrados no orifício consistiram em importantes parâmetros de estudo deste trabalho. Os resultados mostraram elevadas curvaturas das bordas dos sprays, comprimentos de quebra médios iguais a 0,62 cm para a água, 0,67 cm para o etanol combustível e 0,78 cm para a gasolina, taxas de penetrações coerentes com os campos de velocidades obtidos por PIV e boa reprodutibilidade das estratégias metodológicas empregadas, sugerindo assim uma efetiva validade das mesmas.

Palavras chave: sprays, injeção direta, velocimetria por imagens de partículas.

ABSTRACT

The actual increasing demand for developing gasoline internal combustion engines with better efficiency and less CO₂ concentration into the exhaust gases causes special attention to the direct injection engines. Some of the factors with significant influence on the performance of such engines are the spray characteristics directly injected into the combustion chamber. An effective atomization gives rises to a better advantage in the use of the fuel. Within its context, this study has the main purpose of settling strategies to examine critically the important parameters related to the sprays produced by a direct injection injector using water, gasoline and ethanol as tested fluids. The basis to the data acquisition for this study consisted of images related to the atomization process and the velocity fields obtained by Particle Image Velocimetry. A mathematical strategy was settled to identify the sprays' boundaries through a function and an appropriate reference system. The spray cone angle, the breakup length, the penetration, the rate of penetration, the droplet diameter, the linear velocity profiles and the velocity profiles related to arcs centered on the orifice were important parameters of this work. The results showed high curvature related to the external spray boundaries, breakup length equals to 0,62 cm for water, 0,67 cm for ethanol and 0,78 cm for gasoline, penetration rates coherent with velocity fields got from PIV technique and good reproductibility of the taken strategies of studying, suggesting an effective validation.

Keywords: sprays, direct injection, particle image velocimetry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Diferença entre a injeção no coletor de admissão e a injeção direta, PARKER (carros.hsw.uol.com.br).....	4
Figura 3.2 - Representação dos pixels de uma imagem como elementos retangulares.....	7
Figura 3.3 - Matriz identidade 300 x 300 representada como uma imagem.	8
Figura 3.4 - Uma matriz (à esquerda) com a representação de sua imagem (à direita)	8
Figura 3.5 - Características da técnica PIV de obtenção de campos de velocidades, DANTEC (dantecdynamics.com).....	11
Figura 3.6 - Frames consecutivos de spray de gasolina obtidos pela técnica PIV.	12
Figura 3.7 - Campo vetorial de velocidades (à esquerda) e campo escalar (à direita) obtidos por PIV.	12
Figura 3.8 - Esquema de um spray mostrando a penetração, o ângulo de cone, e as desintegrações primária e secundária, BAUMGARTEN (2006).	18
Figura 3.9 - Histogramas de gotículas baseados em número e volume, LEFEBVRE (1989)..	19
Figura 3.10 - Curvas de Frequência baseadas em número e volume, LEFEBVRE (1989).....	20
Figura 4.1 - Exemplo das saídas constituídas de imagens da rotina do Apêndice 1.	27
Figura 4.2 - Equipamento Laser Dantec Dynamics PIV 2D 15 Hz.....	29
Figura 4.3 - Esquema da câmara de acrílico utilizada nas injeções com o seu flange superior adaptável ao eletroinjetor (1), flange inferior (2) e adaptador de eletroinjetor (3).....	30
Figura 4.4 - Injetor Bosch DI MOTRONIC	31
Figura 4.5 - Detalhe do orifício do injetor.....	31
Figura 4.6 - Posições relativas da câmera e iluminação.....	32
Figura 4.7 - Vaso de pressão utilizado nos experimentos.	33
Figura 4.8 - Posições relativas entre câmera, iluminação e spray para as imagens obtidas por shadowgrafia.....	34
Figura 4.9 - Posições relativas entre câmera, laser e spray para as imagens obtidas por PIV.	34
Figura 4.10 - Escala para medição dos ângulos no flange superior da câmara de acrílico.	39
Figura 4.11 - Procedimento para medir a assimetria dos sprays.	40
Figura 4.12 - Escala utilizada para determinação da densidade de resolução.....	41
Figura 4.13 - Medição de distâncias em pixels em uma imagem com dimensões conhecidas.....	42
Figura 4.14 - Determinação da posição na matriz de pixels de um ponto referente ao orifício do injetor.....	44

Figura 4.15 - Representação de um ponto em um sistema de coordenadas polar.	45
Figura 4.16 - Posições do conjunto de 35 pixels igualmente espaçados utilizados no cálculo do desvio padrão relativos aos seus valores numéricos.....	51
Figura 4.17 - Imagem com spray da injeção de etanol.....	53
Figura 4.18 - Imagem sem spray da injeção de etanol.	54
Figura 4.19 - Subtração das imagens das figuras 4.17e 4.18.....	54
Figura 4.20 - Inspeção dos valores dos pixels em uma janela retangular de uma imagem resultado da subtração de duas imagens sem spray.	55
Figura 4.21- Subtração de uma imagem com spray de gasolina com outra sem spray.	57
Figura 4.22 - Resultado do ajuste do histograma da imagem da figura 4.21.	57
Figura 4.23 - Penetração máxima do spray em determinado estágio de desenvolvimento.	58
Figura 4.24 - Penetração vertical do spray	59
Figura 4.25 - Denominações e orientações das velocidades dos campos obtidos pelo processamento PIV.	61
Figura 4.26 - Seleção da área de interesse na avaliação dos diâmetros das gotículas.....	62
Figura 5.1 - Raiz da pressão em função da vazão média a cada injeção.	65
Figura 5.2 - Resultados dos testes de assimetria.	67
Figura 5.3 - Curva ajustada aos dados referentes à assimetria.	68
Figura 5.4 - Posições dos pixels a 0,70 cm do orifício.....	69
Figura 5.5 - Relação entre os valores dos pixels com o posicionamento angular.	70
Figura 5.6 - Valores da função de corte em função do posicionamento angular.	71
Figura 5.7 - Ângulos em função da posição para a injeção de gasolina para uma faixa de distâncias entre 0,15 e 1,00 cm com incrementos de 0,05 cm.....	73
Figura 5.8 - Ângulos em função da posição para uma faixa de distâncias entre 0,15 e 1,00 cm e incrementos de 0.01 cm para o spray de gasolina.....	74
Figura 5.9 - Ângulos em função da distância para uma faixa de distâncias entre 0,15 e 1,00 cm e incremento de 0.01 cm para o spray de etanol.....	75
Figura 5.10 - Ângulos em função da distância para uma faixa de distâncias entre 0,15 e 1,00 cm e incremento de 0.01 cm para o spray de água.	76
Figura 5.11 - Ângulos entre as bordas externas dos sprays em função da distância para os três fluidos testados.	77
Figura 5.12 - Posições dos pixels situados a uma distância de 0,70 cm do spray de gasolina em uma imagem obtida a alta frequência após tratamento.....	80

Figura 5.13 - Valores dos pixels em função do posicionamento angular a 0,7cm do orifício para uma imagem obtida a alta velocidade de filmagem.....	81
Figura 5.14 - Valores da função de corte em função do posicionamento angular para uma imagem obtida a alta frequência.....	82
Figura 5.15 - Ângulos entre as bordas externas dos sprays para os três fluidos testados para as imagens a alta velocidades.	83
Figura 5.16 - Posicionamento angular das bordas internas para várias posições do spray de água.....	84
Figura 5.17 - Posicionamento angular das bordas internas para varias distâncias do spray de etanol.	85
Figura 5.18 - Posicionamento angular das bordas internas para varias distâncias do spray de gasolina.....	85
Figura 5.19 - Contornos externos e internos do spray de água construído em coordenadas cartesianas.....	87
Figura 5.20 - Contornos externos e internos do spray de etanol construído em coordenadas cartesianas.....	88
Figura 5.21 - Contornos externos e internos do spray de gasolina construído em coordenadas cartesianas.....	89
Figura 5.22 - Ajustes lineares aos contornos internos e externos do spray de água.....	90
Figura 5.23 - Ajustes lineares aos contornos internos e externos para o spray de etanol.....	90
Figura 5.24 - Ajustes lineares aos contornos internos e externos para o spray de gasolina.	91
Figura 5.25 - Desvio padrão médio dos pixels situados em arcos confinados dentro das fronteiras externas para o spray de água.....	92
Figura 5.26 - Desvio padrão médio dos pixels situados em arcos confinados dentro das fronteiras externas para o spray de etanol.	93
Figura 5.27 - Desvio padrão médio dos pixels situados em arcos confinados dentro das fronteiras externas para o spray de gasolina.....	93
Figura 5.28 - Estágios do desenvolvimento do spray de água.....	95
Figura 5.29 - Estágios do desenvolvimento do spray de etanol.	96
Figura 5.30 - Estágios do desenvolvimento do spray de gasolina.....	96
Figura 5.31 - Penetração total da água.	97
Figura 5.32 - Penetração vertical da água.....	97
Figura 5.33 - Penetração total do etanol.....	98

Figura 5.34 - Penetração vertical do etanol.	98
Figura 5.35 - Penetração total da gasolina.....	99
Figura 5.36 - Penetração vertical da gasolina.....	99
Figura 5.37 - Perfis em arcos das velocidades horizontais para o spray de gasolina.	102
Figura 5.38 - Campo das velocidades horizontais para o spray de gasolina.	103
Figura 5.39 - Repetitividade da média do campo U para o spray de gasolina.	104
Figura 5.40 - Perfis em arcos, de velocidades horizontais para o spray de gasolina.....	105
Figura 5.41 - Campo de velocidades V para o spray de gasolina.....	106
Figura 5.42 - Repetitividade da média das velocidades verticais para o spray de gasolina. .	107
Figura 5.43 – Campo vetorial de velocidades resultante do spray de gasolina.	108
Figura 5.44 - Perfil linear do orifício até uma distância de 3,0 cm para a gasolina.	109
Figura 5.45 - Perfis em arcos, das velocidades horizontais para o spray de etanol.....	110
Figura 5.46 - Campo de velocidade horizontal para o spray de etanol.	111
Figura 5.47 - Repetitividade da média das velocidades horizontais para o spray de etanol. .	112
Figura 5.48 - Perfis em arcos das velocidades verticais para o spray de etanol.....	113
Figura 5.49 - Campo de velocidades V para o spray de etanol.	114
Figura 5.50 - Repetitividade da média das velocidades verticais para o spray de etanol.....	115
Figura 5.51 - Campo vetorial de velocidades resultante do spray de etanol.	116
Figura 5.52 - Perfil linear do orifício até uma distância de 3,0 cm para o spray de etanol. ...	117
Figura 5.53 - Perfis em arcos das velocidades horizontais para o spray de água.....	118
Figura 5.54 - Campo de velocidades horizontal para o spray de água.	119
Figura 5.55 - Repetitividades da média das velocidades horizontais para o spray de água. ..	120
Figura 5.56 - Perfis em arcos de velocidades verticais para o spray de água.....	121
Figura 5.57 - Campo de velocidades V para o spray de água.	122
Figura 5.58 - Repetitividades das médias das velocidades verticais para o spray de água. ...	123
Figura 5.59 - Campo vetorial de velocidades resultante do spray de água.	124
Figura 5.60 - Perfil linear do orifício até uma distância de 3,0 cm para a água.....	125
Figura 5.61 - Início da injeção do spray de etanol.....	126
Figura 5.62 - Histogramas referentes ao tamanho de gota dos sprays.	129
Figura 5.63 - Histograma de diâmetros referente a uma região mais próxima do orifício do injetor para o spray de água.....	132
Figura 5.64 - Histograma de diâmetros referente a uma região mais afastada do orifício do injetor para o spray de água.....	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Vantagens da injeção direta sobre o sistema convencional de injeção no coletor de admissão, ZHAO et al (2002).....	5
Tabela 3.2 - Diâmetros médios e suas aplicações, LEFEBVRE (1989).....	21
Tabela 4.1 - Entradas e saídas das rotinas matemáticas criadas no MATLAB.....	28
Tabela 5.1 - Vazão média em cada pressão testada.....	64
Tabela 5.2 - Estimativas dos números de Weber e Reynolds para os três fluidos testados.	79
Tabela 5.3 - Ângulos internos para a faixa entre 0,15 cm e 1,00 cm de distância.	86
Tabela 5.4 - Ângulos obtidos do ajuste linear às bordas dos sprays.	91
Tabela 5.5 - Componentes vertical e horizontal das taxas de penetrações para os três fluidos testados e ângulo da resultante com a vertical.....	101
Tabela 5.6 - Diâmetros médios obtidos do processamento PIV.....	129
Tabela 5.7 - Adimensionais relacionados aos testes.....	130

SÍMBOLOS

D	Diâmetro do orifício do injetor (mm)
D_{ab}	Diâmetro de gotícula (μm)
DR	Densidade de resolução (pixels/cm)
$f(R, \varphi)$	Função definida para localizar as posições referentes às fronteiras dos sprays
i	Linha i -ésima da matriz de uma imagem onde está o orifício do injetor.
j	Coluna j -ésima da matriz de uma imagem onde está o orifício do injetor.
L_A	Comprimento de quebra do spray de água (cm)
L_E	Comprimento de quebra do spray de etanol combustível (cm)
L_G	Comprimento de quebra do spray de gasolina (cm)
n	Número de experimentos para a determinação de uma grandeza X .
PIV	Particle Image Velocimetry (Velocimetria por Imagens de Partículas)
QM	Vazão volumétrica do spray para uma pressão de injeção de 700 kPa (m^3/s)
QM_i	Vazão volumétrica do ensaio i na pressão P de injeção
$QM'(P)$	Vazão volumétrica média para a pressão P de injeção.
r	Posição em centímetros relativa a um sistema com origem no orifício (cm)
R	Posição em número de pixels relativa a um sistema com origem no orifício
Re	Número de Reynolds
Re_M	Repetitividade da média
$round$	Função que atribui a um número real o número inteiro mais próximo
t	Coefficiente t de Student
u	Desvio padrão ou incerteza padrão
U	Denota velocidades na direção horizontal (m/s)
V	Denota velocidades na direção vertical (m/s)
V_o	Velocidade no orifício do injetor obtida dos ensaios de vazão com água (m/s)
X	Grandeza obtida por experimentos
X_M	Valor médio da grandeza X obtida por n ensaios
x_{de}	Abscissa da borda direita externa do spray em coordenadas cartesianas (cm)
x_{di}	Abscissa da borda direita interna do spray em coordenadas cartesianas (cm)
x_{ee}	Abscissa da borda esquerda externa do spray em coordenadas cartesianas (cm)
x_{ei}	Abscissa da borda esquerda interna do spray em coordenadas cartesianas (cm)
y_{de}	Ordenada da borda direita externa do spray em coordenadas cartesianas (cm)

y_{di}	Ordenada da borda direita interna do spray em coordenadas cartesianas (cm)
y_{ee}	Ordenada da borda esquerda externa do spray em coordenadas cartesianas (cm)
y_{ei}	Ordenada da borda esquerda interna do spray em coordenadas cartesianas (cm)
u_C	Incerteza combinada
V_R	Velocidade resultante de penetração (m/s)
V_U	Componente horizontal da velocidade de penetração (m/s)
V_V	Componente vertical da velocidade de penetração (m/s)
We	Número de Weber
α_e	Ângulo da borda direita externa do spray (radianos)
α_i	Ângulo da borda direita interna do spray (radianos)
β_e	Ângulo da borda esquerda externa do spray (radianos)
β_i	Ângulo da borda esquerda interna do spray (radianos)
μ	Viscosidade (Pa.s)
ρ	Massa específica (kg/m ³)
σ	Tensão superficial (N/m)
θ	Ângulo com a vertical da velocidade resultante de penetração
ν_D	Número de graus de liberdade para o diâmetro D do orifício do injetor.
ν_{ef}	Número de graus de liberdade efetivos
ν_{QM}	Número de graus de liberdade da vazão QM de injeção na pressão de 700 kPa
φ	Ângulo de cone (graus)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS E RELEVÂNCIA	2
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1	Sistemas de Injeção Direta de Gasolina.....	3
3.2	Representação Matemática de uma Imagem.....	5
3.3	Shadowgrafia	10
3.4	Velocimetria por Imagens de Partículas - PIV	10
3.5	Parâmetros Importantes Associados aos Sprays	14
3.5.1	Dispersão	15
3.5.2	Penetração	15
3.5.3	Ângulo de cone.....	16
3.5.4	Comprimento de quebra (breakup)	17
3.5.5	Diâmetro das gotículas	18
3.6	Trabalhos Relacionados à Análise dos Sprays	21
4	METODOLOGIA	25
4.1	Introdução	25
4.2	Configuração Experimental	29
4.3	Erros Aleatórios Associados aos Resultados Experimentais.....	35
4.4	Testes de Vazão	38
4.5	Determinação da Assimetria dos Sprays.....	39
4.6	Determinação da Densidade de Resolução.....	41
4.7	Procedimento de Medição dos Ângulos das Bordas Externas.....	43
4.8	Procedimento de Medição dos Ângulos Internos	48
4.9	Construção das Bordas em Coordenadas Cartesianas	48
4.10	Procedimento de Medição dos Ângulos por Ajuste Linear	49
4.11	Avaliação do Comprimento de Quebra do Jato.....	50
4.12	Tratamento das Imagens Obtidas a Alta Velocidade de Filmagem.....	52
4.13	Medições das Penetrações	58
4.14	Sistema de Referência para os Campos de Velocidades.....	60
4.15	Diâmetro das Gotículas.....	62
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
5.1	Testes de Vazão	64
5.2	Determinação da Assimetria.....	66
5.3	Medições dos Ângulos Externos.....	69
5.4	Medições dos Ângulos Internos.....	84
5.5	Construção dos Contornos dos Sprays em Coordenadas Cartesianas	87

5.6	Medições dos Ângulos pelo Ajuste Linear	90
5.7	Comprimento de Quebra.....	92
5.8	Medições das Penetrações	95
5.9	Campos de Velocidades	101
5.9.1	Gasolina.....	101
5.9.2	Etanol	109
5.9.3	Água	117
5.9.4	Considerações finais a respeito das velocidades	125
5.10	Estimativas para o Diâmetro das Gotículas	127
6	CONCLUSÕES.....	135
7	TRABALHOS FUTUROS.....	137
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	138
	APÊNDICE 1 – Rotina para a análise de uma única imagem (ângulo externo)	140
	APÊNDICE 2 – Rotina para a análise de 30 imagens (ângulo externo)	142
	APÊNDICE 3 – Rotina para análise de 30 imagens (ângulos externos, ângulos internos, bordas em coordenadas cartesianas, desvio padrão médio).....	145
	APÊNDICE 4 – Determinação do comprimento de Quebra (análise de 30 imagens).....	149
	APÊNDICE 5 – Obtenção dos Perfis de velocidades.....	152

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento do interesse na economia de combustível na área automotiva, muitos engenheiros têm concentrado seus esforços no desenvolvimento de motores que promovam, além de uma redução significativa no consumo específico de combustível, o enquadramento dos mesmos nas especificações mais restritas referentes às emissões de poluentes. Comparando os motores à gasolina de ignição de centelha convencionais, com os motores diesel de ignição por compressão, é evidente a maior redução do consumo específico de combustível e conseqüente aumento de economia de combustível dos motores de ignição por compressão com injeção direta de combustível. Isto ocorre principalmente devido à maior razão de compressão destes motores, ZHAO et al. (2002).

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

Neste contexto o objetivo do presente trabalho consiste na análise de uma parte do processo de injeção direta constituída na atomização de um spray cônico produzido por um injetor de orifício único. A injeção direta constitui hoje em um tema atual no desenvolvimento de motores de combustão interna tornando assim o estudo dos parâmetros dos sprays envolvidos no processo, de extrema importância. A sugestão de estratégias de estudo e análises tendo como alvo as características destes sprays insere o trabalho dentro de um contexto atual do desenvolvimento tecnológico.

Estudar parâmetros relacionados às características dos sprays é uma tarefa relativamente árdua. Para o caso do ângulo de cone, por exemplo, LEFEBVRE (1989) comenta que a maior dificuldade encontrada nestas medições é que o cone possui fronteiras curvas devido aos efeitos da interação com a atmosfera gasosa. Este trabalho estabelece uma abordagem alternativa de análise deste parâmetro que leva em consideração estas dificuldades. Outros parâmetros de relevância, também foram alvos de estabelecimento de metodologias de análises. .

2 OBJETIVOS E RELEVÂNCIA

Os objetivos do presente trabalho são constituídos da proposição de metodologias à análise dos sprays obtidos por um injetor de injeção direta de gasolina.

Uma das metas do presente trabalho é estabelecer uma forma de medição de parâmetros relevantes dos sprays de forma automática, através de rotinas computacionais construídas para análise de imagens do processo de injeção.

A análise dos campos de velocidades obtidos pela técnica de Velocimetria por Imagens de Partículas também constituiu em importante ferramenta. As análises permitiram alcançar o objetivo de aprofundamento do conhecimento das características dos escoamentos e as velocidades envolvidas na pressão de injeção dos testes.

A injeção direta como uma tendência atual alternativa na tentativa de melhorar o desempenho e ao mesmo tempo reduzir as emissões de CO₂ dos motores a gasolina, torna de extrema importância o estudo, análise e entendimento das características da atomização do fluido combustível diretamente injetado dentro da câmara de combustão.

A relevância do estudo, portanto, está concentrada no aprofundamento do entendimento do processo de atomização dos sprays cônicos da injeção direta, através da sugestão de metodologias de análises e o estabelecimento de estratégias automatizadas de aquisição de dados e quantificação dos parâmetros relevantes envolvidos no processo.

Este estudo pretende ainda constituir um estágio sobre o qual apoie o desenvolvimento de simulações e aquisição de conhecimentos mais avançados em futuros trabalhos relacionados ao tema.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Sistemas de Injeção Direta de Gasolina

Desde a primeira série de motores de injeção direta de gasolina lançada pela Mitsubishi em 1995, o desenvolvimento destes motores passou por um considerável avanço. A principal razão desta tendência é que o consumo dos motores atuais deve ser significativamente reduzido com o objetivo de atender as futuras exigências de redução das emissões de CO₂. Os motores diesel apresentam excelente eficiência, mas deixam a desejar no quesito emissões de 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 diesel com os motores a gasolina e reduzir as emissões de CO₂, BAUMGARTEN (2006).

Nas quatro últimas décadas, um dos objetivos das pesquisas em motores de combustão interna, tem sido o desenvolvimento de motores que combinem as melhores características dos motores diesel com aqueles convencionais de ignição por centelha à gasolina. O objetivo é combinar a potência específica do motor à gasolina com a eficiência do motor diesel. Trabalhos técnicos significativos na área têm demonstrado que este objetivo tem sido melhor aproximado através do desenvolvimento de motores de injeção direta quatro tempos com ignição por centelha, ZHAO et al. (2002).

A maior diferença entre os motores convencionais com injeção de combustível no coletor de admissão e os motores de injeção direta refere-se à estratégia de preparação da mistura ar-combustível, ilustrada esquematicamente na Figura 3.1.

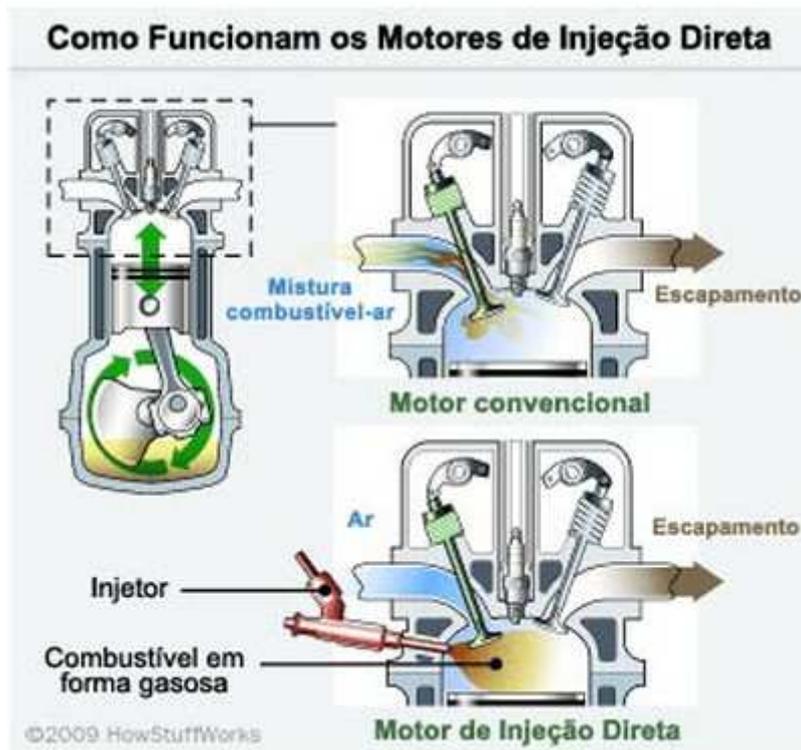


Figura 3.1 - Diferença entre a injeção no coletor de admissão e a injeção direta, PARKER (carros.hsw.uol.com.br).

Em um motor a gasolina dotado de injeção convencional de combustível, a gasolina toma um caminho menos direto do que nos motores de injeção direta. Essa abordagem indireta causa toda espécie de ineficiência na queima de combustível e pode resultar no desperdício de muita energia utilizável, PARKER (carros.hsw.uol.com.br).

Em um motor de injeção direta, porém, não existe o período de espera que o combustível teria de sofrer em um motor convencional, e em lugar disso, a injeção ocorre diretamente à câmara de combustão. Isso permite que ele seja queimado de maneira mais regular e completa. Este fato pode significar menor consumo e maior potência, PARKER (carros.hsw.uol.com.br).

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

As principais vantagens do sistema de injeção direta comparativamente ao sistema convencional de injeção no coletor de admissão encontram-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Vantagens da injeção direta sobre o sistema convencional de injeção no coletor de admissão, ZHAO et al (2002).

Economia de Combustível	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Substancial redução de perdas de bombeamento. ➤ Menor perda de calor. ➤ Possibilidade de utilização de maior razão de compressão. ➤ Aumento de eficiência volumétrica. ➤ Interrupção da injeção durante a desaceleração do veículo pode ser empregada.
Dirigibilidade	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Melhor resposta transiente. ➤ Melhor início de funcionamento a frio.
Controlabilidade da Razão Ar/Combustível	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Maior rapidez de início e estabilização da combustão. ➤ Menor necessidade de enriquecimento durante início de funcionamento.
Emissões	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Redução de emissão de hidrocarbonetos. ➤ Redução de emissão de CO₂

Apesar das importantes vantagens propiciadas pelos motores de injeção direta de gasolina comparativamente ao sistema de injeção no coletor de admissão, os motores convencionais possuem algumas vantagens limitadas devido às características do sistema de admissão que permite uma pré-vaporização do combustível. Quando o combustível é injetado dentro do cilindro diretamente, o tempo disponível para preparação da mistura é significativamente reduzido. Como consequência, o nível de atomização do spray combustível deve ser fino o suficiente para possibilitar rápida evaporação. Gotículas com tempo inadequado de vaporização tendem a produzir emissões com elevado teor de hidrocarbonetos. Algumas outras vantagens dos motores convencionais tais como o sistema de baixa pressão e altas temperaturas de exaustão para melhorar a eficiência catalítica constituem em desafios para os sistema de injeção direta, ZHAO et al. (2002).

3.2 Representação Matemática de uma Imagem

A palavra imagem tem origem no termo latim imago, que significa representação visual de um objeto. Em grego, corresponde ao termo eidos, raiz etimológica do termo Idea ou eide. Esse conceito foi desenvolvido por Platão, que considerava a Idea (ou teoria do idealismo) da coisa a sua imagem (uma projeção na mente). Aristóteles pelo contrário, considerava a imagem como sendo uma aquisição dos sentidos, a representação mental de um

objeto real, fundando a teoria do realismo. A controvérsia iniciada na Grécia antiga chegaria aos dias atuais, mantendo-se viva em praticamente todos os domínios do uso de imagens, CONCI (2008).

As imagens podem ter origens diversas. Podem ser captadas por comprimento de onda de radiação eletromagnética (máquinas fotográficas) ou por ondas sonoras de alta frequência, como, por exemplo, o ultrassom. No caso das imagens captadas por radiação, elas podem ser obtidas por radiações refletidas por objetos iluminados por fontes, por radiações absorvidas, por objetos translúcidos ou diretamente do emissor da radiação (objetos emissores), CONCI (2008).

Depois que a energia luminosa, refletida ou irradiada pelo objeto, sensibilizar um dispositivo de captação ou visão, seja este o olho humano, um sensor ou uma câmera, a imagem passa a ser processada e pode ser analisada pelo cérebro ou pelo computador, CONCI (2008).

Uma imagem digital consiste na formatação de sua representação de modo que os computadores possam utilizá-la. Para o processamento, a imagem é digitalizada, ou seja, é convertida de contínua (real) para uma representação discreta (digital), podendo assim ter uso computacional, CONCI (2008).

A imagem contínua pode ser modelada matematicamente pela equação 3.1.

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

onde 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) . Essa função é convertida em sinal elétrico pelo dispositivo de captura e transmitida para um computador. Com base nessa informação, torna-se possível desenvolver algoritmos de processamento de imagens, análise de imagens, visão computacional e todas as outras áreas da computação gráfica que usam imagens digitais como dado de entrada.

As imagens digitais são formadas por um conjunto de subunidades de cor. Cada uma dessas subunidades recebe a denominação de pixel (do inglês picture element). O caso

mais utilizado de discretização espacial de uma imagem consiste em tomar o pixel como sendo um retângulo.

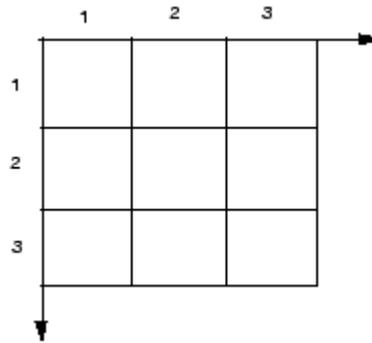


Figura 3.2 - Representação dos pixels de uma imagem como elementos retangulares.

Cada posição de um pixel da imagem pode, portanto, ser representada por coordenadas inteiras (j,k) . O pixel na parte superior e à esquerda da Figura 3.2, por exemplo, possui coordenadas $(1,1)$, o pixel abaixo deste na linha seguinte possui coordenadas $(2,1)$ e o pixel do lado direito, coordenadas $(1,2)$ e assim sucessivamente. As imagens podem então serem 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 3.3 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 1 e determinam pixels claros e todos os outros elementos têm valor 0 e determinam pixels escuros.

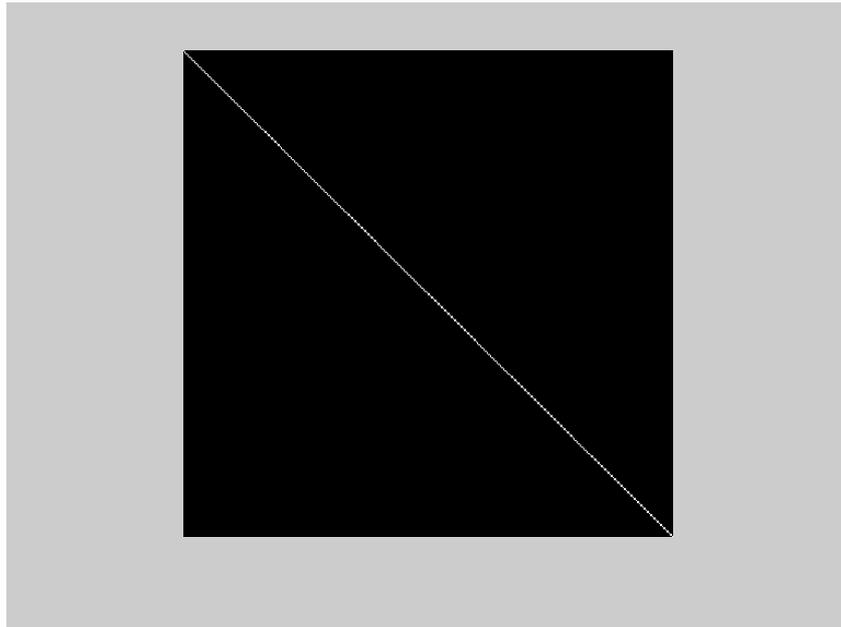


Figura 3.3 - Matriz identidade 300 x 300 representada como uma imagem.

Na representação matricial, a imagem é descrita por um conjunto de células em um arranjo espacial bidimensional, uma matriz. Cada célula representa os pixels (ou pontos) da imagem matricial. Os objetos são formados usando adequadamente esses pixels. A Figura 3.4 descreve melhor as formas de descrição de imagens matricial. Essa é a representação usualmente empregada para formar a imagem nas memórias e telas dos computadores e na maioria dos dispositivos de saída gráficos (impressoras e vídeos), AZEVEDO (2003).

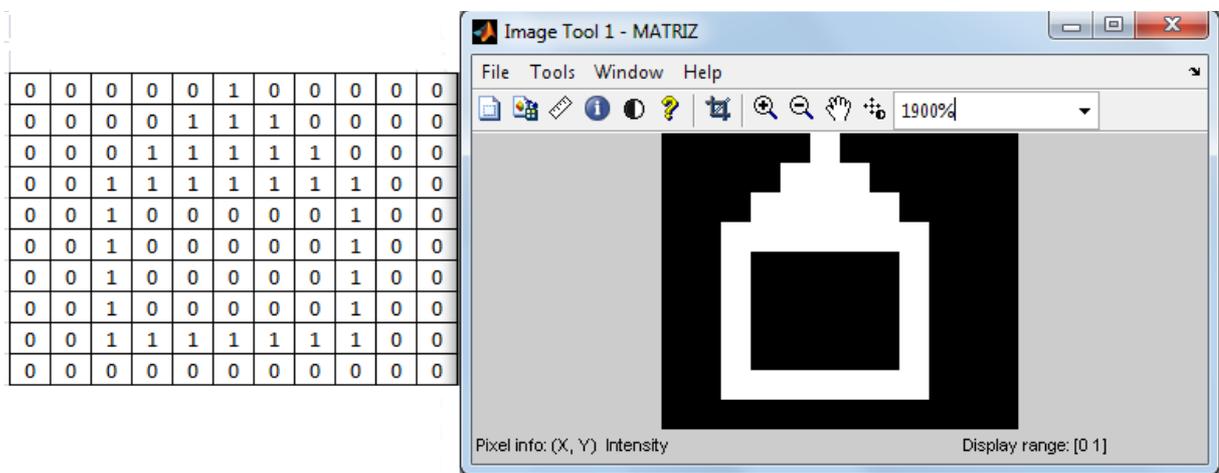


Figura 3.4 - Uma matriz (à esquerda) com a representação de sua imagem (à direita)

Imagens digitais que usam apenas duas cores como as das Figura 3.3 e 3.4 são denominadas imagens binárias.

Devido à capacidade humana de entender desenhos de linha, silhuetas e outras imagens formadas usando somente dois níveis de cinza, as imagens binárias ainda são úteis em várias aplicações, principalmente porque os algoritmos para computar 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 (2008).

As imagens utilizadas neste trabalho, no entanto, são representadas por uma escala de cor que varia do branco absoluto (valor 255) ao preto absoluto (valor 0). Os valores inteiros intermediários representam escalas de cinza.

Algumas imagens necessitam de uma representação matricial tridimensional onde o primeiro plano da mesma forma o conjunto dos valores representativos da intensidade da cor vermelha, o segundo plano representa a intensidade 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 é suficiente para a caracterização de uma imagem, GOMES (2002).

O número de linhas m da matriz de pixels é chamado de resolução vertical da imagem, e o número de colunas n é chamado de resolução horizontal. Denomina-se resolução espacial ou resolução geométrica, da representação matricial ao produto $m \times n$ da resolução vertical pela resolução horizontal. A resolução espacial estabelece a frequência de amostragem final da imagem. Dessa forma, quanto maior a resolução mais detalhe, isto é, altas frequências da imagem podem ser captadas na representação matricial. A resolução espacial dada em termos absolutos não fornece muita informação sobre a resolução real da imagem quando realizada em um dispositivo físico. Isso ocorre porque não é conhecido o tamanho físico do pixel do dispositivo. Uma medida mais confiável de resolução é dada pela densidade de resolução da imagem que fornece o número de pixels por unidade linear de medida, GOMES (2002).

O conhecimento da densidade de resolução das imagens obtidas deste trabalho constituiu em um importante parâmetro na obtenção dos resultados, pois permitiu a associação de unidades como centímetros e metros para deslocamentos nas imagens.

3.3 Shadowgrafia

Shadowgrafia é um termo que se refere a um método simples de visualização de um determinado fenômeno ou mesmo um objeto. O que se faz necessário é apenas uma fonte de luz, um meio de distúrbio à sua propagação e um dispositivo para captar a sombra projetada. O método é bastante antigo e exemplos de sua evolução são encontrados na própria natureza. Certos predadores marítimos são capazes de detectar suas presas transparentes em termos das suas sombras, SETLES (2001).

A grande vantagem da shadowgrafia é a sua extrema simplicidade. Além disso quando as características de escala lateral do objeto ou meio de distúrbio são pequenas, o método apresenta a vantagem adicional de possibilitar grande sensibilidade na detecção de tais características, SETLES (2001).

Muito do conhecimento da shadowgrafia está apoiada em sua essencial ambiguidade: o shadowgrama não é a imagem de um objeto, mas sim a sua sombra. Não existe uma correspondência 1:1 entre um objeto e sua sombra. Shadowgramas são, em geral, fora de escala, SETLES (2001).

Um dos procedimentos experimentais deste trabalho consistiu na associação da técnica de shadowgrafia com a filmagem a alta velocidade do processo de injeção de fluidos por meio de um injetor de injeção direta.

3.4 Velocimetria por Imagens de Partículas - PIV

PIV (Particle Image Velocimetry) é uma técnica não intrusiva para a determinação do campo de velocidades em um escoamento de partículas baseada na determinação direta das duas fundamentais dimensões da velocidade: deslocamento e tempo, RAFFEL et al. (2007).

As partículas devem ser iluminadas em um plano do escoamento pelo menos por duas vezes em um curto intervalo de tempo Δt . A luz refletida 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.

A Figura 3.5 mostra o esquema básico de uma montagem visando determinar o campo de velocidade em um experimento para a obtenção de dois frames correspondentes aos

dois pulsos do laser e a obtenção de dados com base no deslocamento das partículas entre os frames.

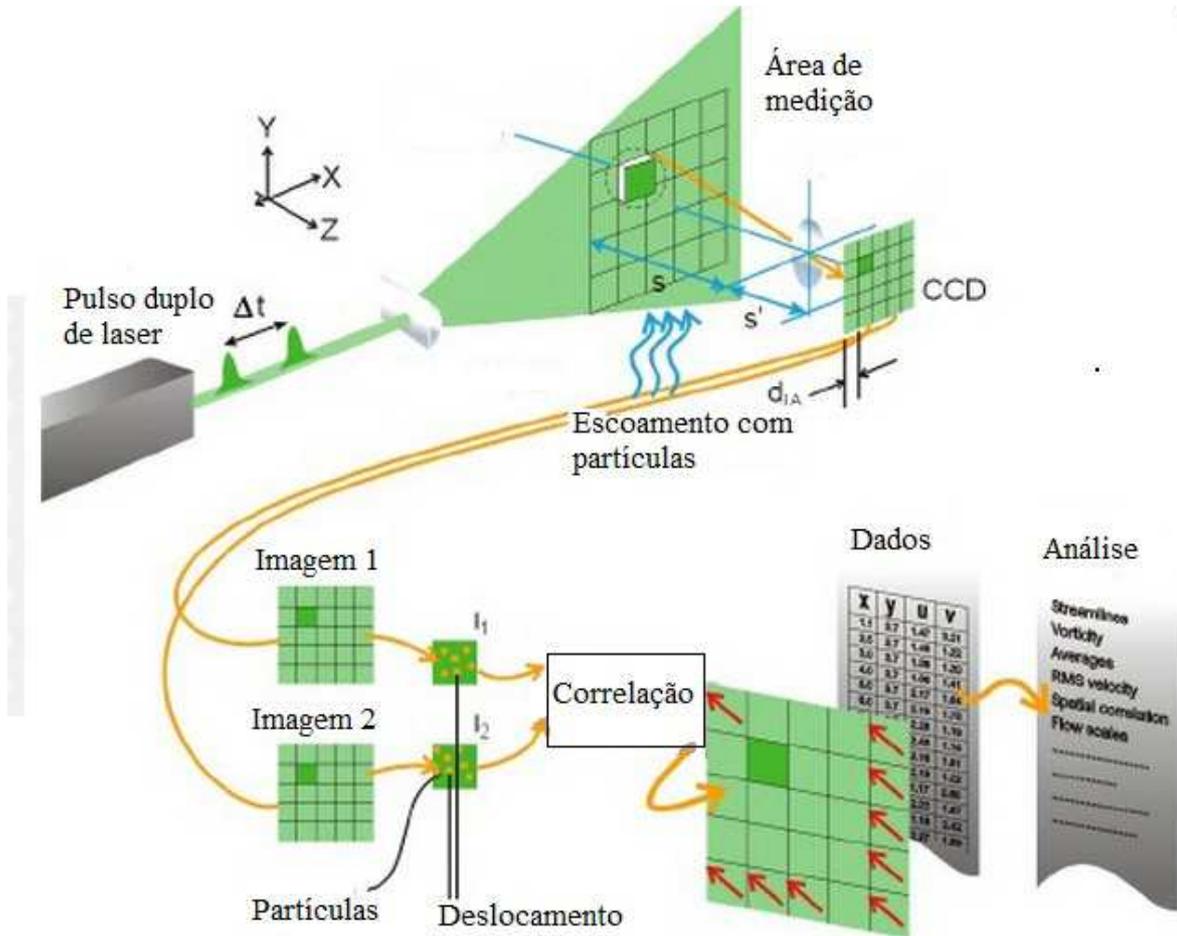
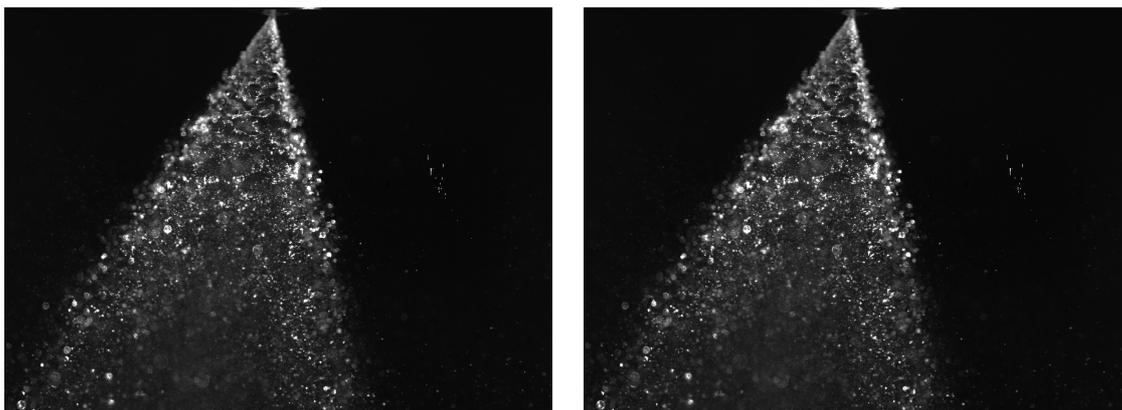


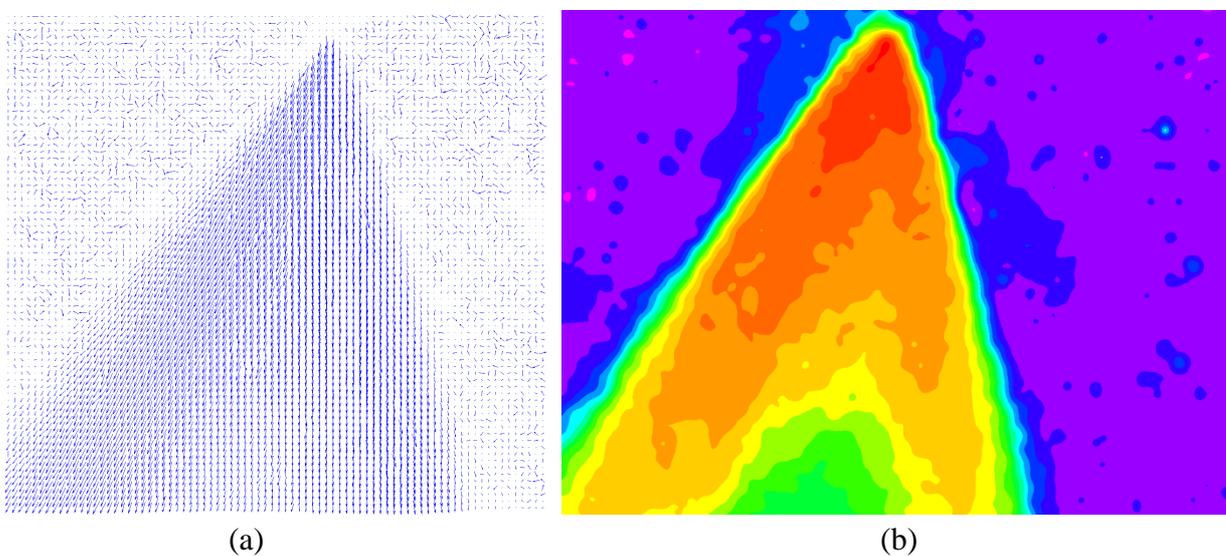
Figura 3.5 - Características da técnica PIV de obtenção de campos de velocidades, DANTEC (dantecdynamics.com).

Como exemplo, a Figura 3.6 mostra duas imagens obtidas da injeção do spray de gasolina no laboratório de combustão do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). A imagem (a) foi iluminada pelo primeiro pulso de luz e a imagem (b) pelo pulso subsequente após 10 microssegundos.



(a) (b)
Figura 3.6 - Frames consecutivos de spray de gasolina obtidos pela técnica PIV.

Também a título de exemplo, a Figura 3.7 (a) mostra um campo de vetores velocidades obtido através do tratamento estatístico de 30 pares de imagens do spray de gasolina em experimento realizado no laboratório de combustão do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG e a Figura 3.7 (b) o correspondente campo escalar onde os tons vermelhos indicam velocidades mais elevadas.



(a) (b)
Figura 3.7 - Campo vetorial de velocidades (à esquerda) e campo escalar (à direita) obtidos por PIV.

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 usuário determina o tamanho dessas áreas e a correlação desejada através do software computacional que acompanha a aquisição das imagens e dos dados. Assume-se que todas as partículas

dentro da área de interrogação se movam homoganeamente entre o pequeno intervalo de tempo dos dois pulsos de iluminação. As velocidades são calculadas levando em consideração o intervalo de tempo entre as duas iluminações, RAFFEL et al (2007).

Algumas características da técnica serão expostas adiante, RAFFEL et al (2007).

Medição de Velocidade não-intrusiva

Por se utilizar de tecnologia ótica, a determinação da velocidade por meio do PIV pode ser utilizada em casos onde a utilização de sondas pode perturbar as características do escoamento.

Medição Indireta de Velocidade

A técnica mede velocidades indiretamente através da velocidade de partículas adicionadas ao fluido em uma fase anterior à medição.

Técnica de Medição em Todo o Campo

PIV é uma técnica que permite obter imagens de grandes partes do campo de escoamento em uma variedade de aplicações em meios líquidos ou gasosos para extrair informações referentes às velocidades destas imagens. Esta é uma particularidade única do PIV. Todas as outras técnicas para medição de velocidades permitem apenas a medição em um único ponto.

Duração do pulso de iluminação

A duração do pulso de luz deve ser curta o suficiente para “congelar” a imagem e evitar a captura de uma imagem com manchas provocadas pelo movimento das partículas.

Tempo entre os pulsos de Iluminação

O tempo entre os pulsos de iluminação deve ser longo o suficiente para que o deslocamento das partículas seja detectável na resolução de trabalho e curto o suficiente para que seja possível o estabelecimento de uma correspondência das partículas entre uma imagem e outra.

Número de componentes do vetor velocidade

Como a iluminação do escoamento se dá em um plano, usualmente, apenas duas componentes para a velocidade são determinadas embora já existam técnicas para a determinação tridimensional das características de um escoamento através de PIV.

3.5 Parâmetros Importantes Associados aos Sprays

Sprays são dispersões físicas de líquidos em meios gasosos e podem ser produzidos de diversas maneiras. Essencialmente o que se faz necessário é uma elevada diferença de velocidades entre o líquido a ser atomizado e a atmosfera gasosa onde o mesmo será descarregado. Os dispositivos destinados a atomizar um líquido são comumente denominados atomizadores, LEFEBVRE (1989).

Em muitas aplicações, a função dos atomizadores, não é somente desintegrar o líquido em pequenas gotículas, mas também descarregar essas gotículas em um meio gasoso com a forma de um spray cônico uniforme e simétrico. Atomizadores de orifício plano produzem sprays com ângulos estreitos e com uma dispersão de gotículas uniforme por todo o volume do cone. Sprays com essas características são denominados como sólidos. Atomizadores do tipo *swirl* também podem produzir sprays sólidos, mas para a maior parte das aplicações o spray é formado por um cone oco com a maior parte das gotículas concentradas em sua periferia, LEFEBVRE (1989).

Em ambos os tipos de atomizadores o jato líquido rapidamente se desintegra em pequenas gotículas que tendem a manter a direção geral de movimento do jato original. Existem, no entanto, forças de resistência com o ar que fazem o spray perder rapidamente seu momentum provocando a formação de uma fina névoa. A dispersão subsequente é formada principalmente através do movimento do ar na região do spray, LEFEBVRE (1989).

Os atomizadores de orifício plano, por produzirem um spray sólido e com estreito ângulo de cone estão menos sujeitos a um grau muito significativo dos efeitos de resistência do ar sobre os sprays produzidos. Assim a distribuição do spray como um todo é determinada principalmente pela magnitude e direção da velocidade na saída (orifício) do atomizador. A situação é inversa para os atomizadores do tipo *swirl* onde o maior grau de dispersão torna mais significativa a influência da resistência do ar por haver maior superfície de contato gás-líquido. Normalmente, qualquer aumento no ângulo do cone do spray irá aumentar o grau de

influência da resistência do ar levando a uma melhor atomização. Essa é uma razão que justifica a importância da caracterização do ângulo de cone para os atomizadores do tipo *swirl*, LEFEBVRE (1989).

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 com a razão do volume de líquido contido no mesmo.

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 de orifício plano que produzem sprays com ângulos de cone estreitos provocam pequenas dispersões. Com atomizadores *swirl* a dispersão é provocada principalmente por outras características tais como o ângulo de 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).

3.5.2 Penetração

A penetração pode ser definida como a máxima distância alcançada quando o spray é injetado em uma 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 a medida 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 subseqüente é conduzida principalmente pela gravidade e pelo movimento da atmosfera gasosa, LEFEBVRE (1989).

Em todos os sistemas de combustão de injeção direta de gasolina 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 et al (2002).

As características da penetração dos injetores de injeção direta de gasolina são influenciadas por muitos parâmetros operacionais, dentre os principais estão a pressão e a

densidade dentro da câmara de combustão, a pressão de injeção, a temperatura do injetor e a volatilidade do combustível, ZHAO et al. (2002).

Alguns parâmetros operacionais possuem pouca influência na penetração induzida por injetores de injeção direta e geralmente podem ser ignorados. O primeiro parâmetro de pouca influência é a taxa de pulsos do injetor, que é o período em milissegundos entre as injeções. Se a taxa de repetição é 100 ms, 50 ms ou 33 ms (10Hz, 20Hz ou 30Hz), a curva de penetração do spray é apenas levemente alterada. O segundo parâmetro constitui na duração do pulso de injeção que pode ter um efeito significativo na distância máxima de penetração, mas um efeito muito pequeno na taxa máxima de penetração (velocidade de penetração). A taxa máxima de penetração é alterada apenas por durações de pulsos muito pequenas (geralmente menor que 1 milissegundo). Isto ocorre porque a taxa máxima de penetração ocorre próximo ao atomizador e normalmente bem no início da injeção, ZHAO et al (2002).

A penetração tem importância crucial em motores diesel. Altas penetrações podem provocar o impacto do combustível nas paredes da câmara de combustão. Isto é aceitável se as paredes estão aquecidas e uma quantidade considerável de ar esteja presente, do contrário haverá desperdício de combustível. Por outro lado, se a penetração é inadequada, a mistura ar combustível pode tornar-se insatisfatória. O desempenho ótimo do motor é alcançado quando a penetração é combinada adequadamente ao 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 significativamente aberto, sofre maior efeito da resistência do ar tendendo a possuir baixa penetração LEFEBVRE, (1989).

3.5.3 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 mudam com uma mudança nas condições de pressão ambiente, existe uma dificuldade inerente na definição e correlação dos ângulos de cone, ZHAO et al. (2002).

Imagens dos sprays em um instante de tempo específico são usualmente utilizadas para a definição do ângulo de cone próximo ao orifício do injetor. As medições deste parâmetro costumam possuir diferentes metodologias. Usualmente uma linha horizontal pode ser traçada em uma distância especificada do orifício do injetor e os pontos de intersecções determinados com as bordas direita e esquerda, podem ser tangenciadas com linhas retas partindo do orifício. Dessa forma o ângulo subentendido entre as retas partindo do orifício, caracterizam 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 et al (2002).

3.5.4 Comprimento de quebra (breakup)

BAUMGARTEN (2006) comenta os diferentes mecanismos para o comprimento de quebra usualmente definido como a distância entre o injetor e o ponto do espaço onde ocorre a aparição das primeiras gotículas líquidas. Segundo o autor tais mecanismos são dependentes da velocidade relativa entre o líquido e o ambiente gasoso ao qual o líquido é descarregado.

Segundo LEFEBVRE (1989) quando um jato líquido emerge de um injetor como uma fase contínua em formato de um corpo cilíndrico, é estabelecida uma competição entre forças coesivas e de desintegração que provocam oscilações e perturbações. Em condições favoráveis, as oscilações são amplificadas e a fase líquida contínua é desintegrada em gotas. Este processo é algumas vezes referido como atomização primária. Se as gotículas formadas excedem um tamanho crítico, a posterior desintegração em gotículas menores, uma atomização secundária ocorre.

BAUMGARTEN (2006) também cita a desintegração do jato líquido em gotículas em duas etapas. A primeira delas inicialmente mais próxima ao injetor (quebra primária) e uma posterior caracterizada na quebra das gotículas formadas em gotículas menores (quebra

secundária). A Figura 3.8 mostra um esquema demonstrando os dois processos bem como a penetração e o ângulo de cone.

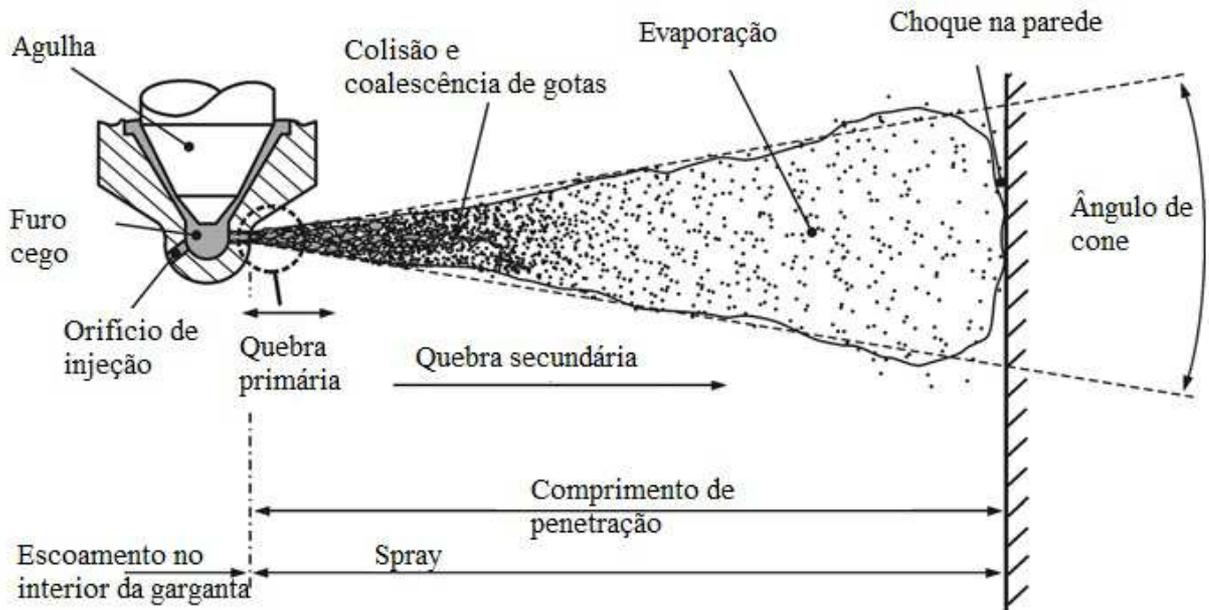


Figura 3.8 - Esquema de um spray mostrando a penetração, o ângulo de cone, e as desintegrações primária e secundária, BAUMGARTEN (2006).

3.5.5 Diâmetro das gotículas

Segundo GANESAN (1994), atomizações finas reduzem a demora da ignição, devido ao maior volume superficial do combustível. O autor comenta que menores tamanhos de gotas induzem a um menor grau de penetração devido à menor quantidade de movimento das gotas e menor velocidade relativa ao ar do qual o combustível deve encontrar o oxigênio após a vaporização.

HEYWOOD (1988) também ressalta a importância da necessidade da atomização do combustível em pequenas e numerosas gotículas para possibilitar uma grande área superficial e 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 de gotas. 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 3.9 mostra o exemplo de um histograma de diâmetro de gotas típico e a Figura 3.10 mostra uma curva de distribuição de frequências.

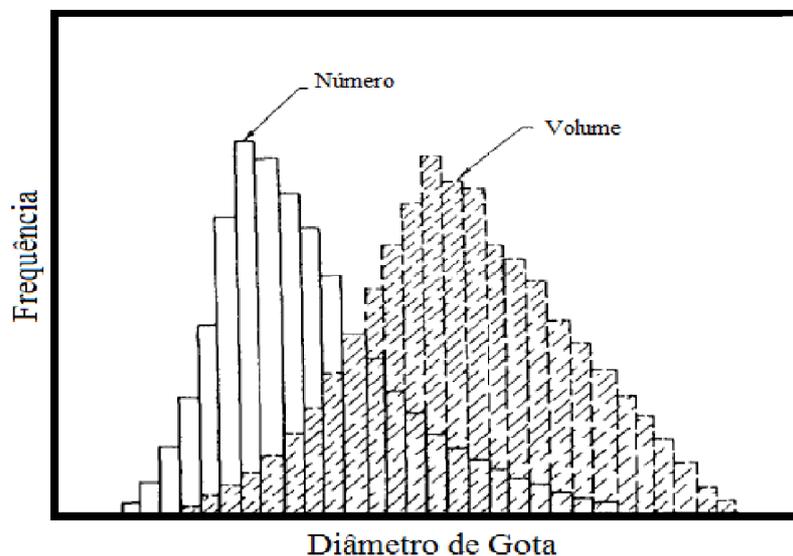


Figura 3.9 - Histogramas de gotículas baseados em número e volume, LEFEBVRE (1989).

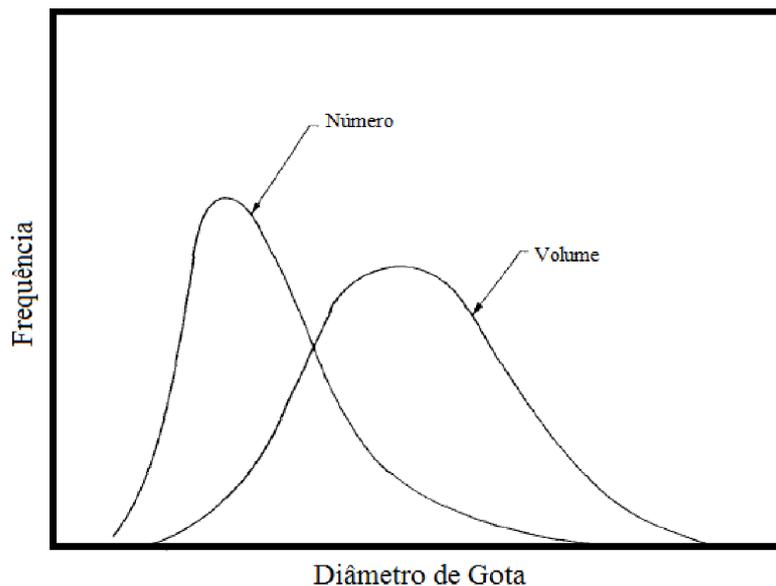


Figura 3.10 - Curvas de Frequência baseadas em número e volume, LEFEBVRE (1989).

As Figuras 3.9 e 3.10 mostram que se for substituído o histograma ou a curva de frequência referente ao número das gotas, pelo volume das mesmas haverá um deslocamento dos gráficos para a direita. Isto ocorre devido ao maior efeito no volume das gotículas maiores.

LEFEBVRE (1989) também explica que em muitas aplicações é conveniente trabalhar somente com um valor médio de diâmetros ao invés da completa distribuição de tamanhos. Os diâmetros médios podem ser caracterizados por diversas expressões, cada uma delas específicas a uma dada aplicação. A expressão geral destas expressões está representada pela Equação 3.2.

$$D_{ab} = \left[\frac{\sum N_i D_i^a}{\sum N_i D_i^b} \right]^{\frac{1}{(a-b)}} \quad (3.2)$$

em que 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} , o Diâmetro Médio de

Sauter, é o diâmetro da gota cuja razão do volume pela área superficial é a mesma que aquela para todo o spray. Estes e outros importantes diâmetros médios estão listados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Diâmetros médios e suas aplicações, LEFEBVRE (1989).

a	b	Ordem	Símbolo	Nome	Expressão	Aplicação
1	0	1	D10	Comprimento	$\frac{\sum N_i D_i}{\sum N_i}$	Comparações
2	0	2	D20	Área superficial	$\left(\frac{\sum N_i D_i^2}{\sum N_i D_i}\right)^{\frac{1}{2}}$	Controle de área superficial.
3	0	3	D30	Volume	$\left(\frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i}\right)^{\frac{1}{3}}$	Controle de volume
2	1	3	D21	Superfície área-comprimento.	$\frac{\sum N_i D_i^2}{\sum N_i D_i}$	Absorção
3	1	4	D31	Volume-comprimento	$\left(\frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i D_i}\right)^{\frac{1}{2}}$	Evaporação, difusão
3	2	5	D32	Sauter	$\frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i D_i^2}$	Transferência de massa, reações.
4	3	7	D43	De Brouckere ou Herdan	$\frac{\sum N_i D_i^4}{\sum N_i D_i^3}$	Combustão.

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 primordiais importâncias na análise. Além disso, não existe uma correlação universal entre o diâmetro médio com a distribuição de tamanhos.

3.6 Trabalhos Relacionados à Análise dos Sprays

Como comentado anteriormente, a principal dificuldade na definição e medição do ângulo de cone é que o spray possui fronteiras curvas devido aos efeitos da sua interação com o ar. Deste modo, diversos autores propõem diferentes formas e metodologias na caracterização dos sprays quanto ao ângulo de cone com o auxílio de um tratamento de imagens digitais obtidas do processo de injeção.

No trabalho de CHENGLI et al. (2011), a medição do ângulo de cone foi realizada através de um processamento automático. Previamente, uma série de tratamentos das imagens digitais do processo de injeção como a redução de ruídos, realce das imagens, detecção de borda e conversão da imagem para a forma binária se fez necessária. Após estas etapas foram realizadas nas imagens resultantes, um procedimento para detecção de linhas retas (Transformada de Hough) as quais se localizaram aproximadamente coincidentes às bordas do spray e o ângulo foi então determinado através do cálculo da inclinação destas linhas.

Procedimento semelhante foi realizado por LU PEI et al. (2009), cujo trabalho consistiu na aquisição de imagens de chuveiro em funcionamento, seu posterior tratamento para a eliminação de ruídos e a aplicação da transformada de Hough para a construção de linhas retas nas fronteiras do jato líquido. As duas fronteiras foram determinadas de modo a englobar todos os jatos dos orifícios individuais de modo que a medição de ângulo neste caso correspondeu ao ângulo global e não ao ângulo individual dos jatos dos orifícios.

SHAO et al. (2006) estudaram algumas propriedades macroscópicas em dois injetores diesel, dentre elas o ângulo de cone. Com o intuito de alcançar melhor entendimento das propriedades dinâmicas dos sprays, diferentemente do que é comumente definido como ângulo de cone onde mensura-se apenas o ângulo formado por duas retas saindo do orifício e tangenciando as bordas do cone, foram definidos e medidos dois ângulos. Um mais próximo ao orifício a uma distância entre 60D e 100D do mesmo, onde D é o diâmetro do orifício dos injetores e outro situado a uma distância além de 100D. Os ângulos também foram determinados por retas partindo do orifício e tangenciando as bordas dos sprays nas faixas de distâncias escolhidas. Os resultados demonstraram que os ângulos são maiores com pressões de injeção mais altas do que os ângulos obtidos com pressões de injeção menores. Os dados também tiveram flutuação maior para as pressões mais altas indicando que as pressões altas induzem maiores turbulências nos sprays tornando-os menos estáveis. Além disso, os ângulos obtidos na faixa de distância situada mais próxima ao orifício foram significativamente maiores que os ângulos obtidos para as distâncias maiores.

Alguns autores dão enfoque maior às influências de parâmetros de injeção nas características dos sprays e apenas citam de forma breve o procedimento utilizado na medição dos ângulos quando tal parâmetro é incluído na análise. São os casos dos trabalhos de DING et al. (2011) e SHAFEE et al. (2010). A proposição de uma metodologia para as medições dos ângulos não é o intuito principal destes trabalhos.

DING et al (2011) estudaram os efeitos da pressão de injeção, pressão e temperatura ambientes dentro de uma câmara de volume constante utilizando um injetor de seis orifícios. O ângulo do cone foi um dos parâmetros avaliados mensurado através de retas tangentes às bordas do spray nas imagens da injeção. Os resultados demonstraram independência entre o ângulo do cone e a pressão de injeção, mas ocorreram flutuações nos resultados referentes à pressão dentro da câmara, pois grande quantidade de gotículas foram carregadas para altas pressões ambientes tornando os contornos dos sprays menos nítidos. A variação da temperatura ambiente teve pouco efeito no ângulo de cone.

SHAFEE et al. (2010) estudaram a influência das condições de escoamento no ângulo de cone de um atomizador de dois fluidos utilizando um sistema de visualização constituído de filmagem a alta velocidade. O processo de medição consistiu no cálculo do ângulo para cada condição de escoamento utilizando um processamento de imagens através de uma análise quadro por quadro verificadas por medições manuais com retas traçadas às bordas do fluido. O ângulo de cone foi determinado para uma faixa de números de Reynolds variando entre 4×10^9 a 9×10^9 . Os resultados mostraram dependência dos ângulos com as condições operacionais. Uma correlação empírica foi obtida aplicando análise dimensional relacionando o ângulo com os números de Reynolds e Weber.

DING et al. (2010) estudaram as características dos sprays produzidos pela nova geração de injetor de injeção direta multiorifícios através de simulação numérica do spray líquido. Características dos sprays tais como a penetração, o diâmetro médio de Sauter e a taxa de evaporação foram separadamente analisados. Os resultados mostraram que maiores temperaturas do ar ambientes e mais altas pressões do óleo obtiveram bons resultados na taxa de evaporação e na ação da mistura ar-combustível.

PARK et al. (2009) estudaram a atomização de três diferentes fluidos combustíveis em um injetor de injeção direta de gasolina: 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 dos sprays, o diâmetro médio de Sauter das gotículas, a penetração e largura dos sprays foram medidas experimentalmente e também obtidas por simulação numérica. Os resultados demonstraram 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 demonstraram boa concordância com os experimentais predizendo de forma acurada a geometria dos sprays.

ALEIFERIS et al. (2010) utilizaram uma análise constituída de shadowgrafia com alta velocidade e Phase Doppler Anemometry (PDA) para investigar a formação de sprays e as características de combustão da gasolina e do E85 (85% de etanol e 15% de gasolina) produzidos por um injetor multi-orifícios. Foram analisadas as características na faixa de pressões ambientes entre 0,5 e 1,0 bar e temperaturas entre 20 e 120°C. Os ensaios foram realizados em um motor com acesso óptico e os resultados demonstraram que o E85 apresentou menor sensibilidade às mudanças de pressão e temperatura.

ZIGAN et al. (2010) usaram as técnicas PDA (Phase Doppler Anemometry) e Mie Scattering para avaliar a influência da composição do combustível na estrutura dos sprays produzidos por um injetor solenóide multi-orifícios de injeção direta de gasolina em uma câmara com condições de pressão e temperatura correspondentes ao término da injeção e próximas à ignição. Adicionalmente foi utilizada uma condição de temperatura inferior dentro da câmara para analisar a dependência das características dos sprays com esta variável. Os fluidos utilizados foram o n-hexano, n-heptano, n-decano e uma mistura dos três componentes em proporções que apresentou propriedades similares às da gasolina. As medições por PDA foram localizadas na posição representada pela localização da centelha. Os resultados demonstraram que para uma alta temperatura ambiente e alta pressão na câmara a estrutura dos sprays foram diferentes, enquanto que para baixa temperatura dentro da câmara o comportamento da atomização foi similar para todos os fluidos.

MÜLLER et al.(2010) utilizaram PIV de alta velocidade para estudar campos de velocidades em um motor à gasolina de injeção direta opticamente acessível. Os campos de escoamento gravados corresponderam à segunda metade da compressão e as rotações escolhidas foram 500, 1000 e 2000 rpm. Na parte de resultados o trabalho apresenta uma sequência do campo médio obtido de 73 ciclos consecutivos para 1000 rpm que revelaram um vórtex de 30 a 40 mm de diâmetro. A evolução temporal do vórtex revelou grande variabilidade na direção horizontal enquanto na direção vertical o campo é determinado principalmente pelo movimento ascendente do pistão.

4 METODOLOGIA

4.1 Introdução

Todos os testes experimentais do presente trabalho foram realizados no Laboratório de Combustão do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais.

A matéria-prima para a geração dos resultados são imagens do processo de injeção e campos de velocidades.

As imagens foram obtidas através de duas técnicas diferentes: uma utilizando a técnica de Velocimetria por Imagens de Partículas PIV (do inglês Particle Image Velocimetry) e a outra através da obtenção de imagens a uma alta velocidade (alta taxa de quadros por segundo). A técnica PIV também foi utilizada para a obtenção dos campos de velocidades.

A obtenção das imagens por PIV deste trabalho ocorreu pelo espalhamento da luz nas gotículas dos sprays captadas em uma câmera CCD. Para as imagens obtidas a alta frequência de quadros, a câmera, o spray e a fonte de iluminação contínua foram alinhados com o spray na posição central e a aquisição foi realizada através de shadowgrafia onde a sombra do fluido injetado é captada pela câmera.

Os fluidos testados foram a água, a gasolina C e o etanol combustível, todos submetidos aos mesmos parâmetros experimentais de injeção, tais como a simulação da rotação do motor, a pressão de injeção e os intervalos de tempo de abertura e fechamento do injetor.

O ambiente de programação MATLAB foi utilizado para a manipulação das matrizes de pixels das imagens e as matrizes numéricas correspondentes aos campos de velocidades do escoamento dos sprays. As rotinas matemáticas de tratamento de imagens e dados foram criadas e executadas neste ambiente.

Os valores dos pixels das imagens em um perfil em formato de arco centrado no orifício foram analisados. Um sistema de coordenadas baseado no sistema polar foi adotado e os valores dos pixels foram analisados em função do seu posicionamento angular. O

conhecimento do comportamento dos valores dos pixels, permitiu a criação de uma função matemática para detectar o posicionamento angular das bordas e assim definir os ângulos dos sprays através de arcos confinados entre as fronteiras detectadas. A análise foi estendida para várias posições.

O comprimento de quebra do jato (Breakup) foi obtido através de um critério de avaliação da dispersão da luminosidade das imagens dos sprays obtidas por PIV.

As imagens obtidas a alta velocidade de filmagem permitiram o estudo da penetração nos estágios iniciais das injeções. Gráficos relacionando as penetrações com o tempo foram obtidos e a taxa de penetração foi avaliada através da derivada das equações ajustadas.

Os campos de velocidades também foram analisados através de perfis em formato de arcos de circunferência centrados no orifício e perfis lineares em direção vertical passando pelo orifício do injetor. Os campos de velocidades verticais, horizontais e resultantes foram obtidos e os resultados analisados.

A obtenção das rotinas do MATLAB, criadas para analisar as matrizes de valores numéricos dos pixels, seguiu uma sequência lógica. Inicialmente foi criada uma rotina para analisar apenas uma imagem e uma única posição (Apêndice 1). A execução do programa solicita ao usuário dois parâmetros de entrada. O primeiro constituído do nome da imagem a ser avaliada previamente armazenada no diretório apropriado do MATLAB e o segundo uma distância a partir do orifício que o usuário deseja avaliar. As saídas são constituídas dos valores dos pixels traçados em função do ângulo para a posição escolhida, um gráfico relacionando a função matemática criada para a detecção da borda em função do posicionamento angular e duas imagens: a primeira mostrando a posição do perfil em arco na imagem, e a segunda mostrando outro arco menor confinado entre as fronteiras detectadas pela função, para verificar se as bordas foram coerentemente encontradas. A título de exemplo, as saídas constituídas nas duas imagens para uma determinada imagem do spray de água obtida por PIV, com a distância escolhida de 0,50 cm, encontram-se na Figura 4.1.

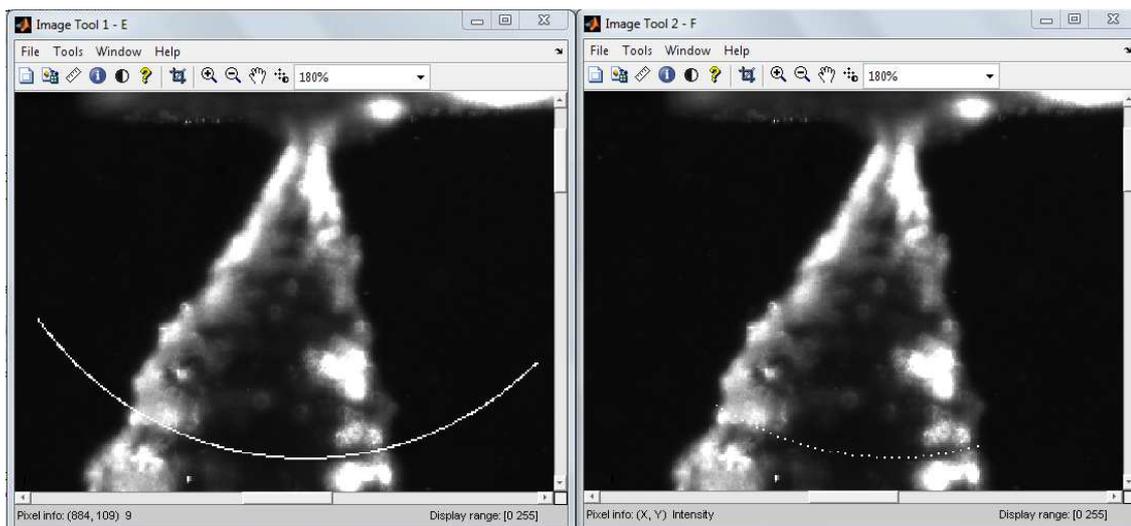


Figura 4.1 - Exemplo das saídas constituídas de imagens da rotina do Apêndice 1.

Em uma fase posterior, estendeu-se a análise para 30 imagens obtidas por PIV e 10 imagens da filmagem a alta velocidade com a consideração de uma faixa de distâncias. O programa construído encontra-se no Apêndice 2. As entradas solicitadas são uma posição inicial, um incremento de distância e uma posição final. A saída consiste em um gráfico do ângulo médio dos arcos confinados entre as fronteiras dos sprays em função da posição.

A análise em seguida incluiu os ângulos internos dos sprays definidos como os ângulos dos arcos confinados entre as bordas internas, o desvio padrão médio dos pixels em arcos dentro das fronteiras externas, e a construção das bordas dos sprays em coordenadas cartesianas. Estas informações são obtidas através de gráficos do programa do Apêndice 3. As entradas do programa também são uma posição inicial, um incremento de distâncias e uma posição final. O programa consiste em uma extensão dos dois programas anteriores.

Para avaliar o comprimento de quebra foi criada a rotina do Apêndice 4. Este programa utiliza as partes das rotinas anteriores responsável à detecção das bordas externas dos sprays para o cálculo do desvio padrão relacionado aos valores dos pixels situados em arcos entre as bordas detectadas.

A rotina do Apêndice 5 avalia o perfil de velocidades vertical, horizontal e resultante em posições determinadas pelo usuário. Dentro dessa rotina é compilada outra rotina que consiste nos vetores contendo os valores numéricos das velocidades de interesse obtidos dos dados exportados do processamento realizado pela técnica PIV.

A Tabela 4.1 resume as entradas e saídas de cada um desses programas.

Tabela 4.1 - Entradas e saídas das rotinas matemáticas criadas no MATLAB.

	Entrada	Saída
Apêndice 1	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Nome de uma imagem. ➤ Distância a partir do orifício. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Valores dos pixels em função da posição angular ➤ Valores da função matemática criada para a detecção das fronteiras em função da posição angular ➤ Imagens mostrando as posições dos pixels na distância fornecida pelo usuário na entrada.
Apêndice 2	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Posição inicial ➤ Incremento de distâncias ➤ Posição final. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Gráfico demonstrando a relação dos ângulos dos arcos confinados entre as fronteiras externas dos sprays.
Apêndice 3	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Posição inicial ➤ Incremento de distâncias ➤ Posição final. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Gráfico do ângulo das bordas externas em função da distância ➤ Gráfico do ângulo das bordas internas em função da distância ➤ Desvio padrão dos pixels em um perfil de arco entre as bordas externas ➤ Bordas internas e externas em coordenadas cartesianas.
Apêndice 4	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Posição inicial ➤ Incremento de distâncias ➤ Posição final. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Posição média equivalente ao desvio padrão máximo de pixels situados em arcos dentro das fronteiras dos sprays.
Apêndice 5	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Posição 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Perfis de velocidades traçadas em função do posicionamento angular ou em uma direção linear.

As rotinas incluídas nos Apêndices foram aquelas utilizadas para a análise do spray de gasolina. As rotinas para a água e o etanol têm exatamente a mesma estrutura lógica. Os elementos diferenciadores são apenas os nomes das imagens, os valores da densidade de resolução e as posições nas matrizes das imagens referentes a um ponto representativo do orifício do injetor que variaram na mudança do fluido de trabalho para os experimentos.

4.2 Configuração Experimental

Foram realizadas aquisições de imagens da injeção de sprays através de dois métodos distintos. Um deles utilizando uma câmera capaz de filmar a uma alta velocidade de quadros e o outro através da técnica de Velocimetria por Imagens de Partículas PIV (do inglês Particle Image Velocimetry) utilizando o equipamento Laser Dantec Dynamics 2D PIV 15,0 Hz da Figura 4.2 e o software computacional Dynamic Studio, que acompanha o equipamento.

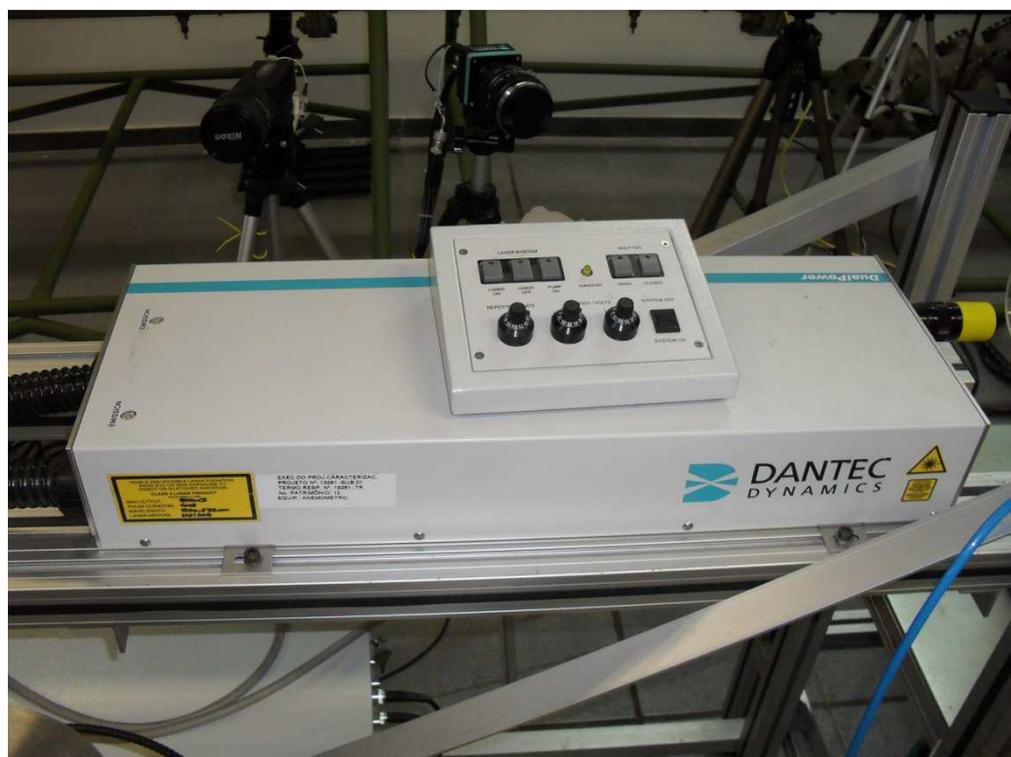


Figura 4.2 - Equipamento Laser Dantec Dynamics PIV 2D 15 Hz.

As injeções foram realizadas em uma câmara de acrílico com quatro janelas laterais através do seu flange superior adaptável ao sistema de injeção. A Figura 4.3 mostra o esquema da câmara utilizada.

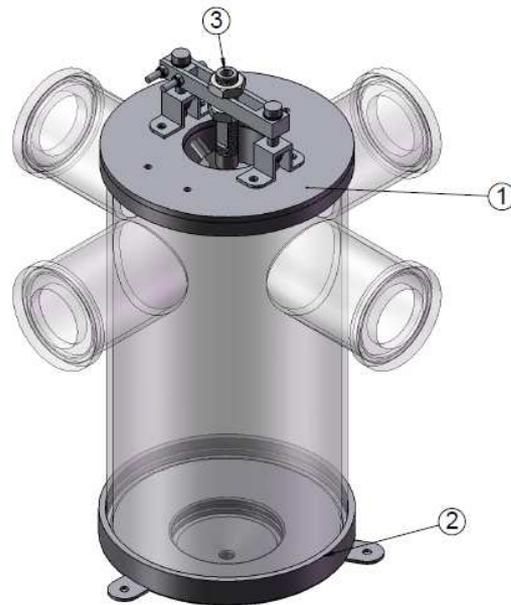


Figura 4.3 - Esquema da câmara de acrílico utilizada nas injeções com o seu flange superior adaptável ao eletroinjetor (1), flange inferior (2) e adaptador de eletroinjetor (3).

As injeções foram realizadas com um injetor de injeção direta de gasolina, controladas através de um computador conectado a um sistema MOTEC ECU. O injetor utilizado está ilustrado na Figura 4.4. O diâmetro do orifício do injetor medido com auxílio de microscópio foi de 0,557 mm (média de 9 medidas em diferentes orientações do diâmetro) com uma faixa de repetitividade com 95% de probabilidade da média igual a 0,005 mm.



Figura 4.4 - Injetor Bosch DI MOTRONIC

A Figura 4.5 mostra o detalhe da extremidade do injetor e o orifício.



Figura 4.5 - Detalhe do orifício do injetor.

A iluminação na filmagem a alta velocidade foi constituída de lâmpadas de LED de alta intensidade alimentadas com fonte de corrente contínua para evitar oscilações da luz. A câmera e a lâmpada foram posicionadas em janelas opostas da câmara de acrílico como mostrado na Figura 4.6.



Figura 4.6 - Posições relativas da câmera e iluminação.

Para a aquisição de imagens por PIV, a câmera de alta velocidade foi substituída por uma câmera CCD de 1200 por 1600 pixels de resolução e a lâmpada de iluminação contínua foi desnecessária, pois a iluminação neste caso foi constituída pelo próprio plano de luz emitido pelo equipamento da Dantec posicionado em uma janela da câmara a 90° em relação à câmera CCD. Um trigger externo foi utilizado para sincronizar laser, câmera e injeção para que assim as imagens obtidas correspondessem sempre a um mesmo instante específico da injeção.

A mangueira conectada ao flange superior da Figura 4.6 conduz o fluido proveniente do vaso pressurizado da Figura 4.7 até o injetor e deste para dentro da câmara de acrílico.



Figura 4.7 - Vaso de pressão utilizado nos experimentos.

O vaso da Figura 4.7 foi pressurizado com nitrogênio quando o fluido no seu interior foi a gasolina C ou o etanol hidratado e com ar quando o fluido no seu interior foi constituído de água. Também para as injeções de etanol e gasolina foi realizada uma prévia ambientação da câmara de acrílico com nitrogênio. Para isso as janelas laterais da câmara foram vedadas e o nitrogênio foi injetado através do injetor para dentro da mesma. A pressão de trabalho para os testes foi fixada em 700 kPa.

A Figura 4.8 e a Figura 4.9 mostram os esquemas entre as posições relativas do spray, câmera e iluminação na obtenção dos dados através dos dois diferentes métodos.

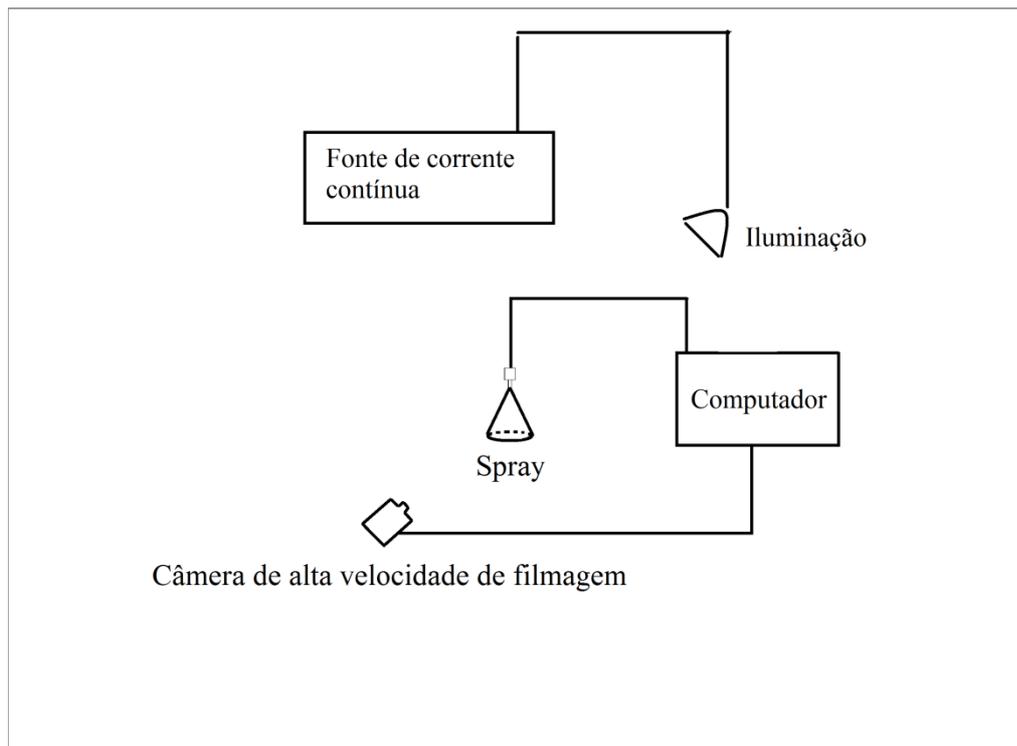


Figura 4.8 - Posições relativas entre câmera, iluminação e spray para as imagens obtidas por shadowgrafia.

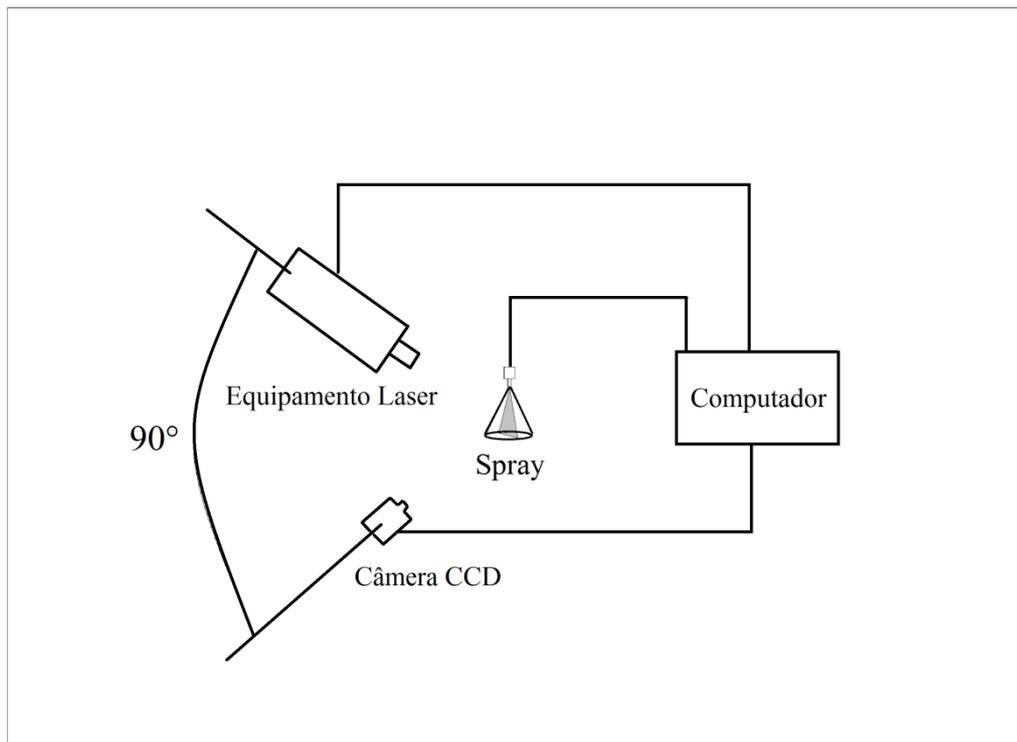


Figura 4.9 - Posições relativas entre câmera, laser e spray para as imagens obtidas por PIV.

O equipamento de laser trabalha com pares de pulsos separados por um intervalo de tempo definido pelo usuário no software computacional do mesmo. Um correspondente par de imagens é então obtido. As imagens adquiridas para este trabalho correspondem a um intervalo de tempo entre pulsos igual a 10 microssegundos. A identificação do deslocamento das gotículas entre os pares de imagens no intervalo de tempo estabelecido permite a aquisição do campo de velocidades do spray.

4.3 Erros Aleatórios Associados aos Resultados Experimentais

Para uma determinada medição X_i , obtida de resultado experimental de uma grandeza X do trabalho, uma faixa de erro aleatório foi associada baseada na Equação 4.1.

$$X \pm t \cdot u \quad (4.1)$$

Na Equação 4.1 o produto $t \cdot u$ é a metade do valor da largura de uma faixa simétrica, dentro da qual, para uma dada probabilidade, o erro aleatório é esperado e representa a repetitividade da medida.

Ainda na Equação 4.1 t é o coeficiente t de Student (valor tabelado) para uma dada probabilidade e $n - 1$ graus de liberdade, sendo n o número de medições realizadas para a grandeza X e u a incerteza padrão (desvio-padrão) das medições.

Aos valores médios resultantes da obtenção de uma série de n de medidas, para um determinado parâmetro X , deste trabalho, uma faixa de erro aleatório foi associada através da repetitividade da média baseada na Equação 4.2.

$$Re_M = \frac{t \cdot u}{\sqrt{n}} \quad (4.2)$$

Assim o resultado da medição é fornecido por:

$$X_M \pm Re_M \quad (4.3)$$

onde X_M é o valor médio do parâmetro X .

Se for associada uma probabilidade de 95% para o coeficiente t de Student, para $n - 1$ graus de liberdade, a Equação 4.2 diz que para uma série de n medições realizada sob as mesmas condições, o valor médio X_M terá uma probabilidade de 95% de estar na faixa determinada pela Equação 4.3. Da mesma forma, uma medição individual X_i , terá probabilidade de 95% de situar-se na faixa determinada pela Equação 4.1, se o coeficiente t de Student para $n - 1$ graus de liberdade corresponder à probabilidade de 95%.

Neste trabalho, para a determinação de ângulos, comprimento de quebra e velocidades pela média dos respectivos valores em 30 imagens, a Equação 4.3 caracterizou o valor de cada parâmetro.

Para o presente trabalho, a determinação de uma grandeza G quando indiretamente determinada por uma função:

$$G = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (4.4)$$

sendo f uma função matemática contínua e derivável, e X_i grandezas obtidas de medições não-correlacionadas. A incerteza combinada da grandeza G foi estimada por:

$$u_c^2(G) = \left[\frac{\partial f}{\partial X_1} u(X_1) \right]^2 + \left[\frac{\partial f}{\partial X_2} u(X_2) \right]^2 + \dots + \left[\frac{\partial f}{\partial X_n} u(X_n) \right]^2 \quad (4.5)$$

A Equação 4.5 foi utilizada, por exemplo, para a incerteza combinada u_c da velocidade V determinada nos ensaios de vazão com água. A velocidade de saída do fluido do injetor foi calculada como a razão entre a vazão volumétrica e a área do orifício. Portanto, a determinação da velocidade foi realizada de forma indireta pelas medições do diâmetro D do orifício e da vazão QM . A incerteza combinada relativa aos efeitos das incertezas nas medições do diâmetro e da vazão foi então obtida da aplicação da Equação 4.5, com $X_1 = QM$ e $X_2 = D$. A Equação 4.6 mostra o resultado.

$$u_c^2(V) = \left[\frac{\partial V}{\partial QM} \cdot u(QM) \right]^2 + \left[\frac{\partial V}{\partial D} \cdot u(D) \right]^2 \quad (4.6)$$

Na Equação 4.6, $u(QM)$ é a incerteza na medição da vazão QM e $u(D)$ a incerteza na medição do diâmetro D . A relação entre a velocidade V com o diâmetro e a vazão é dada pela Equação 4.7:

$$V = \frac{4 \cdot QM}{\pi \cdot D^2} \quad (4.7)$$

e assim as derivadas parciais da Equação 4.6 foram substituídas pelas expressões apropriadas. A Equação 4.8 mostra o resultado das substituições.

$$u_c^2(V) = \left[\frac{4}{\pi \cdot D^2} \cdot u(QM) \right]^2 + \left[-\frac{8 \cdot QM}{\pi \cdot D^3} \cdot u(D) \right]^2 \quad (4.8)$$

Assim $u_c(V)$ calculado pela Equação 4.8 foi utilizado no lugar de u na Equação 4.1 para o caso do cálculo da velocidade de saída do fluido do orifício do injetor pelos ensaios de vazão.

O número de graus de liberdade efetivos ν_{ef} correspondente aos efeitos combinados das medições do diâmetro e da vazão é calculado pela equação de Welch-Satterthwaite:

$$\frac{u_c^4(V)}{\nu_{ef}} = \frac{[u(QM)]^4}{\nu_{QM}} + \frac{[u(D)]^4}{\nu_D} \quad (4.9)$$

sendo ν_{QM} e ν_D os números de graus de liberdade das medições da vazão e diâmetro respectivamente. O coeficiente t de Student foi determinado então, pelo número de graus de liberdade calculado pela Equação 4.9 e a probabilidade desejada.

O coeficiente t de Student para todas as grandezas obtidas neste trabalho correspondeu à probabilidade de 95%.

4.4 Testes de Vazão

Em uma etapa anterior à aquisição das imagens e dos dados, testes de vazão foram realizados variando a pressão de trabalho entre 400 kPa até 800 kPa com incrementos de pressões de aproximadamente 50 kPa. O fluido utilizado para estes testes iniciais foi a água. O fluido ejetado do orifício foi coletado em uma proveta graduada para a medição do volume e o tempo correspondente foi medido com o auxílio de um cronômetro.

A rotação simulada foi de 2400 rpm e a carga escolhida foi de 20% determinando um período total de 50 milissegundos dos quais o injetor permanece 10 milissegundos com a injeção do spray e os restantes 40 milissegundos sem injeção. Um total de 5 ensaios foi obtido em cada pressão.

O tempo total de cada teste foi dividido pela duração total do ciclo (50 ms) para obter o número total de injeções realizada (número de ciclos). O conjunto dos cinco valores de volumes totais medidos em cada pressão foi dividido pelo número de ciclos correspondentes, os cinco valores encontrados corresponderam ao volume por ciclo de cada teste.

Em seguida dividiu-se cada volume por ciclo, pelo intervalo de tempo de injeção (10 ms). O resultado encontrado foi a vazão volumétrica correspondente ao intervalo de abertura do injetor. Nesta etapa cada pressão testada continha um conjunto de 5 valores de vazões volumétricas e então a média destes valores com uma respectiva faixa de repetitividade foi tomada e os resultados médios para cada pressão testada foram caracterizados pela Equação 4.10.

$$QM'(P) = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 QM_i \quad (4.10)$$

em que QM_i é o valor da vazão volumétrica do teste i .

O erro aleatório associado ao valor médio calculado da Equação 4.10 correspondeu à repetitividade da média dada pela Equação 4.2.

Os dados relacionando os volumes médios com a raiz quadrada das pressões foram utilizados para a obtenção de um ajuste linear. A vazão volumétrica QM na pressão de 700 kPa foi obtida do ajuste e a velocidade média no orifício foi determinada através da razão da vazão pela área do orifício conforme Equação 4.7.

4.5 Determinação da Assimetria dos Sprays

O spray produzido pelo injetor da Figura 4.4 é direcional, portanto, existe assimetria em determinados ângulos de observação. O posicionamento das câmeras para a obtenção das imagens pode não revelar a assimetria.

Uma escala angular, com formato de um transferidor, foi criada. A escala foi posicionada no flange superior da câmara de acrílico conforme a Figura 4.10.



Figura 4.10 - Escala para medição dos ângulos no flange superior da câmara de acrílico.

O injetor da Figura 4.4 foi adaptado ao flange de forma que a parte lateral onde existe o encaixe para a conexão elétrica que determina a abertura e o fechamento do injetor coincidissem com o ângulo 0 da escala e constituir assim um ponto de referência.

Uma marcação na janela lateral da câmara de acrílico escolhida para o posicionamento das câmeras constituiu em um ponto de referência pelo qual foi possível determinar o ângulo entre a posição da câmera e a referência do injetor pela leitura direta na escala sobre o flange.

Diferentes ângulos entre a posição da câmera e o ponto de referência do injetor foram determinados girando o flange sobre a câmara de acrílico. As filmagens foram realizadas com a câmera de alta velocidade para os diferentes ângulos testados e então a assimetria do spray foi determinada pela definição de dois ângulos mensurados nas imagens conforme a Figura 4.11. O software AutoCAD 2009 foi utilizado para as medições.

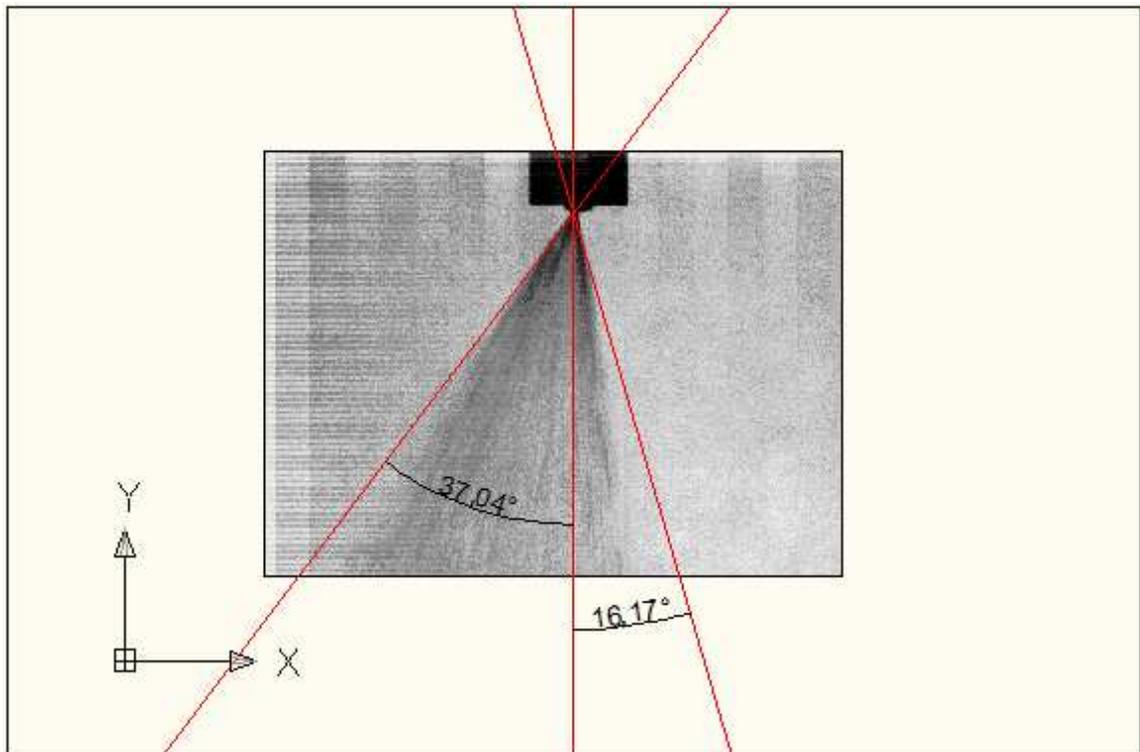


Figura 4.11 - Procedimento para medir a assimetria dos sprays.

A assimetria foi determinada através da diferença dos ângulos entre os segmentos de reta passando pelo orifício e tangenciando as bordas do spray com o segmento de reta vertical passando pelo orifício. As imagens com máxima diferença destes ângulos determinam a máxima assimetria do spray e a escala angular posicionada no flange superior determina o ângulo de posicionamento entre o ponto de referência do injetor com a câmera para o qual tal assimetria ocorre. Através do conhecimento da relação da assimetria com os ângulos lidos no flange escolheu-se um posicionamento para os testes próximo à assimetria máxima detectada.

4.6 Determinação da Densidade de Resolução

Anteriormente às obtenções das imagens da atomização, realizou-se uma calibração através da qual uma escala de dimensões conhecidas, foi filmada na posição do foco da câmera. A escala utilizada possui o aspecto da Figura 4.12.

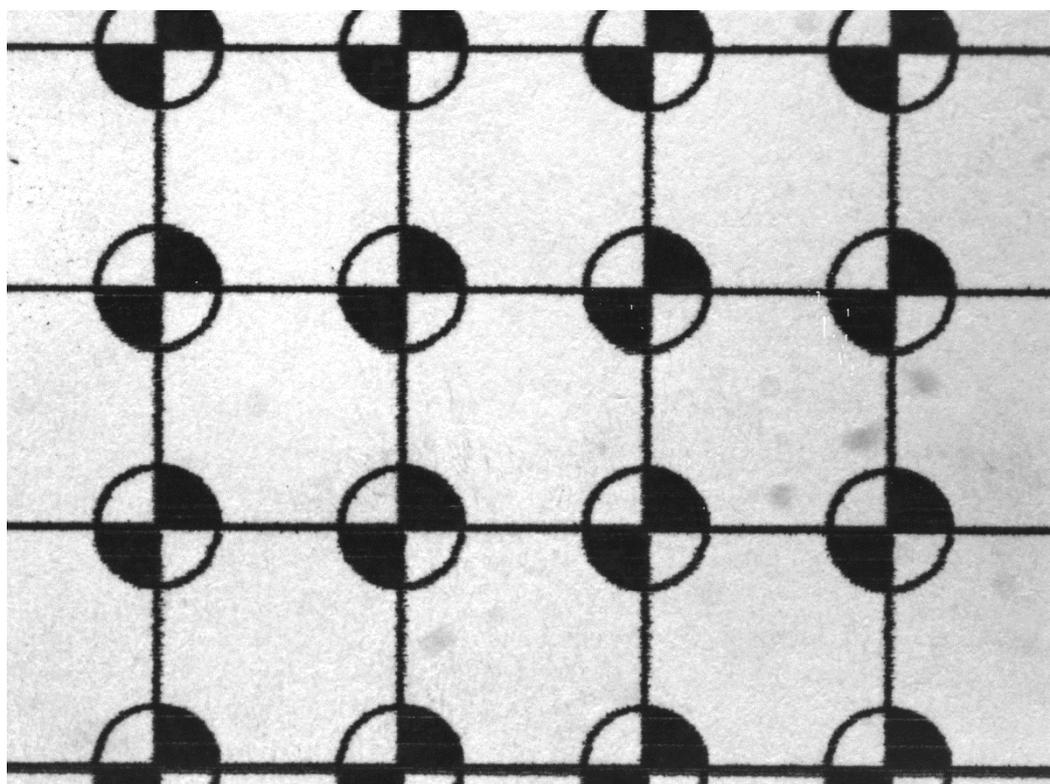


Figura 4.12 - Escala utilizada para determinação da densidade de resolução.

O ambiente MATLAB permite a medição de distâncias em imagens em números de pixels, a Figura 4.13 mostra o procedimento adotado para a Figura 4.12 para uma única medição.

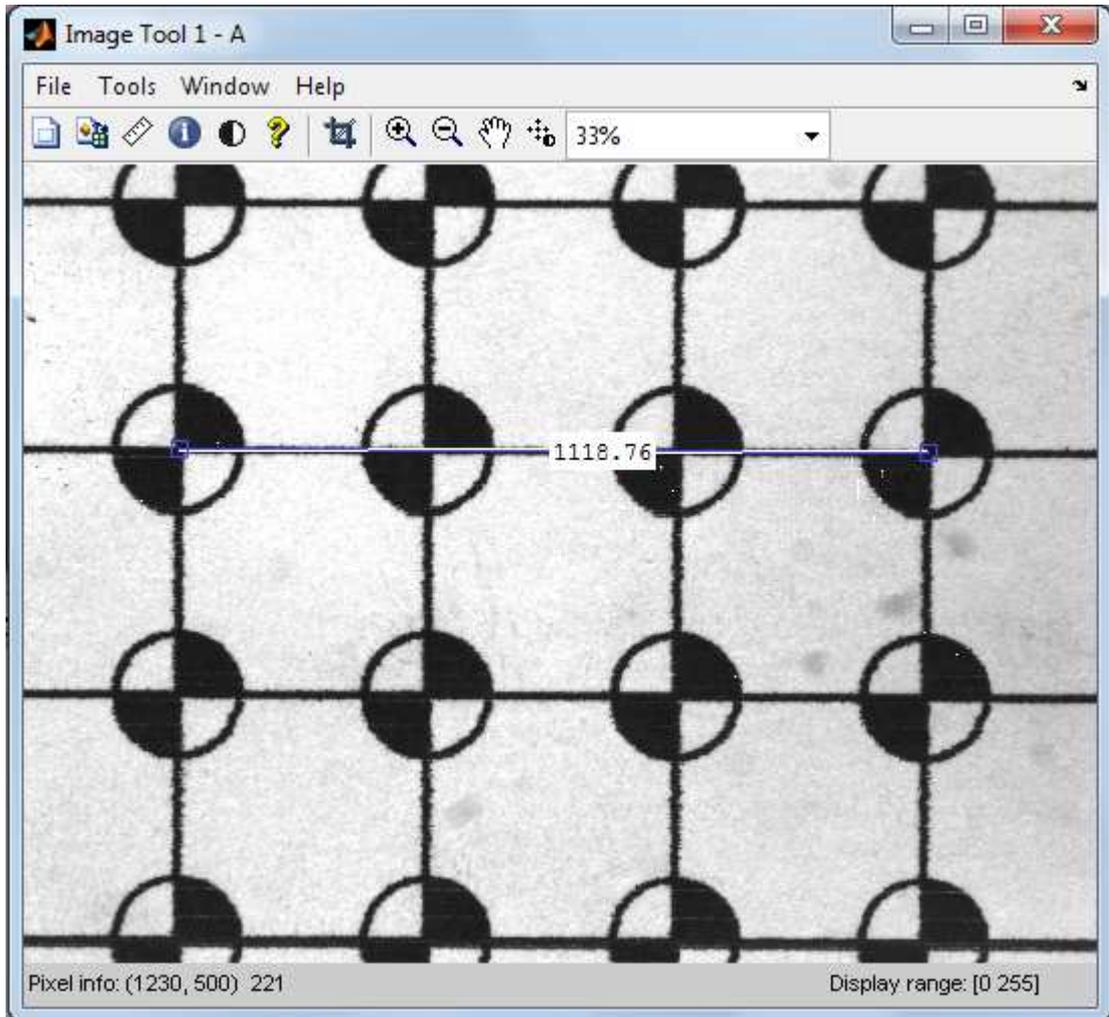


Figura 4.13 - Medição de distâncias em pixels em uma imagem com dimensões conhecidas.

Sabe-se que o centro de cada círculo da Figura 4.12 está afastado dos círculos adjacentes superior e inferior por uma distância igual a 1 cm. O segmento horizontal da Figura 4.13 liga, portanto, centros de círculos afastados por uma distância de 3 cm. O número exibido na Figura 4.13 representa o comprimento em pixels do segmento traçado. Para este caso, uma estimativa da densidade de resolução da imagem, é dada pela razão do comprimento em pixels (1118,76 pixels) pela distância em centímetros (3 cm) igual a 372,92 pixels/cm. A densidade de resolução foi tomada como a média de várias medições.

O próprio software do equipamento de laser DANTEC, Dynamic Studio, permite a medição da densidade de resolução para a identificação dos deslocamentos das partículas em unidades métricas. Esta informação é necessária para a obtenção dos campos de velocidades. O trabalho aqui desenvolvido consiste tanto na análise das imagens em si, quanto na análise dos campos de velocidades. A densidade de resolução obtida pelo procedimento mostrado na Figura 4.13 foi utilizada para a análise das imagens enquanto aquela obtida pelo software foi utilizada para a obtenção dos campos de velocidades.

4.7 Procedimento de Medição dos Ângulos das Bordas Externas

O passo inicial no objetivo de caracterizar os sprays quanto ao ângulo do cone consistiu no estabelecimento de uma forma de acessar conjuntos de pixels situados aproximadamente em arcos concêntricos ao orifício do injetor utilizado.

Uma posição correspondente a um pixel situado no orifício do injetor é escolhida como referência. Determina-se então a posição na matriz numérica correspondente medindo-se as distâncias em números de pixels deste ponto até as bordas superior e esquerda da imagem conforme demonstrado na Figura 4.14.

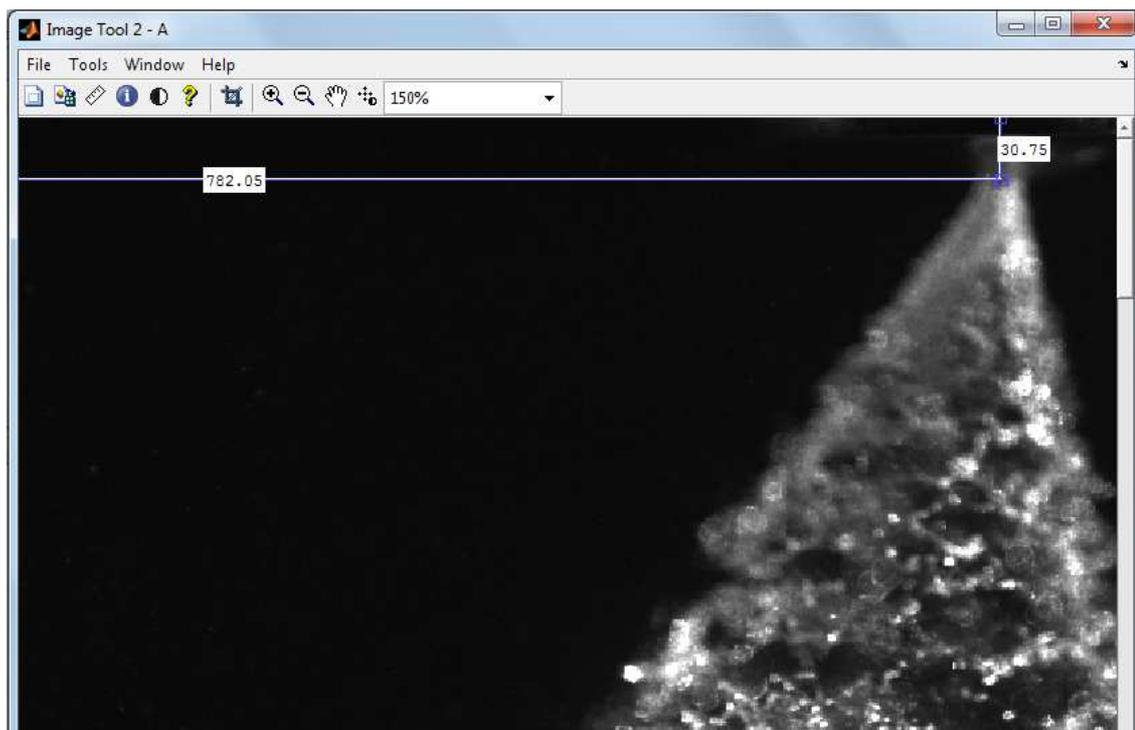


Figura 4.14 - Determinação da posição na matriz de pixels de um ponto referente ao orifício do injetor.

Para a imagem da Figura 4.14 escolhe-se como posição de referência do orifício na matriz o elemento situado na linha $i = 31$ e coluna $j = 782$.

Define-se em seguida um sistema de referência baseado no sistema de coordenadas polares onde cada ponto é representado por uma distância a uma referência e um ângulo em sentido anti-horário entre o eixo x e o segmento de reta ligando o ponto à referência conforme Figura 4.15.

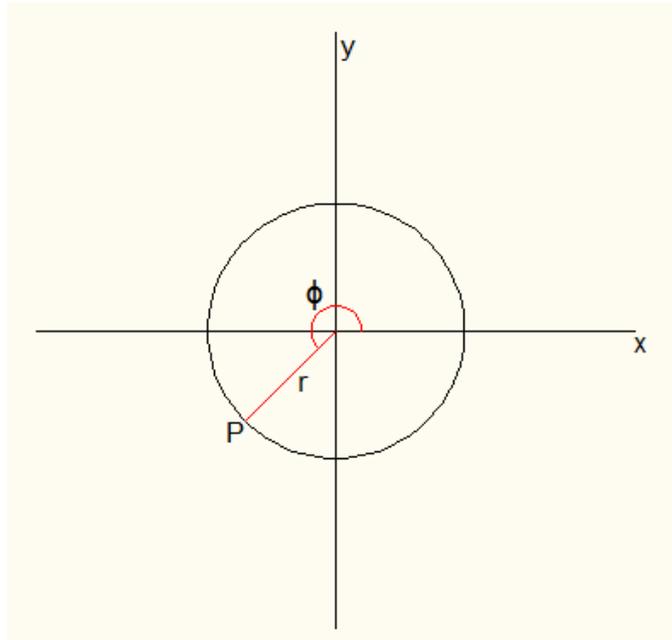


Figura 4.15 - Representação de um ponto em um sistema de coordenadas polar.

O ponto $P = (r, \varphi)$ da Figura 4.15 têm como coordenadas cartesianas a abscissa x e ordenada y dadas pelas relações das Equações 4.11 e 4.12.

$$x = r \cdot \cos \varphi \quad (4.11)$$

$$y = r \cdot \sin \varphi \quad (4.12)$$

A circunferência da Figura 4.15 é o conjunto de pontos para todos os ângulos entre 0 e 360° a uma distância r da referência. A origem deste sistema é colocada na posição da matriz escolhida para o orifício, obtida conforme procedimento demonstrado na Figura 4.14 de forma que arcos abaixo do eixo x ($180^\circ < \varphi < 360^\circ$) atravessem o spray. Assim, se (i, j) é a posição do orifício na matriz, então uma posição situada a uma distância r do orifício estará na posição representada por

$$(\text{round}[i - r \cdot DR \cdot \sin \varphi], \text{round}[j + r \cdot DR \cdot \cos \varphi]) \quad (4.13)$$

em que DR é a densidade de resolução em pixels/cm e $round$ é uma função que aproxima o argumento entre colchetes para o inteiro mais próximo. Tal função é também o comando do MATLAB para esta mesma finalidade, já que posições em matrizes são representadas por pares de números inteiros.

A Figura 4.14 mostra a predominância de tons escuros em regiões fora do domínio do spray, enquanto que na região interna do mesmo existe alternância entre cores claras e escuras. Esta diferença ocorre também nos valores da matriz numérica associada à imagem de modo que o arco com centro no orifício será constituído por um conjunto de valores que irá demonstrar essa diferença caso parte do arco esteja situada dentro do spray e outra parte situada fora.

O conjunto de valores que descrevem o arco é obtido escolhendo uma posição de referência na matriz, uma distância a partir do orifício e uma variação total de ângulo. A variação de ângulo deve ser escolhida de forma que o arco resultante varra toda a parte interior do spray e possua ainda partes situadas um pouco além das suas fronteiras. Definindo um critério que seja capaz de distinguir a diferença numérica dos valores da matriz correspondente aos pixels situados na parte externa do spray com aqueles na parte interior, é possível então determinar o ângulo da parte do arco situado dentro do spray e assim associar um valor de ângulo correspondente à distância escolhida. O procedimento pode ser repetido com várias distâncias e o comportamento analisado a partir de um gráfico que demonstre uma função do ângulo do arco interior ao spray com a posição do seu afastamento ao orifício.

Para estabelecer o critério que determine a parte do arco interna ao spray escolheu-se a seguinte função:

$$f(R, \varphi_{i-1}) = \frac{x(R, \varphi_i) - x(R, \varphi_{i-1})}{R \cdot \Delta\varphi} \quad (4.14)$$

em que R é a distância em pixels considerada igual ao produto da distância r em centímetros pela densidade de resolução, $x(R, \varphi_{i-1})$ é o valor numérico do pixel correspondente ao ângulo φ_{i-1} e distância em pixels R , $x(R, \varphi_i)$ o valor associado ao pixel correspondente ao ângulo φ_i para a mesma distância R afastado de φ_{i-1} por um incremento igual a $\Delta\varphi$. Estabelecendo um valor de corte para $f(R, \varphi_{i-1})$, é possível localizar as fronteiras externas do cone.

O denominador da Equação 4.14 representa aproximadamente o comprimento de um arco em pixels definido entre dois pixels adjacentes e o incremento de ângulo $\Delta\phi$ representa o ângulo descrito por este arco quando ϕ é dado em radianos.

A diferença numérica entre os valores de dois pixels adjacentes nos arcos considerados, representada pelo numerador da Equação 4.14, tende ser menor para posições mais próximas ao orifício (arcos menores) em função da maior proximidade entre os pixels adjacentes. No entanto, o arco descrito por estes pixels também tende a ter comprimento menor (denominador) possibilitando assim que o critério escolhido para a localização das fronteiras do spray seja o mesmo tanto para arcos próximos ao orifício quanto para arcos mais distantes.

No trabalho de SHAO et al (2006), o ângulo de cone para sprays de injetores diesel foi caracterizado para duas diferentes faixas de distâncias permitindo assim a avaliação do ângulo com a distância conforme proposta do trabalho aqui desenvolvido. No entanto o procedimento de medição consistiu em um método semelhante ao adotado na Figura 4.11.

O método aqui desenvolvido permite a escolha de qualquer faixa de distância limitada pelo orifício do injetor e o seu limite máximo inferior captado pelas imagens das filmagens. A quantidade de dados relacionando ângulos com distâncias é escolhida pelo usuário na execução do programa do Apêndice 2 através da solicitação de um incremento de distâncias. O processamento é automático sem necessidade de construir retas cortando as bordas dos sprays que se tornaria uma tarefa trabalhosa caso tal procedimento fosse adotado para várias posições.

A aquisição de imagens através do processo de injeção pela técnica PIV consistiu na obtenção de $n = 30$ pares de imagens. A primeira imagem de cada par foi utilizada para a obtenção dos ângulos dos sprays e o resultado fornecido pelo programa é a média dos ângulos de todas essas imagens para cada posição mais uma faixa de erro aleatório da média determinada pela Equação 4.2 com coeficiente t de Student correspondente a 95% de confiança com número de graus de liberdade igual a 29.

O incremento de ângulo $\Delta\phi$ entre dois pixels adjacentes em um mesmo arco foi definido como $0,25^\circ$ para as imagens obtidas por PIV, e $0,75^\circ$ para as imagens obtidas através da filmagem a alta velocidade.

4.8 Procedimento de Medição dos Ângulos Internos

Os sprays cônicos produzidos pelo injetor da Figura 4.4 são caracterizados por possuírem maior quantidade de fluido na periferia do cone com a parte interior aproximadamente oca. Deste modo tentou-se também mensurar um ângulo interno referente a uma fronteira que divide a região periférica com maior vazão mássica e uma região interior de menor vazão.

Através de um ângulo inicial de 260° , correspondendo aproximadamente ao meio dos cones produzidos, a rotina do Apêndice 3, executada no ambiente MATLAB estabelece uma fronteira interna através da Equação 4.14. Os mesmos arcos utilizados para a obtenção da fronteira externa do cone são utilizados para a determinação da fronteira interna. O programa inicia verificando os valores da função definida a partir do ângulo inicial na direção crescente dos ângulos e armazena o primeiro ângulo cujo valor absoluto da função ultrapassa o valor absoluto de corte determinando-se assim o ângulo interno da direita. O mesmo procedimento é realizado na direção decrescente dos ângulos para encontrar o ângulo interno da esquerda. Os resultados são então ilustrados em um gráfico mostrando os ângulos internos, esquerdo e direito em função da posição.

4.9 Construção das Bordas em Coordenadas Cartesianas

As coordenadas polares das bordas externas e internas dos sprays foram transformadas em coordenadas cartesianas onde os eixos x e y representam respectivamente as distâncias vertical e horizontal das bordas ao orifício em centímetros.

A origem do sistema cartesiano desta forma coincidiu com o orifício do eletroinjetor, mas ao invés de fazer coincidir o eixo vertical passando pelo orifício com o eixo y , como no sistema polar, onde o spray ocupa o terceiro e quarto quadrantes, fez-se o eixo vertical passando pelo orifício coincidir com o eixo x de modo que a posição do spray no sistema cartesiano correspondesse ao primeiro e ao quarto quadrantes.

As coordenadas x e y de cada borda ficaram definidas pelas expressões das Equações 4.15 a 4.22

$$x_{de} = r \cdot \cos \left(\alpha_e - \frac{3\pi}{2} \right) \quad (4.15)$$

$$y_{de} = r \cdot \text{sen} \left(\alpha_e - \frac{3\pi}{2} \right) \quad (4.16)$$

$$x_{di} = r \cdot \cos \left(\alpha_i - \frac{3\pi}{2} \right) \quad (4.17)$$

$$y_{di} = r \cdot \text{sen} \left(\alpha_i - \frac{3\pi}{2} \right) \quad (4.18)$$

$$x_{ee} = r \cdot \cos \left(\frac{3\pi}{2} - \beta_e \right) \quad (4.19)$$

$$y_{ee} = -r \cdot \text{sen} \left(\frac{3\pi}{2} - \beta_e \right) \quad (4.20)$$

$$x_{ei} = r \cdot \cos \left(\frac{3\pi}{2} - \beta_i \right) \quad (4.21)$$

$$y_{ei} = -r \cdot \text{sen} \left(\frac{3\pi}{2} - \beta_i \right) \quad (4.22)$$

em que os subscritos *de*, *di*, *ee* e *ei* denotam respectivamente direita externo, direita interno, esquerda externo e esquerda interno, α_e e α_i são os ângulos das bordas direitas externa e interna respectivamente, β_e e β_i são os ângulos das bordas esquerdas externa e interna e r é a distância da borda ao orifício.

Os dados x e y com mesmo índice são então utilizados para traçar as bordas internas e externas em um gráfico para cada fluido testado.

4.10 Procedimento de Medição dos Ângulos por Ajuste Linear

Os trabalhos de ZHANG et al (2011) e LU PEI et al (2009) utilizam um tratamento de imagens para em seguida ajustar segmentos de retas às bordas do spray para caracterizá-los quanto ao ângulo, a partir do cálculo da inclinação destas retas.

Baseado nestas ideias, procurou-se neste trabalho, estabelecer um procedimento de medição dos ângulos dos sprays a partir dos gráficos, obtidos em coordenadas cartesianas, através do ajuste de uma equação do tipo $y = ax$ aos dados referentes às bordas.

Para as bordas externas, denotando y_d como a função obtida do ajuste aos dados da borda direita e y_e a função obtida para a borda esquerda, o ângulo φ_{ex} dos sprays referente às bordas externas, é obtido através da Equação 4.23.

$$\varphi_{ex} = \tan^{-1} \left| \frac{dy_d}{dx} \right| + \tan^{-1} \left| \frac{dy_e}{dx} \right| \quad (4.23)$$

Onde cada derivada é igualada ao coeficiente da variável x. O conjunto das duas bordas externas para os três fluidos determinaram ajustes lineares com inclinações de sinais diferentes com a borda direita determinando uma inclinação positiva e a borda esquerda uma inclinação negativa. Para estes casos a Equação 4.23 se mostra apropriada para o cálculo dos ângulos entre as retas. Cada parcela da soma da Equação 4.23 representa o ângulo com relação à horizontal das retas ajustadas às bordas consideradas. A soma destes ângulos, portanto, representa o ângulo entre as duas retas ajustadas às bordas externas.

Para os ângulos das duas bordas internas φ_{in} , nos casos em que as inclinações obtidas tiveram sinais iguais a Equação 4.24 foi usada no cálculo do ângulo interno.

$$\varphi_{in} = \tan^{-1} \left| \frac{dy}{dx} \right|_{maior} - \tan^{-1} \left| \frac{dy}{dx} \right|_{menor} \quad (4.24)$$

Em que foi subtraído o arco-tangente da inclinação de valor absoluto maior com aquele de valor absoluto menor.

Para os ângulos internos, nos casos em que as duas bordas possuíram ajustes com os sinais das inclinações diferentes (um positivo e outro negativo) a equação utilizada para o cálculo do ângulo entre elas é análoga à Equação 4.23.

4.11 Avaliação do Comprimento de Quebra do Jato

O comprimento de quebra (breakup) conforme o item 3.3.6 diz respeito à distância a partir do orifício do eletroinjeter onde o jato líquido do spray se desintegra em pequenas gotículas. Baseado neste conhecimento, procurou-se avaliar o comprimento de quebra a partir da observação do comportamento dos valores dos pixels na imagem.

Nas aquisições obtidas por Velocimetria por Imagens de Partículas, as partes mais claras correspondem às regiões com maior presença de líquido enquanto as partes mais

escuras às regiões com menos líquido. Dessa forma foi suposto que a quebra seria caracterizada por regiões nas imagens com alternância acentuada das cores claras e escuras.

Baseado nesta suposição a metodologia empregada na tentativa de avaliação do comprimento de quebra consistiu em uma “coleta” de valores de pixels situados em arcos de circunferência em várias distâncias. Estes arcos devem estar limitados pelas fronteiras externas do spray e, portanto, toda a metodologia empregada para a detecção das bordas externas conforme item 4.6 para a medição dos ângulos fez-se necessária também para a avaliação do comprimento de quebra.

A partir da detecção das bordas externas pelo critério estabelecido pela Equação 4.14 em uma determinada posição, foi considerado um conjunto de 35 pixels igualmente espaçados perfazendo um arco de circunferência delimitado pelas fronteiras do spray conforme Figura 4.16.

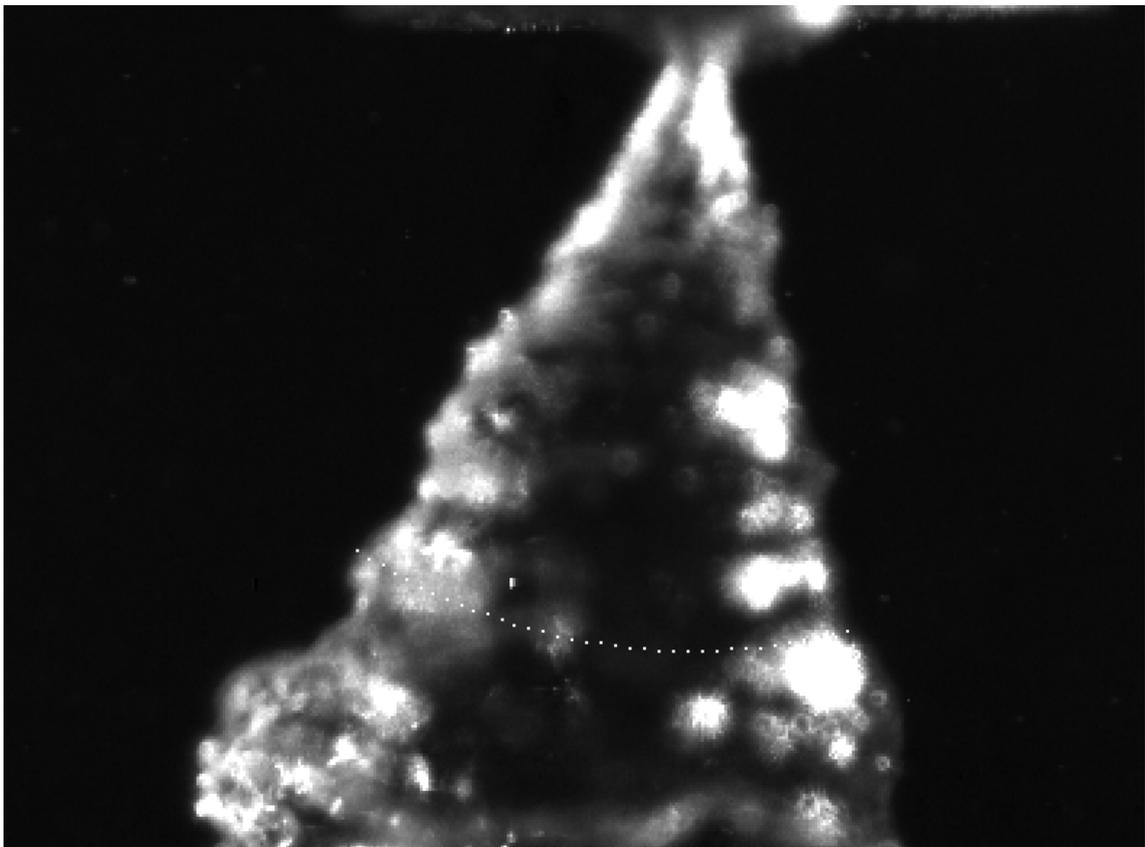


Figura 4.16 - Posições do conjunto de 35 pixels igualmente espaçados utilizados no cálculo do desvio padrão relativos aos seus valores numéricos.

A imagem da Figura 4.16 foi obtida do processo de injeção utilizando água com duty de 50% simulando rotação de 2400 rpm correspondendo a períodos alternados de 25 milissegundos de abertura e fechamento do eletroinjeter. A figura possui um conjunto de 35 pixels situados dentro das fronteiras do spray que foram detectadas através do critério estabelecido pela Equação 4.14 na posição de 0,6 cm de distância a partir do orifício.

A Figura 4.16 foi obtida do código computacional que avalia apenas uma imagem do Apêndice 1. A obtenção do comprimento de quebra com a respectiva faixa de repetitividade na realidade se deu com a comparação da média dos desvios-padrões de 30 imagens obtidas por PIV em várias posições. São esperadas dispersões maiores nos valores dos pixels em regiões onde a massa líquida encontra-se desintegrada devido a maior alternância de cores claras e escuras.

Um segundo tratamento também foi realizado. Em cada uma das 30 imagens consideradas detectou-se a posição onde ocorreu o desvio padrão máximo do arco constituído dos 35 pixels. O comprimento de quebra para cada fluido foi então caracterizado como a média das 30 posições detectadas com uma faixa de erro aleatório.

4.12 Tratamento das Imagens Obtidas a Alta Velocidade de Filmagem

Para a efetiva detecção da borda do spray é necessário que a imagem apresente bom contraste entre as regiões com e sem a presença do fluido injetado. Assim as imagens obtidas com a câmera de alta velocidade foram submetidas a um prévio tratamento para eliminar ruídos e melhorar o contraste. As filmagens foram realizadas com uma taxa de 4000 frames por segundo para o etanol e a gasolina e 4800 frames por segundo para a água, de modo que para as condições configuradas no sistema de injeção correspondentes a períodos alternados de 25ms de abertura e fechamento do injetor, são obtidos conjuntos alternados de 100 imagens com presença e ausência de sprays na filmagem a 4000 Hz e 120 para a filmagem a 4800 Hz.

As filmagens foram também realizadas de forma a capturar o primeiro período de injeção, assim o início da filmagem precedeu o início da injeção. Tal procedimento se fez necessário para evitar a obtenção de imagens com grande quantidade de névoa dentro da câmara de acrílico. A medida que uma quantidade maior de fluido é injetado dentro da câmara aumenta-se a quantidade de névoa.

Foram então utilizadas 10 imagens com sprays para o tratamento. Estas imagens foram escolhidas como correspondendo aproximadamente ao meio do período de injeção pela escolha da imagem de número 50 de cada conjunto de 100 imagens com spray e de número 60 para os conjuntos de 120. Os dez primeiros conjuntos de 100 imagens com sprays foram utilizados para a escolha em cada conjunto da imagem de número 50 o mesmo ocorrendo para os conjuntos de 120 na escolha da imagem de número 60.

A imagem imediatamente anterior à primeira injeção foi escolhida para fazer a subtração das dez imagens com spray. A subtração consiste em uma simples subtração matricial dos valores dos pixels das imagens. Como exemplo, a Figura 4.17 mostra uma foto com spray, a Figura 4.18 uma imagem sem spray e a Figura 4.19 o resultado da subtração entre a Figura 4.17 e a Figura 4.18.

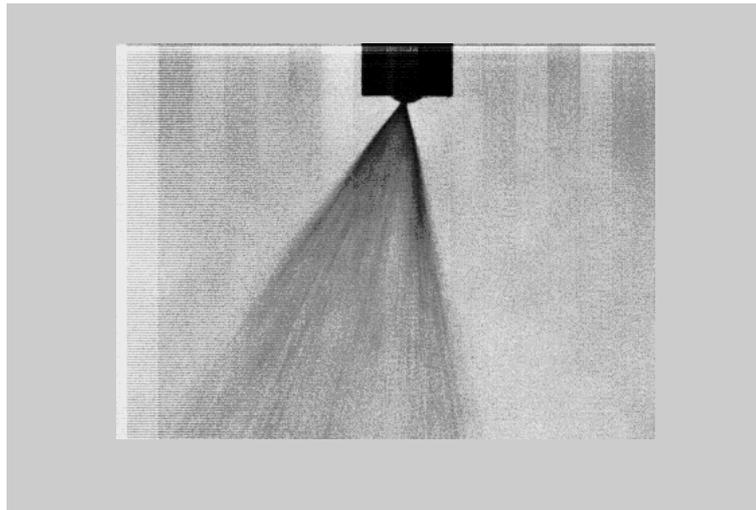


Figura 4.17 - Imagem com spray da injeção de etanol.

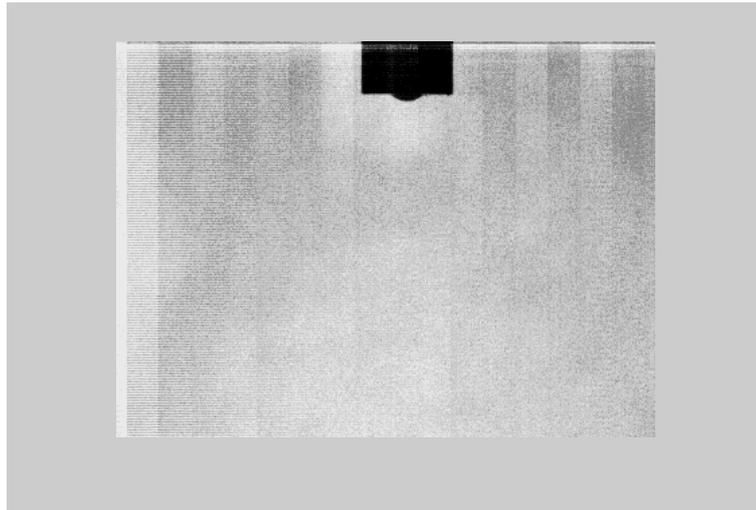


Figura 4.18 - Imagem sem spray da injeção de etanol.

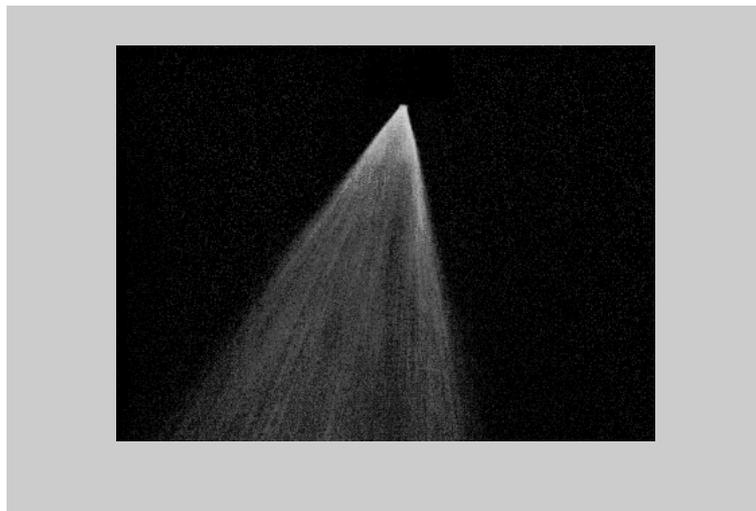


Figura 4.19 - Subtração das imagens das figuras 4.17e 4.18.

As regiões fora das bordas do spray da imagem subtraída seriam completamente escuras caso houvesse uma subtração perfeita entre as imagens. No entanto, verifica-se que a região escura é recheada de vários pontos claros. Tais pontos ocorrem porque o valor de alguns pixels nesta região na imagem sem spray não são iguais ao valor correspondente na imagem com spray de modo que a subtração tem como resultado um valor não nulo. Este efeito é devido a ruídos nas imagens subtraídas.

Um procedimento para diminuir o efeito de ruídos nas imagens subtraídas e, além disso, melhorar o contraste da imagem foi então adotado.

Considerou-se as dez primeiras imagens sem sprays numeradas de 1 a 10 em que a imagem 1 é aquela imediatamente anterior ao início da primeira injeção, a imagem dois é aquela imediatamente anterior a imagem 1 e assim por diante. Em seguida foram realizadas as seguintes subtrações:

$$X_{1j} = X_j - X_1 \quad j = 2, \dots, 10 \quad (4.25)$$

Em que X_1 denota a matriz da imagem 1 e X_j a matriz da j -ésima imagem. Com esta operação foram obtidas 9 imagens subtraídas cujas matrizes são X_{12} , X_{13} , X_{14} , X_{15} , X_{16} , X_{17} , X_{18} , X_{19} e X_{110} resultados da subtração de cada imagem j pela imagem 1.

Se não existissem ruídos na imagem 1 e nas imagens j , cada matriz X_{1j} teria todos os seus elementos iguais a zero resultando em uma imagem completamente escura. O efeito dos ruídos é provocar a existência de valores não nulos em X_{1j} resultando em diversos pontos claros. Para a matriz X_{12} dos dados obtidos para a injeção de gasolina a Figura 4.20 representa a inspeção dos valores dos pixels na janela retangular destacada onde são observados diversos pixels com valores maiores que 0.

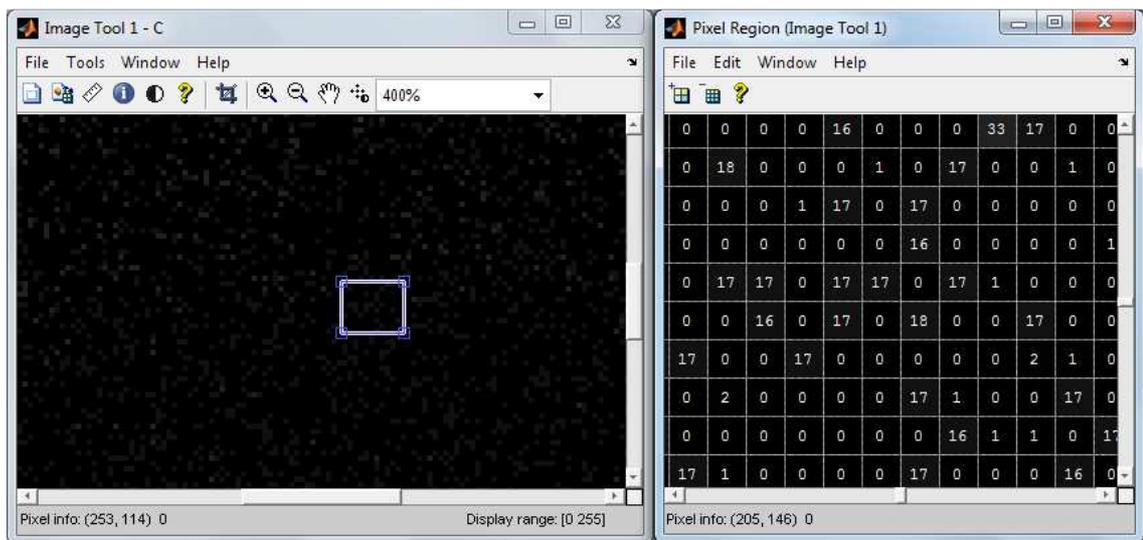


Figura 4.20 - Inspeção dos valores dos pixels em uma janela retangular de uma imagem resultado da subtração de duas imagens sem spray.

O valor máximo de cada coluna da matriz X_{Ij} pode ser determinado através de um simples comando na janela de comandos do MATLAB, o resultado é um vetor linha V_{Ij} contendo todos os valores máximos de cada coluna. Como as imagens obtidas a 4000 e 4800 quadros por segundo possuíam resolução de 400 por 296 pixels, o vetor linha assim obtido consistiu em uma disposição de 400 valores numéricos.

O valor médio e o desvio-padrão dos 400 valores de cada V_{Ij} foram então determinados obtendo-se um conjunto com 9 valores médios e 9 valores de desvio padrão correspondente aos vetores V_{I2} , V_{I3} , V_{I4} , V_{I5} , V_{I6} , V_{I7} , V_{I8} , V_{I9} e V_{I10} . A média x_m das médias e a média u_m dos desvios-padrões foram tomadas e um valor y foi determinado a partir da seguinte expressão

$$y = x_m + \frac{t \cdot u_m}{\sqrt{n}} \quad (4.26)$$

em que $n = 400$ e t é o coeficiente t de Student com 399 graus de liberdade para uma probabilidade de 95%. Existe então uma alta probabilidade da média dos valores dos pixels não nulos em uma imagem obtida pela subtração da imagem 1 a uma imagem sem spray estar situada abaixo do valor y .

A imagem 1 foi então subtraída das dez imagens selecionadas com sprays. O histograma de pixels foi então ajustado para que o valor 0 (preto) correspondesse ao inteiro mais próximo de y e o valor 255 (branco) ao valor máximo de cada matriz X_{Ij} .

O histograma de uma imagem é simplesmente um conjunto de números indicando o percentual de pixels naquela imagem, que apresenta determinado nível de cinza ou cor. Esses valores são normalmente representados por um gráfico de barras que fornece, para cada nível de cinza, o número (ou o percentual) de pixels correspondentes na imagem, AURA (2008).

Pretendeu-se, dessa forma, além de minimizar o efeito de ruídos, melhorar o contraste das imagens padronizando o procedimento de tratamento na aquisição das imagens para os três fluidos. A Figura 4.21 mostra o resultado da subtração X_{I5} para as imagens obtidas da injeção de gasolina. As subtrações envolvendo água e etanol produziram resultados semelhantes ao ilustrado na Figura 4.21.



Figura 4.21- Subtração de uma imagem com spray de gasolina com outra sem spray.

A Figura 4.22 mostra o resultado da subtração, incluindo o ajuste do histograma de pixels.



Figura 4.22 - Resultado do ajuste do histograma da imagem da figura 4.21.

As imagens tratadas desta forma passaram pelo mesmo procedimento de detecção de borda para medição dos ângulos externos com a mesma metodologia empregada nas imagens obtidas por PIV.

4.13 Medições das Penetrações

As filmagens com alta velocidade de quadros foram utilizadas para a avaliação da penetração do spray cônico. As imagens assim obtidas permitiram a observação de alguns estágios de desenvolvimento dos sprays no início da injeção. Mediu-se inicialmente a distância máxima em pixels percorrida pelo spray e em seguida foi utilizada a densidade de resolução para a obtenção da distância percorrida em centímetros. A Figura 4.23 e a Figura 4.24 mostram o resultado do procedimento da medição da penetração em pixels em um estágio do desenvolvimento do spray de etanol através de dois métodos. No primeiro a penetração foi caracterizada através da distância ao orifício do ponto de deslocamento máximo do spray. No segundo a penetração foi caracterizada através do deslocamento máximo vertical. O conhecimento da densidade de resolução permite a obtenção destas distâncias em centímetros.

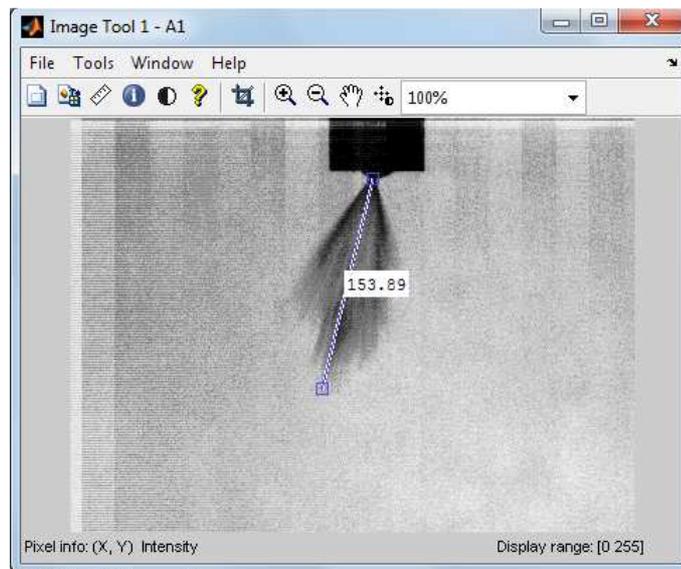


Figura 4.23 - Penetração máxima do spray em determinado estágio de desenvolvimento.

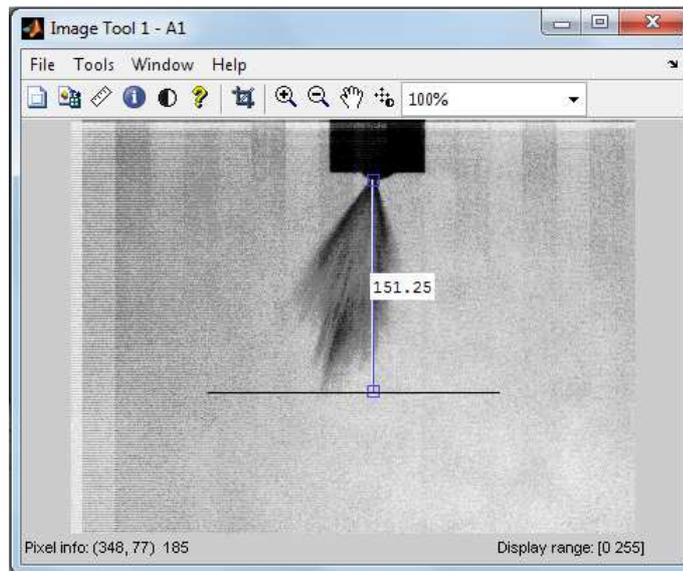


Figura 4.24 - Penetração vertical do spray .

Um fator complicador na avaliação de penetração dos sprays refere-se às variabilidades na sua geometria. A única forma de contabilizar tal efeito é a aquisição de um conjunto de dados para a obtenção de uma amostra estatística válida, ZHAO et al (2002).

Foram então escolhidos 3 conjuntos de 5 imagens para cada fluido. Cada uma das 5 imagens de cada conjunto representou um estágio diferente do desenvolvimento do spray de forma que para um mesmo estágio, 3 imagens são consideradas. O resultado foi então caracterizado pela média das medições em cada estágio.

SHAO et al. (2006) utilizaram um procedimento para medição da velocidade média de penetração em sprays de injetores diesel, que consistiu na avaliação de duas imagens consecutivas. A velocidade foi então determinada pela razão da diferença entre as duas penetrações pelo tempo decorrido entre as duas imagens. Metodologia semelhante foi aqui empregada.

Gráficos relacionando a penetração com o tempo foram construídos e a velocidade de penetração média avaliada pela derivada primeira da equação ajustada a estes dados.

4.14 Sistema de Referência para os Campos de Velocidades

Os campos de velocidades escolhidos para a obtenção dos resultados deste trabalho correspondeu ao processamento de correlação adaptativa utilizando uma área de interrogação igual a 32 por 32 pixels através do software Dynamic Studio que acompanha o equipamento de Laser. Foram obtidos primeiramente campos de vetores para todo o domínio das imagens e em seguida mascarou-se as partes externas dos campos vetoriais obtidos (partes externas dos sprays). O último passo consistiu em fazer a estatística para os 30 campos mascarados (correspondente aos 30 pares de imagens) para a aquisição dos campos horizontais, verticais e resultantes representativos.

Os valores que constituíram os campos de velocidades formaram matrizes de 74 linhas por 99 colunas exportadas para o ambiente MATLAB.

Perfis em formatos de arcos de circunferências centrados no orifício e perfis lineares de velocidades em uma direção vertical passando pelo orifício foram analisados nas matrizes representativas dos campos. O sistema de referência adotado com relação ao sinal e as denominações das velocidades está representado na Figura 4.25, que corresponde à primeira imagem do décimo par obtido da injeção de gasolina pela técnica PIV.

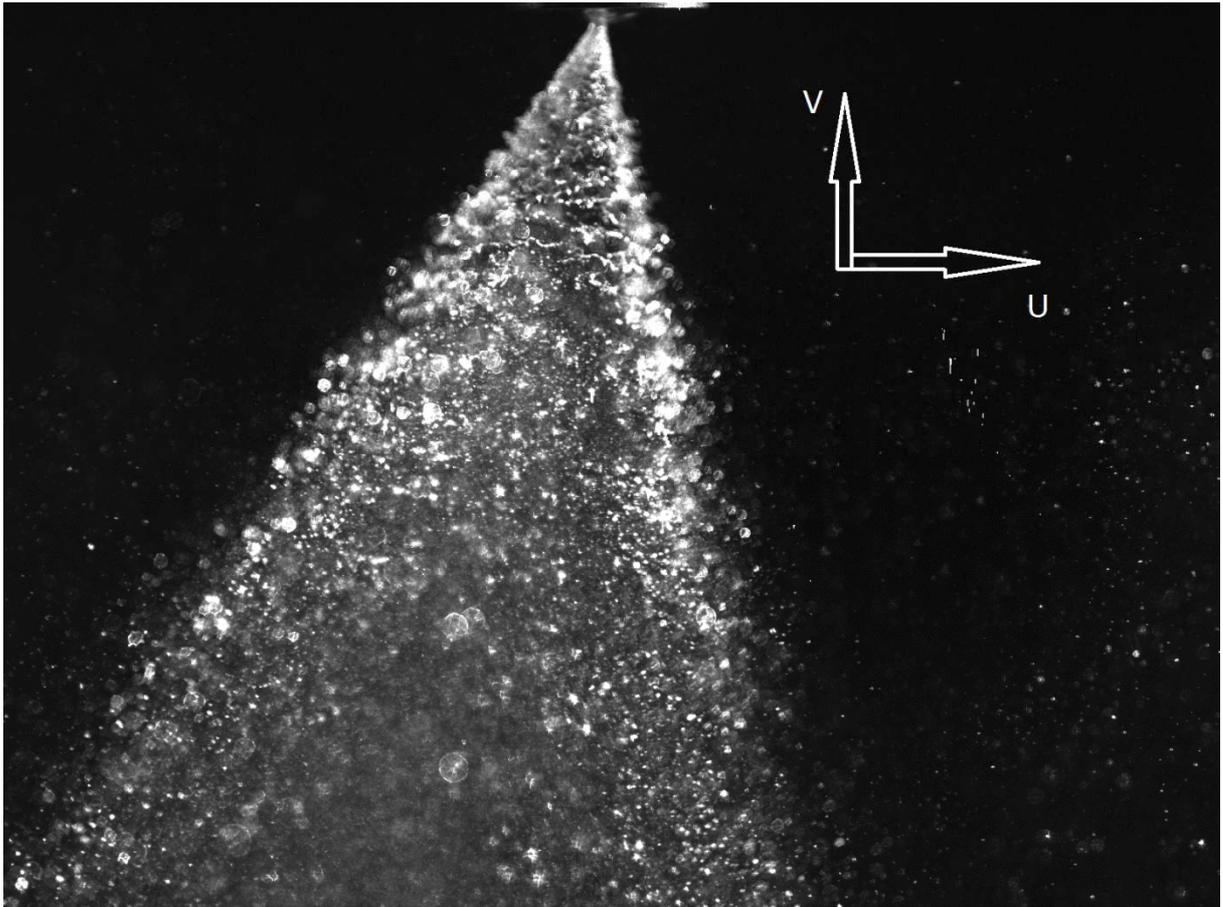


Figura 4.25 - Denominações e orientações das velocidades dos campos obtidos pelo processamento PIV.

As velocidades na direção vertical foram denominadas V e as velocidades na direção horizontal, denominadas U . Os sentidos positivos são aqueles indicados pelas orientações das setas na Figura 4.25.

Além dos perfis em arcos, os campos escalares das velocidades U e V também constituíram em ferramentas de estudo do trabalho bem como o campo vetorial da resultante destas componentes cujas magnitudes foram observadas através das escalas de cores.

Perfis verticais a partir do orifício até uma distância de 3,0 cm também foram traçados. O programa do Apêndice 5 tem como saídas o perfil linear da velocidade resultante ou os perfis em arcos centrados no orifício das velocidades U , V e resultante. O usuário é solicitado a decidir qual o tipo de perfil desejado (arco ou linear), se a decisão for pelo linear há a solicitação de um ângulo com relação à vertical passando pelo orifício do injetor e se a decisão for pela obtenção dos perfis em arcos, é solicitada uma distância a partir do orifício.

Também foi traçada uma visualização gráfica com a noção de repetitividade das velocidades médias baseadas na Equação 4.2 em todo o domínio dos sprays para as velocidades U e V.

4.15 Diâmetro das Gotículas

O software Dynamic Studio utilizado para processar os dados referentes às obtenções dos campos de velocidades foi também utilizado para dar estimativas correspondentes aos diâmetros das gotículas envolvidas no processo de atomização para os três fluidos testados. Para isso selecionou-se previamente uma área de interesse situada aproximadamente a 0,70 cm de distância do orifício nas imagens conforme a Figura 4.26 que demonstra o procedimento para a água.

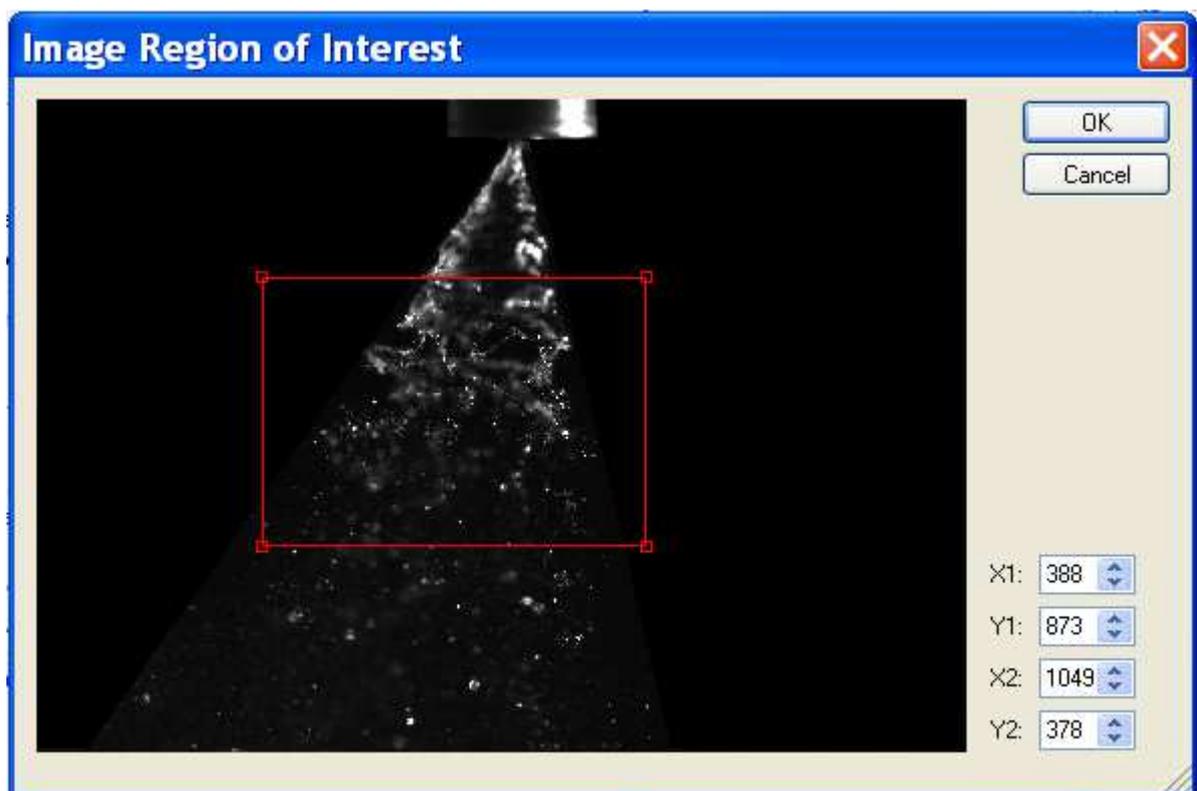


Figura 4.26 - Seleção da área de interesse na avaliação dos diâmetros das gotículas.

A estatística é então realizada para 30 imagens correspondentes ao primeiro par de cada 30 pares de imagens obtidas pela técnica PIV.

Para a água também foi realizada uma avaliação do efeito da posição ao orifício considerada. Duas áreas de interesse foram construídas, uma em uma posição mais próxima ao orifício e outra em uma área mais afastada, os histogramas e os diâmetros médios foram então comparados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Testes de Vazão

A Tabela 5.1 mostra a vazão volumétrica média em cada período de abertura do injetor correspondente a 10 milissegundos, obtidas de cada conjunto de 5 ensaios nas pressões testadas e as respectivas faixas de repetitividade da média com os ensaios realizados com água.

Tabela 5.1 - Vazão média em cada pressão testada.

Pressão (kPa)	Vazão Média \pm Re (mL/s)
400	2,69 \pm 0,03
450	2,99 \pm 0,03
500	2,78 \pm 0,03
550	3,04 \pm 0,01
600	3,10 \pm 0,17
650	3,29 \pm 0,05
710	3,49 \pm 0,03
750	2,74 \pm 0,04
800	2,83 \pm 0,06

Os dados da Tabela 5.1 foram utilizados para traçar o gráfico da Figura 5.1 onde as abscissas correspondem às raízes das pressões e as ordenadas, aos valores da vazão volumétrica média a cada injeção.

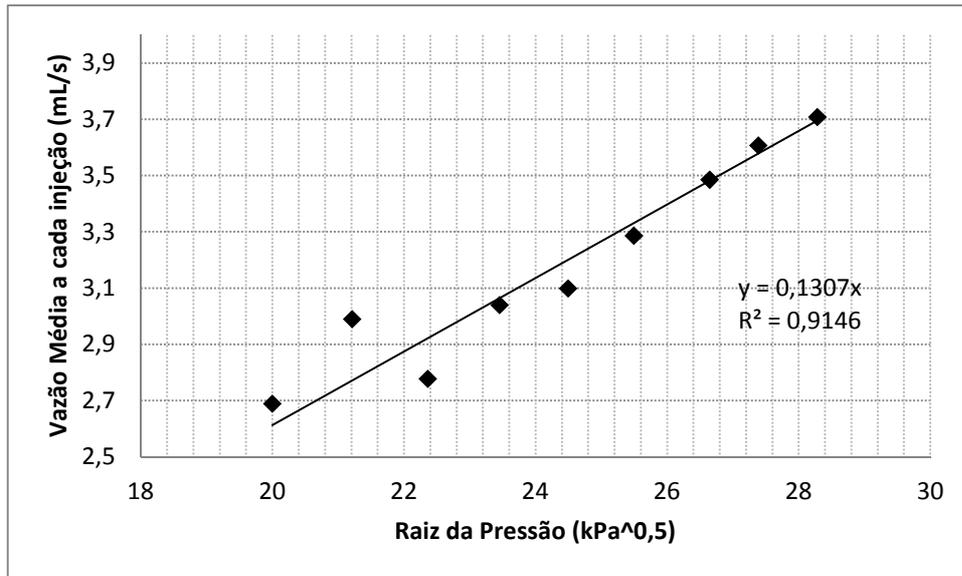


Figura 5.1 - Raiz da pressão em função da vazão média a cada injeção.

Utilizando a equação ajustada para calcular a vazão média QM na pressão de 700 kPa e utilizando a razão da vazão calculada com a área do orifício para caracterizar a velocidade V_0 de saída do fluido (água) do orifício tem-se:

$$V_0 = 14,19 \frac{m}{s}. \quad (5.1)$$

O desvio padrão das medições do diâmetro do orifício do injetor foi de 0,0061 mm enquanto o desvio padrão máximo de cada conjunto de 5 ensaios das vazões em cada pressão foi de 0,14 mL/s. Estes valores foram utilizados para o cálculo da incerteza combinada utilizando a Equação 4.8, obtendo:

$$u_c(V) = 0,426 m/s \quad (5.2)$$

O número de graus de liberdade efetivos para o valor da velocidade calculado pela equação de Welch-Satterthwaite foi:

$$v_{ef} = 1,90 \quad (5.3)$$

O valor da velocidade no orifício para a pressão de 700 kPa com a respectiva faixa de erro tomando o coeficiente t de Student com 95% de probabilidade e 2 graus de liberdade ficou então determinado por:

$$V_o = (14 \pm 2) \frac{m}{s}. \quad (5.4)$$

Se a velocidade em toda a área do orifício fosse uniforme, e assim um único valor pudesse caracterizá-la, a Equação 5.4 apresentaria como resultado este valor característico. A pressão de 700 kPa foi utilizada em todos os testes de injeções e portanto torna-se útil o cálculo da velocidade nesta pressão para fins comparativos.

O método para obtenção da velocidade de saída do fluido do orifício do eletroinjetor tem como principal vantagem, a grande simplicidade na realização dos ensaios.

5.2 Determinação da Assimetria

Os dados referentes à medição da assimetria com o ângulo de posicionamento da referência do injetor com a câmera estão no gráfico da Figura 5.2, onde o eixo vertical representa a diferença entre os dois ângulos da Figura 4.11 em graus e o eixo horizontal os valores lidos na escala sobre o flange superior em radianos.

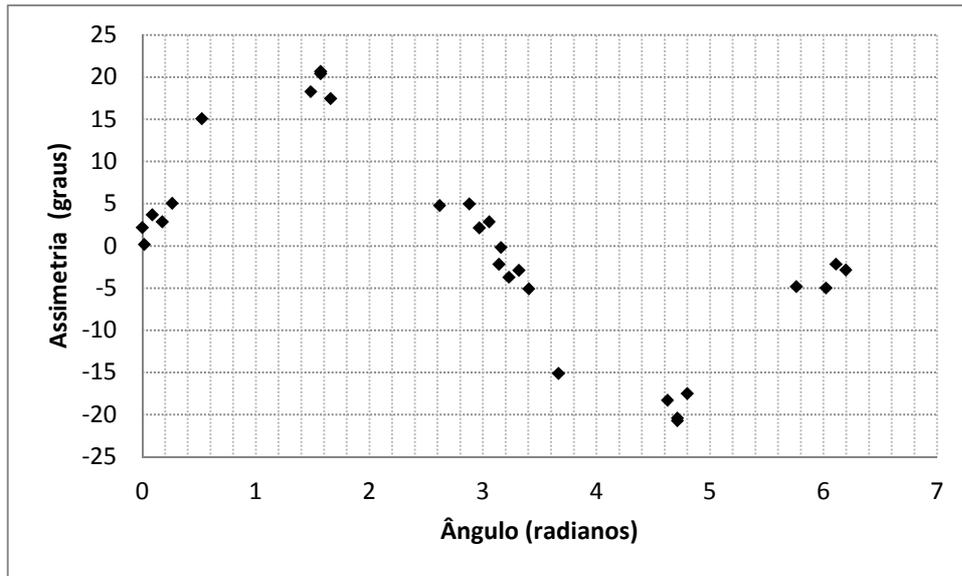


Figura 5.2 - Resultados dos testes de assimetria.

A medição da assimetria através da análise da imagem obtida em uma determinada posição do flange superior gera na realidade, dois pares de dados. Se a assimetria no ângulo 90° do flange, for um valor positivo (α maior que β) a assimetria do ângulo 270° correspondente ao posicionamento da câmera no lado posterior, será negativo e com mesmo valor absoluto da assimetria da posição 90° .

Os dados da Figura 5.2 sugerem um ajuste do tipo:

$$\alpha - \beta = A \cdot \text{sen}(\theta - a) \quad (5.5)$$

O valor de interesse da Equação 5.5 é o parâmetro a . A curva de uma função seno multiplicada por uma constante A determina no domínio $0 < \theta < 360^\circ$ valores absolutos máximos nos ângulos 90° e 270° . O parâmetro a indicará o quão afastado destes ângulos estará os valores absolutos máximos da expressão da Equação 5.5. A curva ajustada encontra-se na Figura 5.3.

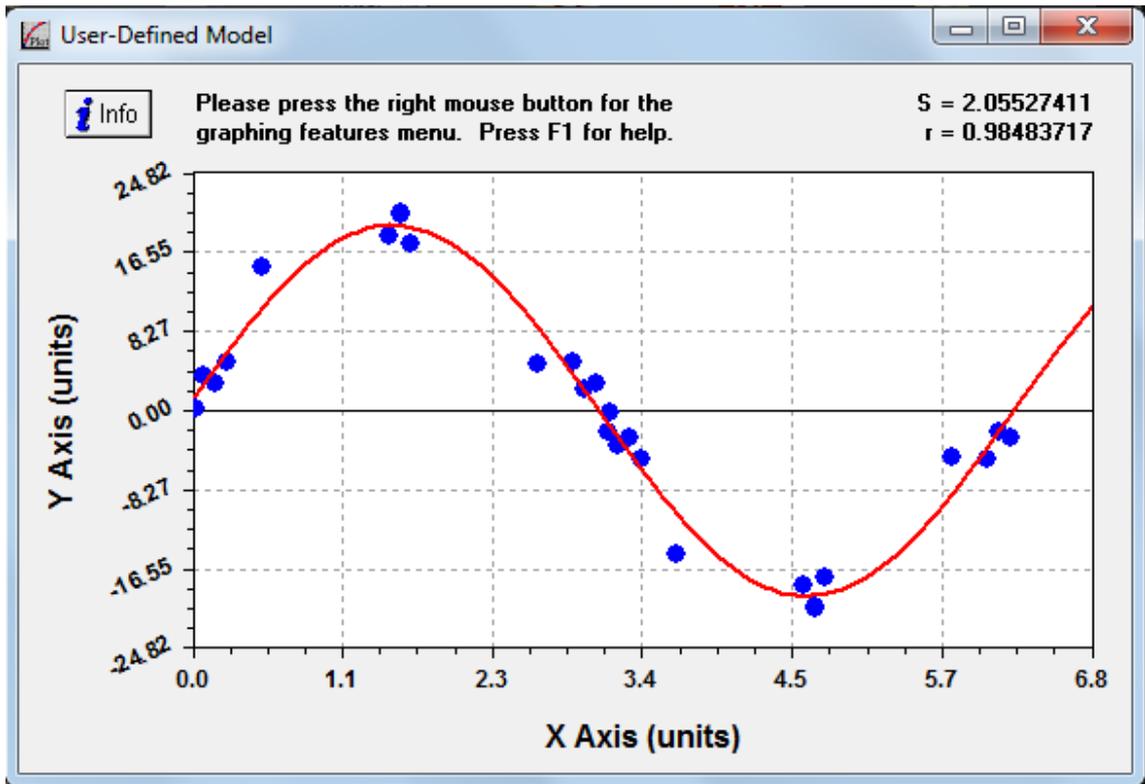


Figura 5.3 - Curva ajustada aos dados referentes à assimetria.

E os valores dos parâmetros A e a encontrados pelo ajuste foram 19,36 e - 0,07 rad respectivamente e, portanto, a Equação 5.6 representa o ajuste aos dados de assimetria.

$$\alpha - \beta = 19,36 \cdot \text{sen}(\theta + 0,07) \quad (5.6)$$

O valor a corresponde a um ângulo de (- 4°) e assim a curva ajustada está deslocada da curva seno de um valor de 4° no sentido negativo do eixo x. As assimetrias máximas ocorrem, portanto nos ângulos 86° e 266°.

Optou-se pela realização dos testes em uma posição próxima a assimetria máxima correspondente ao ângulo de 90° entre a referência escolhida no injetor e o posicionamento da câmera.

5.3 Medições dos Ângulos Externos

Na Figura 5.4, observa-se a saída constituída de uma imagem com a representação das posições onde foram lidos os valores dos pixels em formato de arco de uma circunferência, pela execução do programa do Apêndice 1. Esta figura foi obtida do processo de injeção de gasolina. O programa lê o valor do pixel e em seguida substitui na imagem o pixel lido por um pixel branco (valor 255) para que o usuário tenha controle da localização do perfil na imagem.

Na execução do programa, são solicitados ao usuário o nome da imagem e a distância ao orifício do eletroinjeter. A imagem da Figura 5.4 é o primeiro par da décima imagem de uma aquisição de 30 pares de imagens com intervalos de pulsos de iluminação de 10 microssegundos. A distância ao orifício escolhida foi de 0,70 cm.

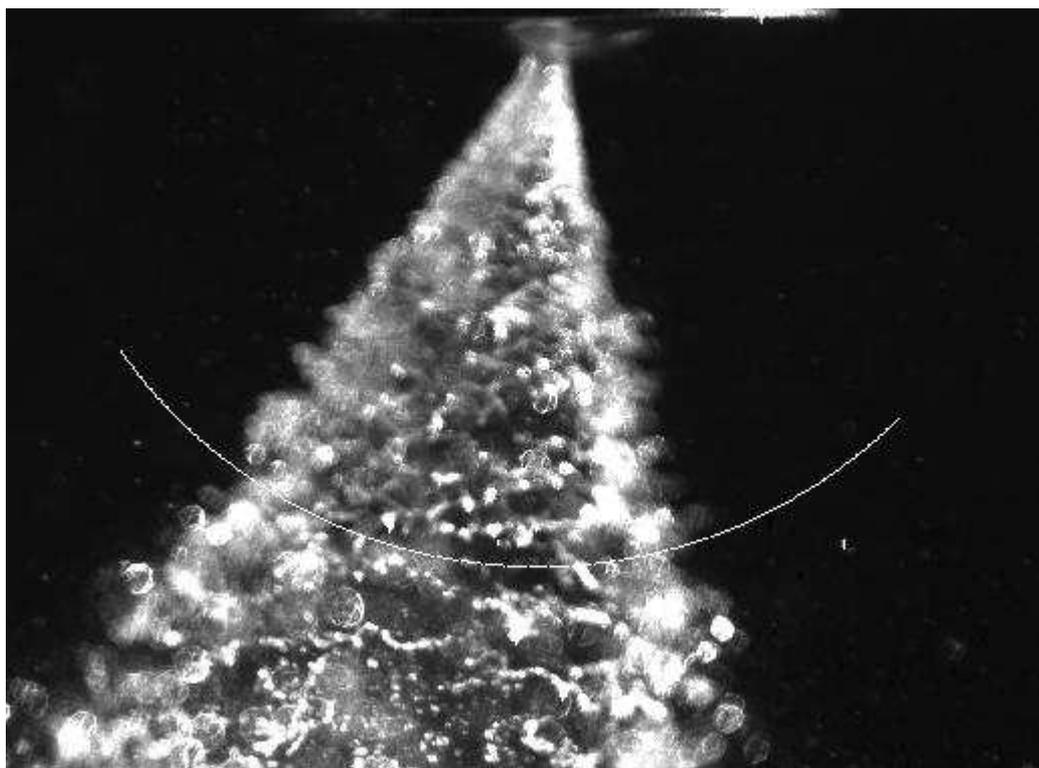


Figura 5.4 - Posições dos pixels a 0,70 cm do orifício.

A Figura 5.5 mostra os valores dos pixels lidos nas posições correspondentes ao arco da figura anterior em função do posicionamento angular em graus.

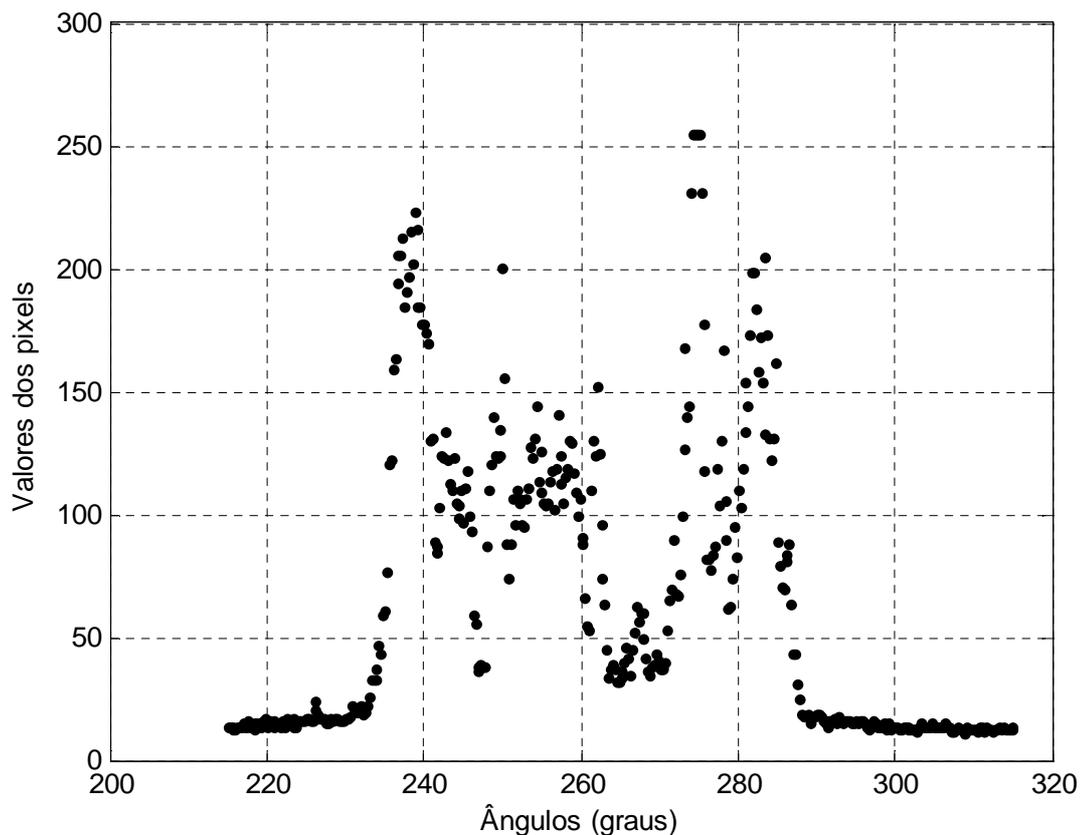


Figura 5.5 - Relação entre os valores dos pixels com o posicionamento angular.

Observa-se através da comparação da Figura 5.4 com a Figura 5.5 que enquanto a região considerada situa-se na parte escura da imagem, os valores dos pixels são pequenos e com diferenças pouco significativas entre eles enquanto que na região interior ao cone os valores são maiores e com maior diferença entre os valores dos pixels próximos. Nota-se ainda que os valores dos pixels diferem bruscamente nas regiões situadas próximas às fronteiras do cone.

Outra característica observável da Figura 5.5 são os valores dos pixels maiores nas regiões próximas às bordas do spray. Tal característica indica maior quantidade de fluido nestas regiões pois os valores maiores correspondem à presença de fluido (branco nas imagens) enquanto os valores menores ausência de fluido (preto nas imagens).

É possível caracterizar de forma aproximada o valor do ângulo do cone através do ângulo varrido pelo arco ao encontrar as fronteiras do líquido. Do perfil da Figura 5.5 observa-se que os ângulos onde ocorrem bruscas variações no perfil estão próximos de 290° e

235° e, portanto, o arco percorre um ângulo de aproximadamente 55° dentro das fronteiras externas do cone.

A informação visual fornecida pelo perfil circular é um critério subjetivo para a determinação do ângulo do cone. Justifica-se dessa forma a utilização do critério matemático definido pela Equação 4.14.

O gráfico da Figura 5.6 mostra a relação de $f(R, \varphi_{i-1})$ com φ_{i-1} para uma distância de 0,70 cm do orifício para o caso da Figura 5.4 conforme Equação 4.14.

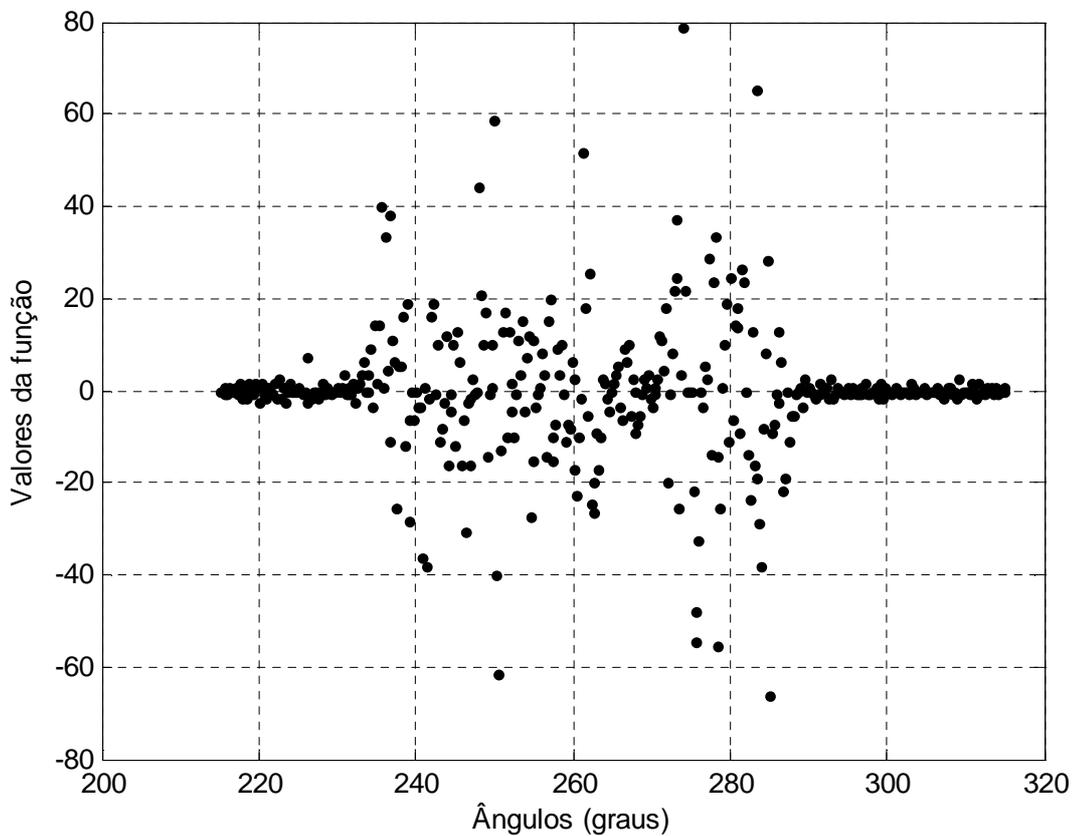


Figura 5.6 - Valores da função de corte em função do posicionamento angular.

Observa-se da Figura 5.6 que nas extremidades, $f(R, \varphi_{i-1})$ varia pouco em torno do zero enquanto que na região central, ocorrem pontos com valores absolutos maiores. As extremidades correspondem às regiões fora do cone líquido de gasolina da imagem. Para definir o ângulo varrido pelo perfil entre as fronteiras do cone, definiu-se então um valor

absoluto de corte para $f(R, \varphi_{i-1})$. Assim, verificando os valores da função, a partir da extremidade esquerda, armazena-se o ângulo daquele que primeiro ultrapassar o valor absoluto de corte, o mesmo ocorrendo para a extremidade direita. A diferença entre os dois valores armazenados corresponde ao ângulo do arco limitado pelas fronteiras do cone. Para a imagem considerada da Figura 5.4, para $|f(R, \varphi)| = 15$ como valor de corte, o ângulo do cone de gasolina a 0,70 cm de distância do orifício foi igual a $51,75^\circ$.

O valor de corte para $|f(R, \varphi)|$ foi escolhido por um teste na execução da rotina do Apêndice 1. Uma das saídas desta rotina é constituída de uma imagem do spray mostrando o arco construído entre suas bordas externas com base no valor de corte colocado como parâmetro dentro da rotina. Alterando o valor de corte e executando o programa, verifica-se por inspeção visual a determinação de um valor que localiza coerentemente as bordas.

O método de análise aqui descrito foi estendido para as 30 imagens obtidas por PIV, e para uma variação de distância a partir do orifício. A saída do programa consistiu no gráfico relacionando ângulo do arco compreendido entre as fronteiras do spray com a distância ao orifício do eletroinjeter. A Figura 5.7 mostra os resultados para o teste com gasolina. Os parâmetros de entrada para a aquisição desta figura foram 0,15 cm de distância inicial, 1,0 cm de distância final e 0,05 cm de incremento de distância.

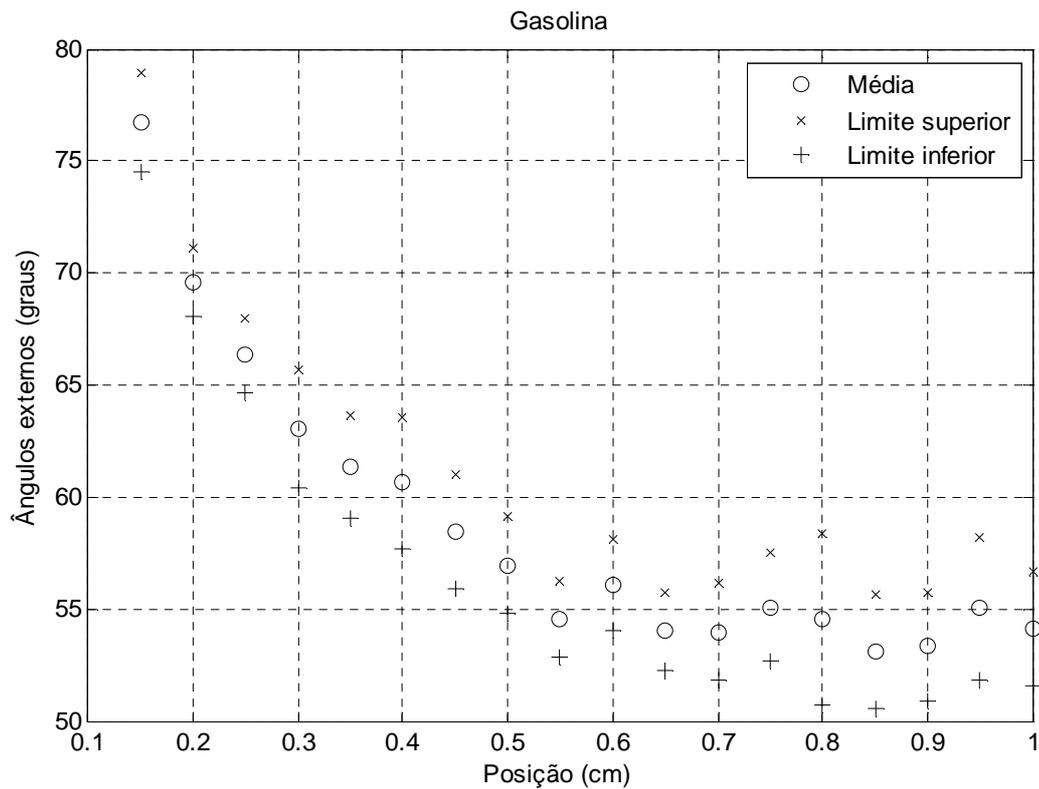


Figura 5.7 - Ângulos em função da posição para a injeção de gasolina para uma faixa de distâncias entre 0,15 e 1,00 cm com incrementos de 0,05 cm.

Os parâmetros de entrada podem ser modificados com o objetivo de analisar faixas de distâncias a partir do orifício diferentes. Também é possível alterar o incremento de distâncias para obter uma quantidade de dados maior (diminuindo o incremento) ou menor (aumentando o valor do incremento). Alterando apenas o incremento de distância de 0,05 cm para 0,01 cm, o gráfico da Figura 5.8 é obtido.

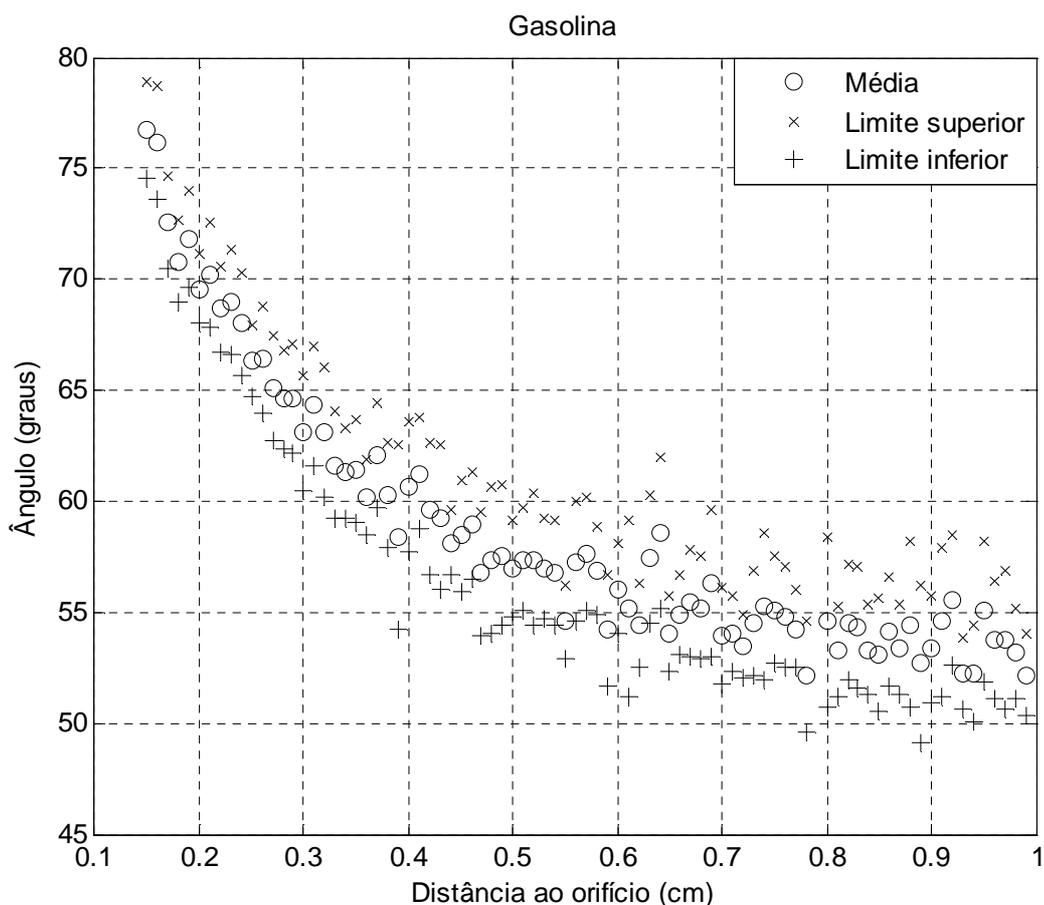


Figura 5.8 - Ângulos em função da posição para uma faixa de distâncias entre 0,15 e 1,00 cm e incrementos de 0,01 cm para o spray de gasolina.

Observa-se da Figura 5.8 que a medida que são consideradas distâncias maiores a partir do orifício, o ângulo do arco compreendido entre as fronteiras do spray é menor. Nota-se ainda que o decaimento angular é mais acentuado em regiões mais próximas ao orifício e que a faixa de repetitividade para estes dados cresce com o afastamento do orifício.

O crescimento da faixa de repetitividade ocorre devido ao fato das bordas dos sprays se tornarem menos definidas a medida que posições mais afastadas do orifício são consideradas.

A Figura 5.9 mostra os resultados para os ângulos do processo de injeção de etanol para a faixa de distância a partir do orifício de 0,15 a 1,00 cm e os incrementos iguais a 0,01 cm.

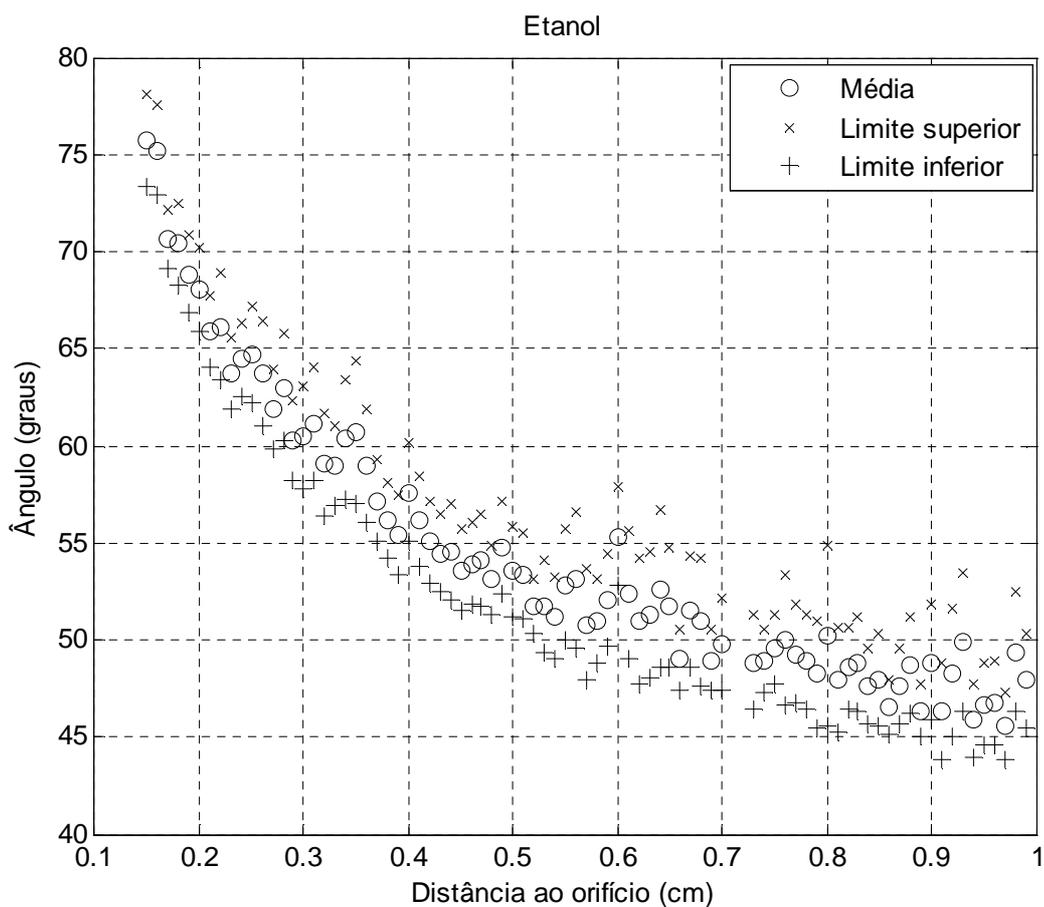


Figura 5.9 - Ângulos em função da distância para uma faixa de distâncias entre 0,15 e 1,00 cm e incremento de 0,01 cm para o spray de etanol.

Observa-se novamente o decrescimento mais acentuado dos ângulos próximo ao orifício e um decrescimento um pouco mais suave em regiões mais distantes. Assim como no caso da gasolina, observa-se novamente aumento da faixa de repetitividade com a distância.

A Figura 5.10 foi o resultado gerado para a água também com uma faixa de distâncias de 0,15 a 1,00 cm e incrementos de 0,01 cm.

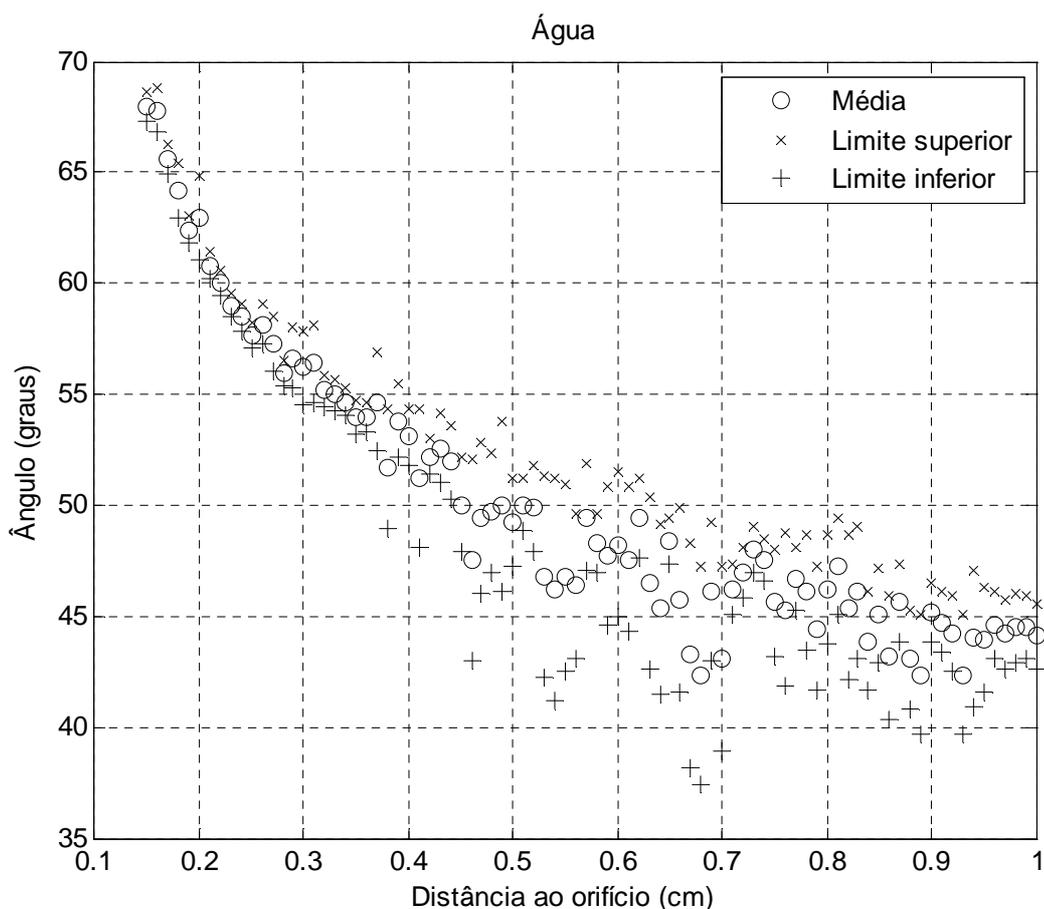


Figura 5.10 - Ângulos em função da distância para uma faixa de distâncias entre 0,15 e 1,00 cm e incremento de 0,01 cm para o spray de água.

O mesmo comportamento referente ao decaimento dos ângulos de forma mais acentuada próximo ao orifício para a gasolina e o etanol e aumento da repetitividade para as posições mais afastadas do orifício também foi verificado para a água.

Em todas as três situações foram verificadas através das figuras relacionando os ângulos com a posição, que a faixa de repetitividade cresce com o aumento da distância, indicando que o código computacional construído prevê com maior exatidão os ângulos dos arcos situados em regiões mais próximas ao orifício.

Os dados da Figura 5.8, da Figura 5.9 e da Figura 5.10 foram reunidos em um mesmo gráfico para uma melhor percepção da diferença do comportamento do ângulo do cone entre os três fluidos.

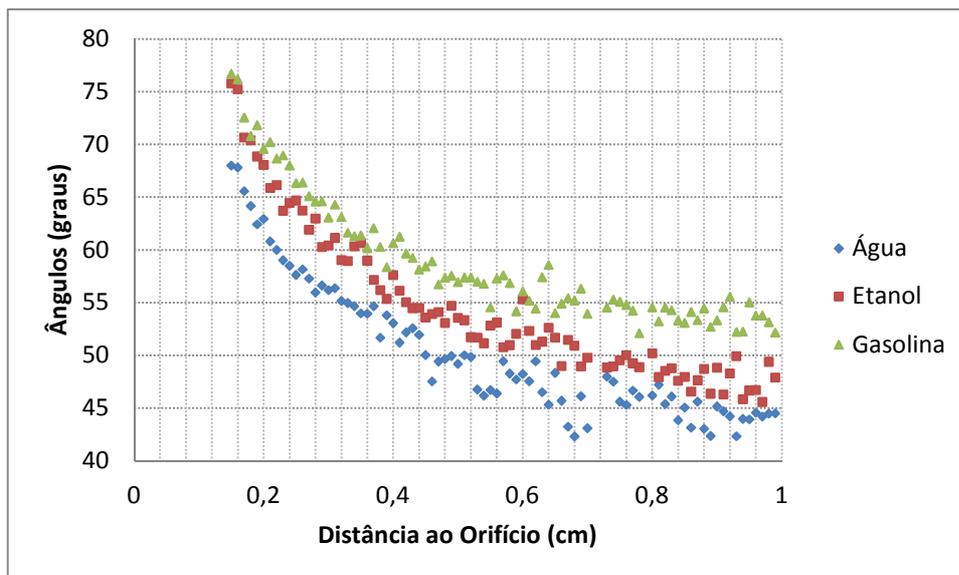


Figura 5.11 - Ângulos entre as bordas externas dos sprays em função da distância para os três fluidos testados.

Verifica-se pela análise dos valores médios da Figura 5.11 que a gasolina foi o fluido que apresentou os maiores valores de ângulos para a faixa de distâncias consideradas seguido do etanol e água.

A Figura 5.11 mostra que dentro da faixa de posições 0,15 a 1,00 cm os contornos do cone são constituídos por fronteiras curvas (ângulo não é constante) para os três fluidos, e portanto, a caracterização do spray quanto ao ângulo através de um único valor, pode não ser um procedimento adequado de caracterização.

A Figura 5.11 mostra claramente que o ângulo do cone é dependente das propriedades dos fluidos. Todos os parâmetros operacionais do experimento e as características da rotina computacional utilizada na geração dos dados, como o valor de corte da função definida pela Equação 4.14 para a identificação das bordas dos sprays foram fixados. A variação da identidade do fluido ocasionando resultados diferentes é um indicativo da dependência deste parâmetro em relação às suas propriedades.

Esta forma de analisar ângulos ao longo de uma faixa de posições a partir do orifício do eletroinjeter tem a vantagem de padronizar o procedimento de medição ao invés de simplesmente traçar dois eixos que cortem as bordas do spray e medir o ângulo formado entre eles conforme mostrado na Figura 4.11 que demonstra tal procedimento para a determinação

da assimetria dos testes. Além disso, medir os ângulos através de arcos compreendidos entre as fronteiras dos sprays e poder escolher a distância dos arcos em relação ao orifício, permite o estudo do comportamento do ângulo com relação à posição.

A Figura 5.11 contém 82 pontos para cada um dos três fluidos testados e então há um total de 246 pontos. Originalmente seriam 85 pontos para cada fluido, mas três pontos foram retirados por apresentarem comportamentos muito distantes do padrão geral. Cada ponto é a média da medição em 30 imagens e então a Figura 5.11 é o resultado de 246 x 30 medidas totalizando 7380 medições. Fazer mais de 7000 medições seria, portanto, inviável por um procedimento manual.

O número de Reynolds Re , definido pela Equação 5.6 e o número de Weber We definido pela Equação 5.7 foram estimados para os três fluidos.

$$Re = \frac{\rho V_0 D}{\mu} \quad (5.6)$$

$$We = \frac{\rho V_0^2 D}{\sigma} \quad (5.7)$$

O número de Reynolds indica a razão entre forças de inércia e forças viscosas associadas ao escoamento enquanto o adimensional Weber indica a razão entre as forças de inércia e de tensões do fluido.

Nas Equações 5.6 e 5.7 ρ representa a massa específica do fluido, V_0 a velocidade de saída do fluido do injetor obtida dos testes de vazão, D o diâmetro do orifício e σ a tensão superficial dos fluidos. As propriedades físicas foram retiradas de LIDE (2004), em que as propriedades do octano, etanol e água foram consideradas como as propriedades da gasolina, do etanol hidratado e da água. Os valores estimados estão na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Estimativas dos números de Weber e Reynolds para os três fluidos testados.

Fluido	Reynolds	Weber
Gasolina	$5,07 \times 10^3$	$3,61 \times 10^3$
Etanol	$5,73 \times 10^3$	$3,95 \times 10^3$
Água	$8,64 \times 10^3$	$1,51 \times 10^3$

Dadas as proximidades dos números de Reynolds e Weber estimados para o etanol e a gasolina e as diferenças entre as propriedades do octano e etanol com a gasolina C e o álcool combustível, respectivamente, os valores da Tabela 5.2 podem não estar diferenciando os dois combustíveis de forma apropriada quanto aos adimensionais.

A comparação entre os dois combustíveis e a água, sugere uma tendência de diminuição dos ângulos para maiores números de Reynolds e menores números de Weber. Além disso, dadas as proximidades entre as densidades dos três fluidos, a comparação entre os números de Weber indica tendência de diminuição dos ângulos para valores de tensões superficiais mais elevados.

A Tabela 4.2 indica ainda uma tendência ao escoamento mais turbulento para a água pela análise do número de Reynolds. Este adimensional fornece uma medida da tendência às forças de desintegração do jato líquido, LEFEBVRE, (1989).

O mesmo tratamento foi realizado com a filmagem a alta velocidade. Como exemplo, a Figura 5.12 mostra o perfil situado a uma posição de 0,70 cm da injeção de gasolina utilizando uma imagem obtida após o tratamento descrito no item 4.12.



Figura 5.12 - Posições dos pixels situados a uma distância de 0,70 cm do spray de gasolina em uma imagem obtida a alta frequência após tratamento.

O gráfico relacionando os valores dos pixels nas posições indicadas na Figura 5.12 em função do ângulo encontra-se na Figura 5.13.

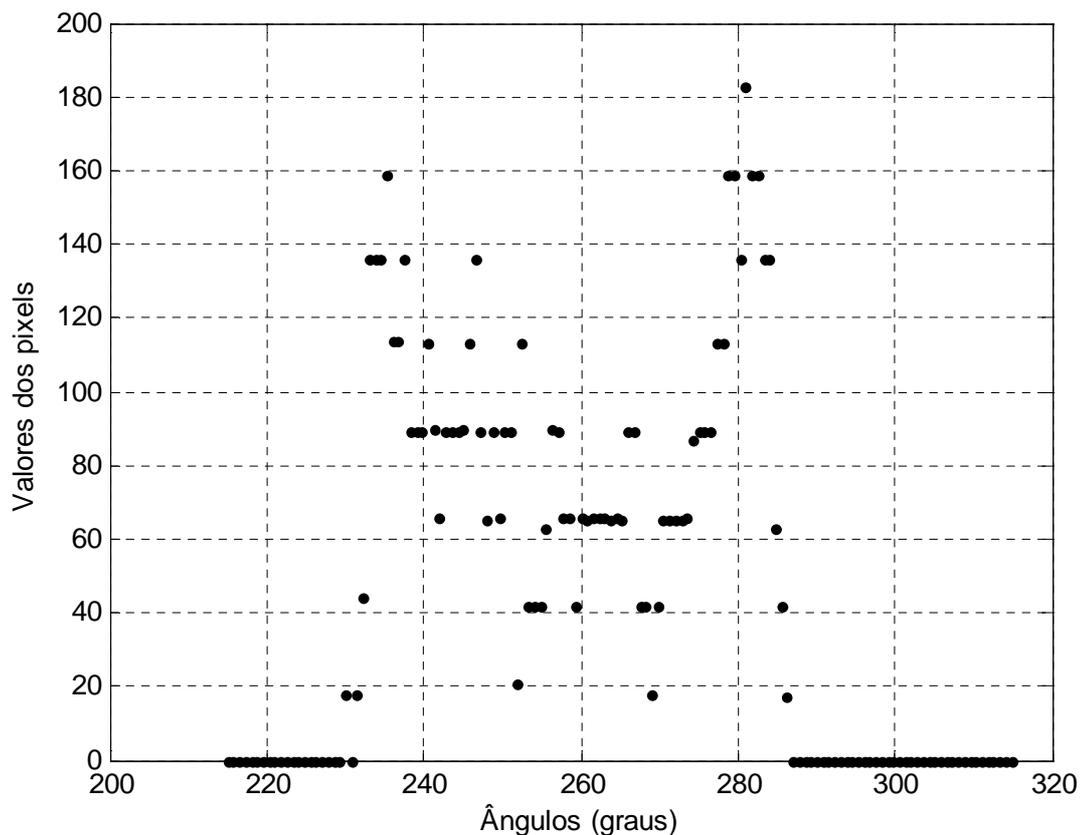


Figura 5.13 - Valores dos pixels em função do posicionamento angular a 0,7cm do orifício para uma imagem obtida a alta velocidade de filmagem.

Verifica-se da Figura 5.13 que vários conjuntos de pixels estão dispostos no gráfico perfazendo linhas aproximadamente horizontais. Tal tendência não é observada na Figura 5.5 para a imagem obtida por PIV. As imagens da Shadowgrafia do trabalho, portanto, revelaram tendência a possuírem valores preferenciais com variações de tonalidade menos suaves.

O gráfico da função definida para a localização das fronteiras em função do posicionamento angular encontra-se na Figura 5.14.

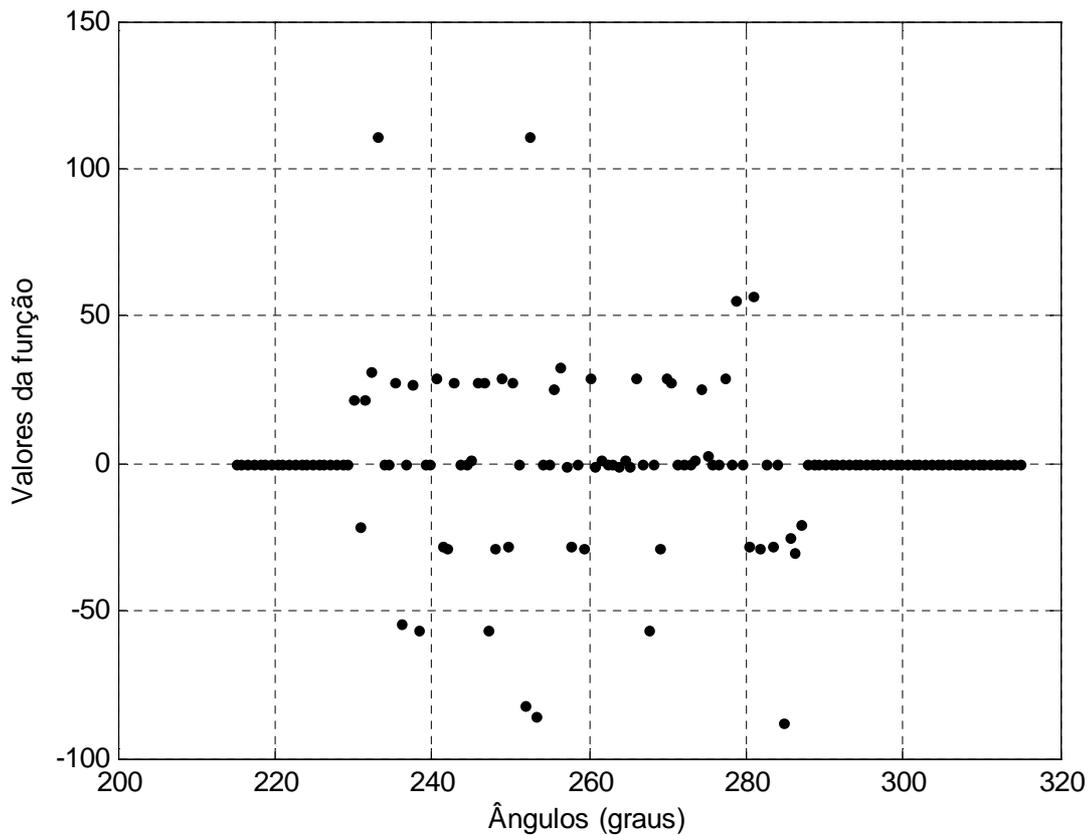


Figura 5.14 - Valores da função de corte em função do posicionamento angular para uma imagem obtida a alta frequência.

A tendência dos valores dos pixels nas imagens tratadas da shadowgrafia possuírem valores preferenciais induz o mesmo comportamento para a função de corte definida para localizar as bordas externas dos sprays como pode ser observado na Figura 5.14.

O processamento utilizando 10 imagens obtidas por alta velocidade de filmagem para os três fluidos com o objetivo de verificar o comportamento do ângulo com a distância também foi realizado. O resultado está na Figura 5.15 gerada fornecendo distância inicial de 0,15 cm, incrementos de 0,01 cm e posição final de 1,00 cm para os três fluidos.

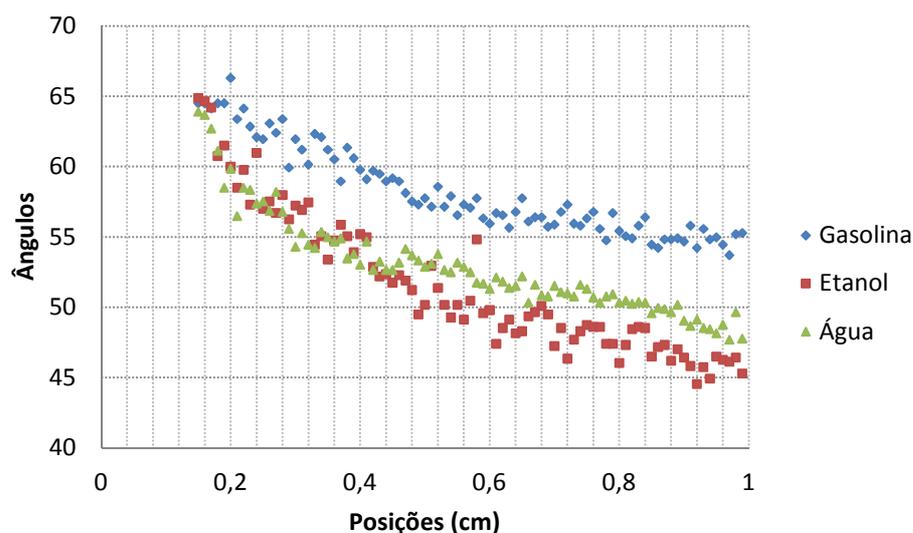


Figura 5.15 - Ângulos entre as bordas externas dos sprays para os três fluidos testados para as imagens a alta velocidades.

Verifica-se novamente que a gasolina foi o fluido que apresentou os maiores ângulos enquanto a água e o etanol apresentaram ângulos aproximadamente coincidentes para as posições mais próximas ao orifício. No entanto, o decréscimo dos ângulos para a água é menos acentuado a medida que há um maior afastamento do orifício, e assim, os valores de ângulos são um pouco maiores para a água comparativamente ao etanol nas posições mais afastadas.

Os ângulos obtidos através das imagens da Shadowgrafia demonstraram valores ligeiramente menores que aqueles obtidos para as imagens PIV como pode ser notado pela comparação das Figuras 5.11 e 5.15. O tratamento das imagens obtidas por Shadowgrafia teve como principal objetivo reduzir a quantidade de ruídos constituídos de pontos claros nas partes mais escuras das imagens tratadas. Este procedimento pode ter também diminuído partes das bordas dos sprays afinando a imagem do cone e ocasionando em uma subestimação dos valores de ângulos.

O método de medição de ângulos pela filmagem a alta velocidade associada à shadowgrafia não revelou de forma eficiente diferenças entre a água e o etanol, facilmente observável na Figura 5.11 referente às imagens obtidas por PIV. Há, no entanto, uma concordância para o comportamento geral observado nas curvas que indicam acentuada curvatura das bordas externas dos sprays para os três fluidos na faixa de distâncias analisadas.

A metodologia desenvolvida no presente trabalho, para o estudo de ângulos de cone dos sprays (ângulos externos), não despreza as curvaturas das bordas e assim possibilita uma análise mais criteriosa deste parâmetro. Além disso, a representatividade dos resultados é bastante significativa, pois o processo de automatização da medição dos ângulos possibilita a aquisição de grande quantidade de medições.

5.4 Medições dos Ângulos Internos

As Figuras 5.16, 5.17 e 5.18 correspondem aos gráficos relacionando os ângulos internos com a distância ao orifício para a água, etanol e gasolina respectivamente. As figuras foram geradas com os parâmetros de entrada constituídos em uma posição inicial de 0,15 cm, incremento de 0,01cm e posição final de 1,00 cm.

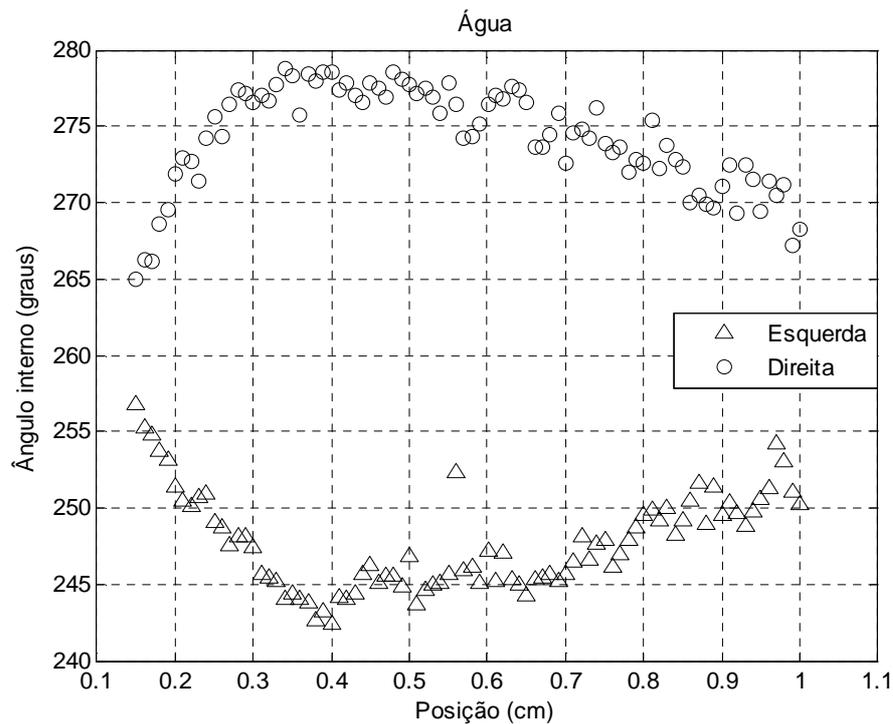


Figura 5.16 - Posicionamento angular das bordas internas para várias posições do spray de água.

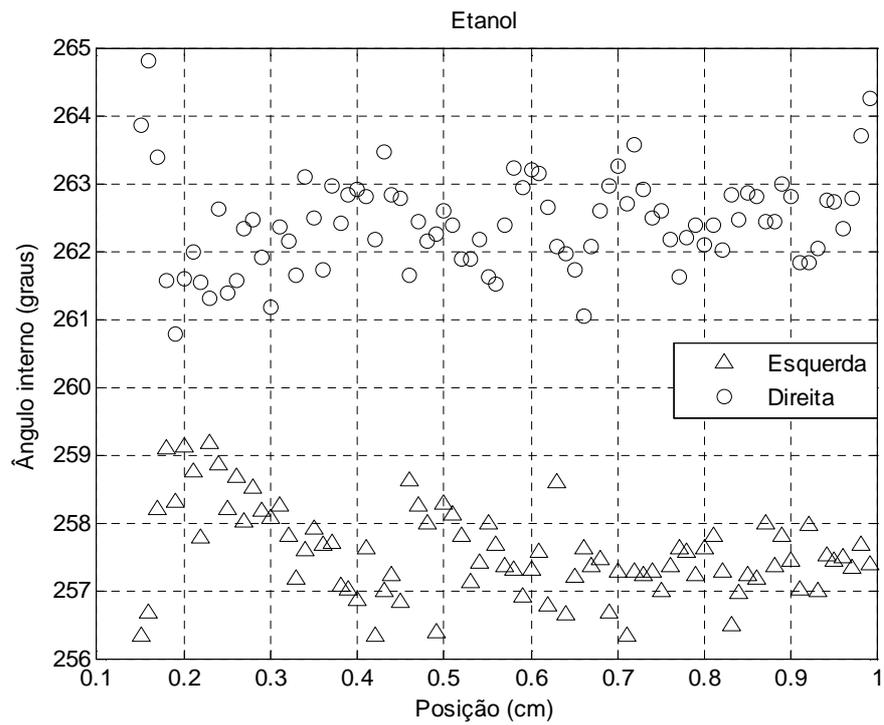


Figura 5.17 - Posicionamento angular das bordas internas para varias distâncias do spray de etanol.

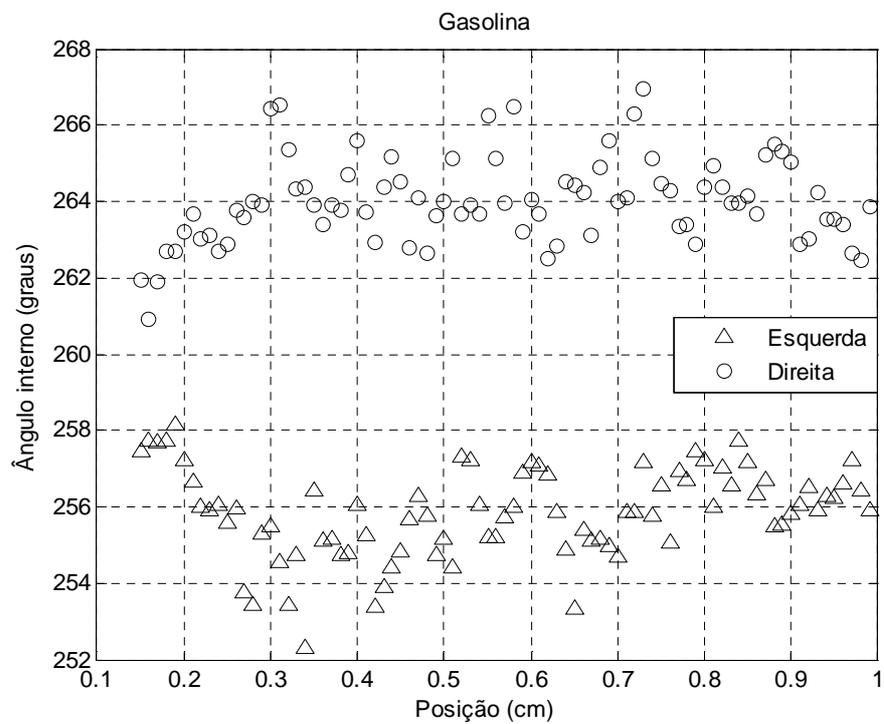


Figura 5.18 - Posicionamento angular das bordas internas para varias distâncias do spray de gasolina.

Todas as figuras foram geradas estabelecendo um valor absoluto de corte para a função da Equação 4.14 igual 30 para a detecção da borda interna.

O ângulo interno foi aqui definido como aquele que em cada posição situa a fronteira separando uma região periférica (mais próxima às bordas externas) de maior vazão com a parte central do cone de menor vazão mássica. Assim é possível verificar que o spray de água é o mais oco, seguido pela gasolina e o etanol pela observação das Figuras 4.16, 4.17 e 4.18. O cálculo do valor médio dos ângulos internos para a faixa de distâncias das figuras anteriores, com as respectivas faixas de erro aleatório, confirma tal comparação. Os resultados estão na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Ângulos internos para a faixa entre 0,15 cm e 1,00 cm de distância.

	Ângulo Interno Médio		
	Direito	Esquerdo	Diferença
Água	$(274,2 \pm 6,8)^\circ$	$(247,8 \pm 6,4)^\circ$	$(26,4 \pm 13,2)^\circ$
Etanol	$(262,4 \pm 1,4)^\circ$	$(257,6 \pm 1,3)^\circ$	$(4,8 \pm 2,7)^\circ$
Gasolina	$(263,9 \pm 2,3)^\circ$	$(255,8 \pm 2,4)^\circ$	$(8,1 \pm 4,7)^\circ$

A medição da diferença dos ângulos das bordas internas dos sprays através da metodologia aqui empregada é um procedimento menos expressivo que aquele realizado para as bordas externas. A Figura 5.6 mostra que no interior dos sprays a função definida para detecção das bordas (Equação 4.14) varia muito, possivelmente por alguma quantidade de gotículas existentes no interior dos sprays, captada pela seção longitudinal do laser no cone. Não existe na região interior ao spray uma diferença de comportamento da função tão significativa quanto aquela verificada para a diferença das regiões externas e internas ao spray que possibilita a detecção da borda externa com um pouco mais de precisão.

5.5 Construção dos Contornos dos Sprays em Coordenadas Cartesianas

A Figura 5.19 mostra o gráfico das bordas internas e externas do spray traçadas em coordenadas cartesianas para a água, a Figura 5.20 as bordas do spray de etanol e a Figura 5.21 as bordas do spray de gasolina.

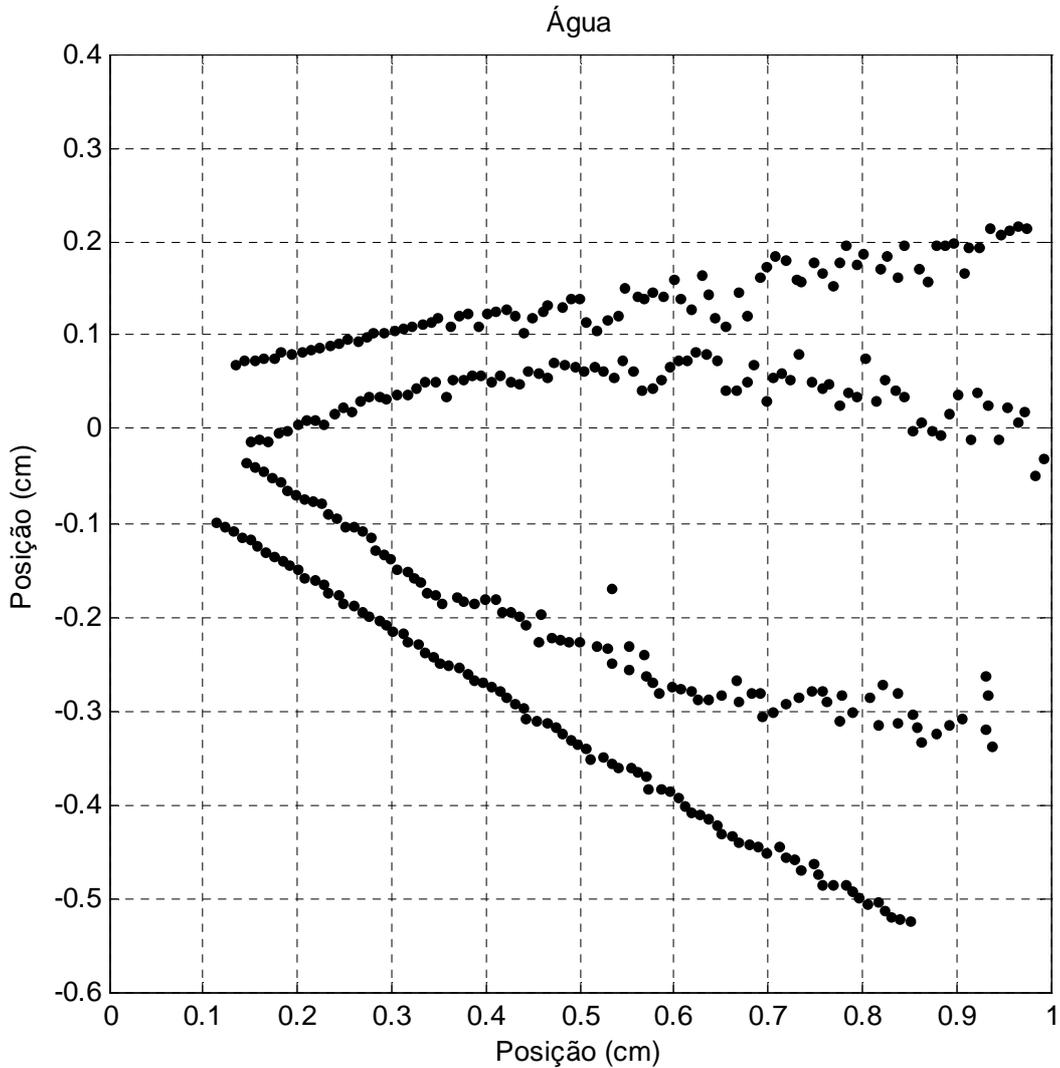


Figura 5.19 - Contornos externos e internos do spray de água construído em coordenadas cartesianas.

A Figura 5.19 mostra que o spray de água possui a periferia com espessura aproximadamente constante até uma distância de cerca de 0,6 cm do orifício. Em seguida há um aumento da mesma com o afastamento.

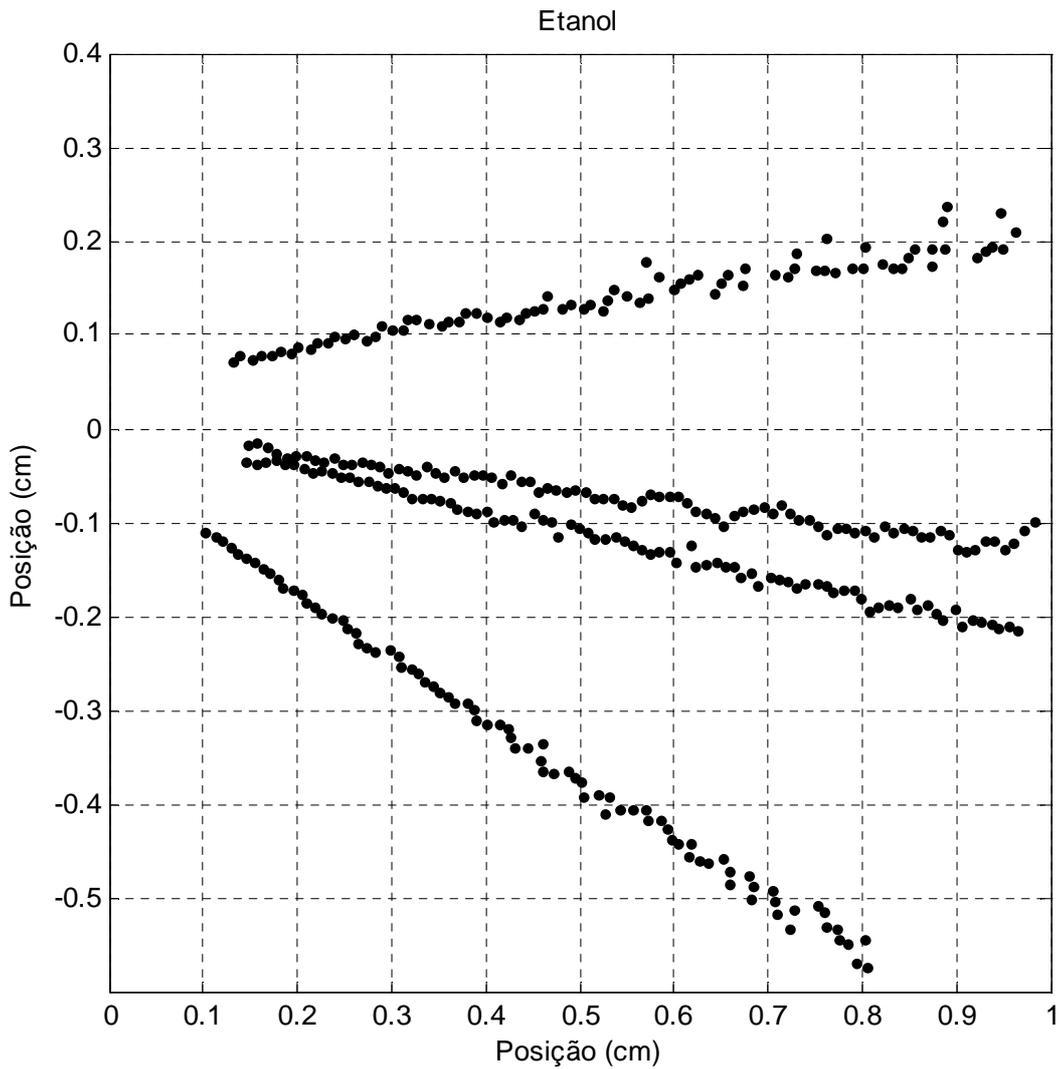


Figura 5.20 - Contornos externos e internos do spray de etanol construído em coordenadas cartesianas.

A Figura 5.20 mostra um aumento progressivo da espessura da periferia em toda a faixa de distâncias analisadas para o spray de etanol. Também é possível verificar crescimento de espaço vazio (distância entre as bordas internas) no interior do spray com o afastamento do orifício.

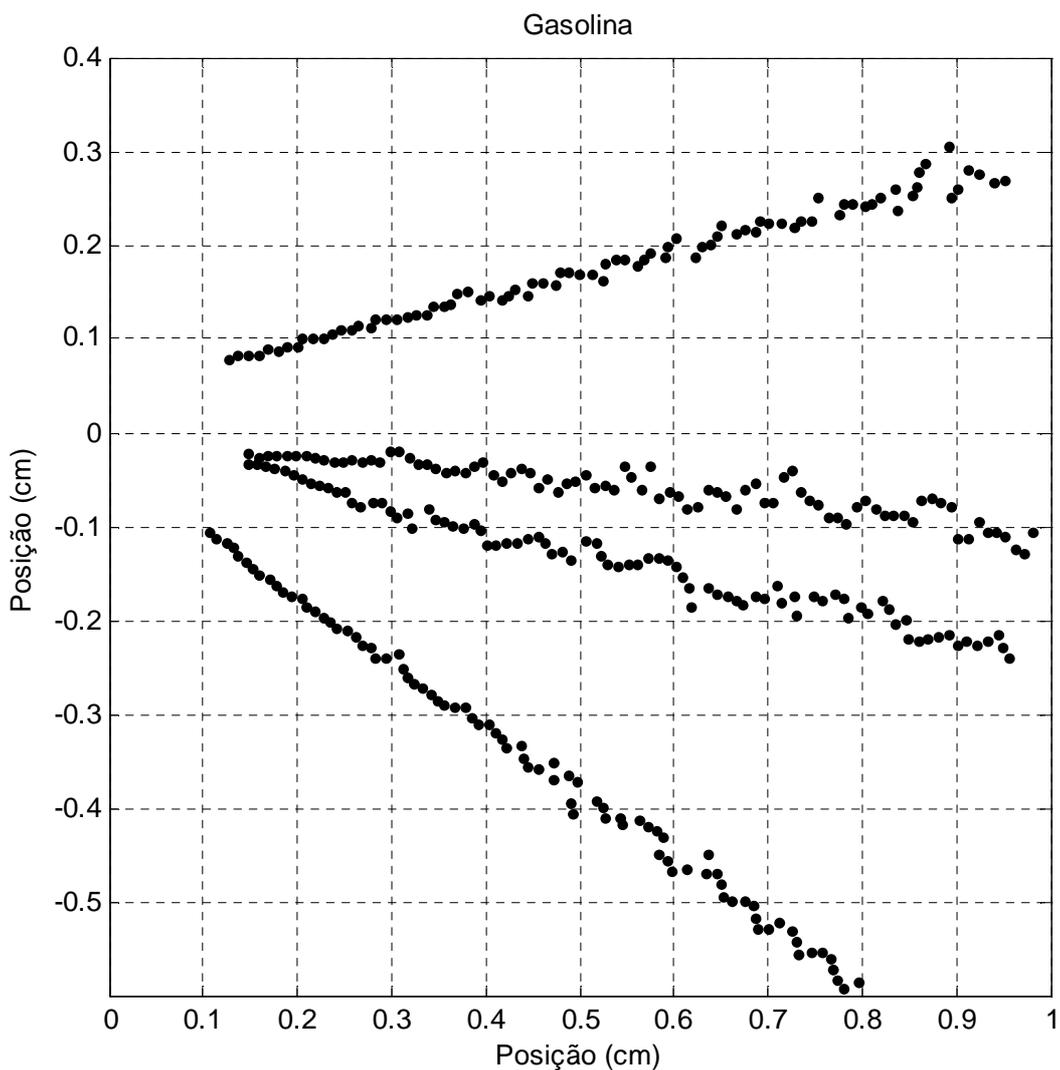


Figura 5.21 - Contornos externos e internos do spray de gasolina construído em coordenadas cartesianas.

A Figura 5.21 também mostra aumento progressivo da espessura da periferia em toda a faixa de distâncias analisadas, para o spray de gasolina e crescimento de espaço vazio no interior do spray.

A hipótese provável para o aumento da espessura da periferia dos jatos líquidos é a perda de velocidade na direção horizontal (velocidade U) dos sprays da periferia para o centro, fazendo que as regiões mais próximas às bordas externas se afastem mais rapidamente do centro que as regiões mais internas.

5.6 Medições dos Ângulos pelo Ajuste Linear

Os gráficos das bordas dos sprays com os respectivos ajustes lineares estão na Figura 5.22 para a água, Figura 5.23 para o etanol e Figura 5.24 para a gasolina.

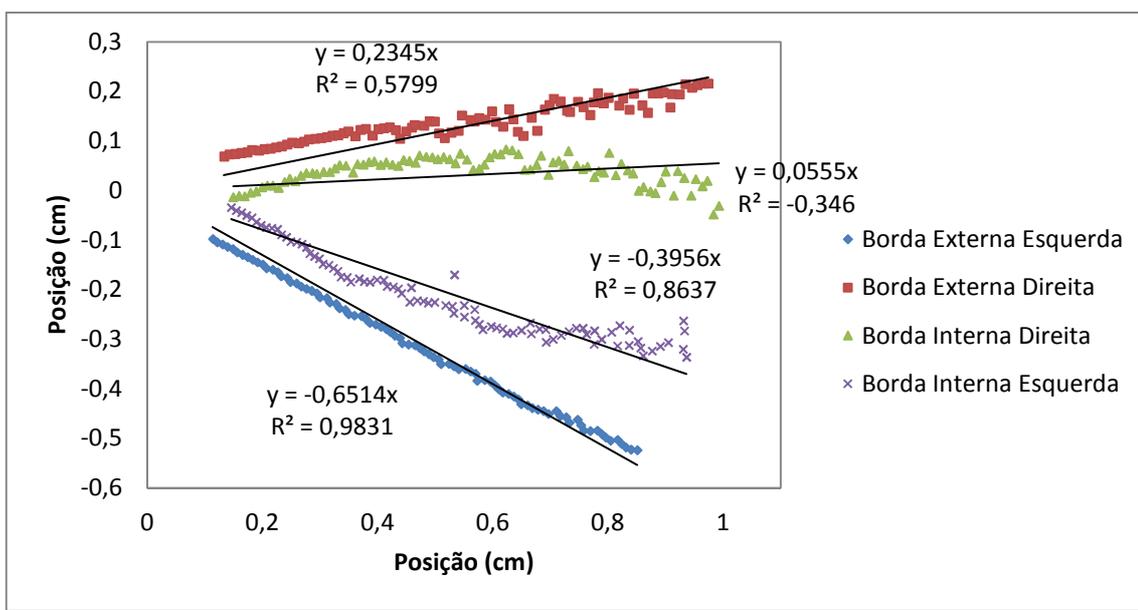


Figura 5.22 - Ajustes lineares aos contornos internos e externos do spray de água.

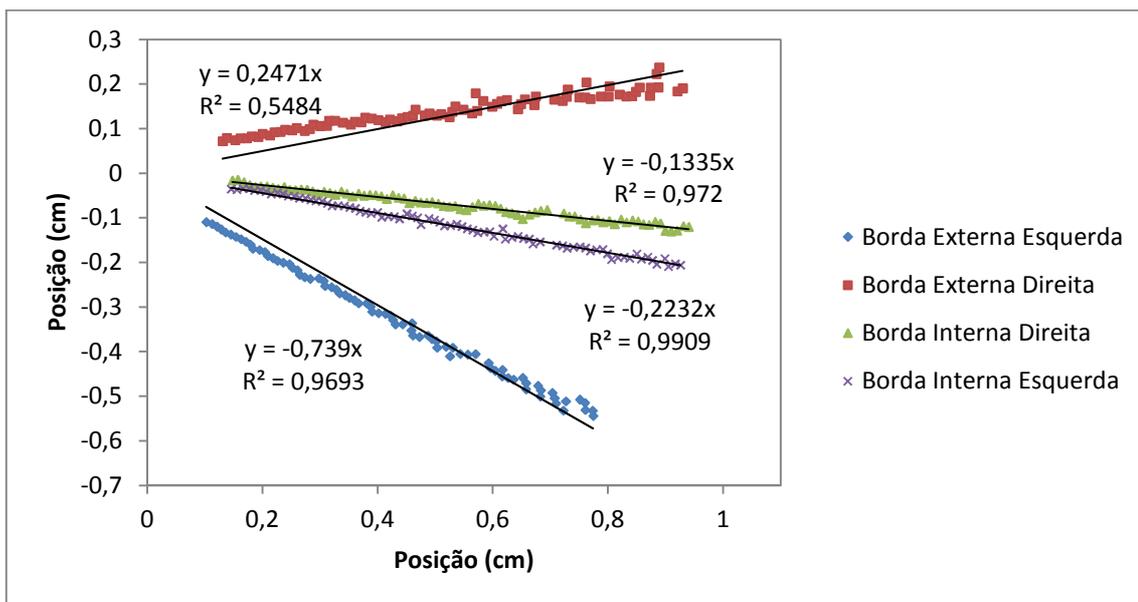


Figura 5.23 - Ajustes lineares aos contornos internos e externos para o spray de etanol.

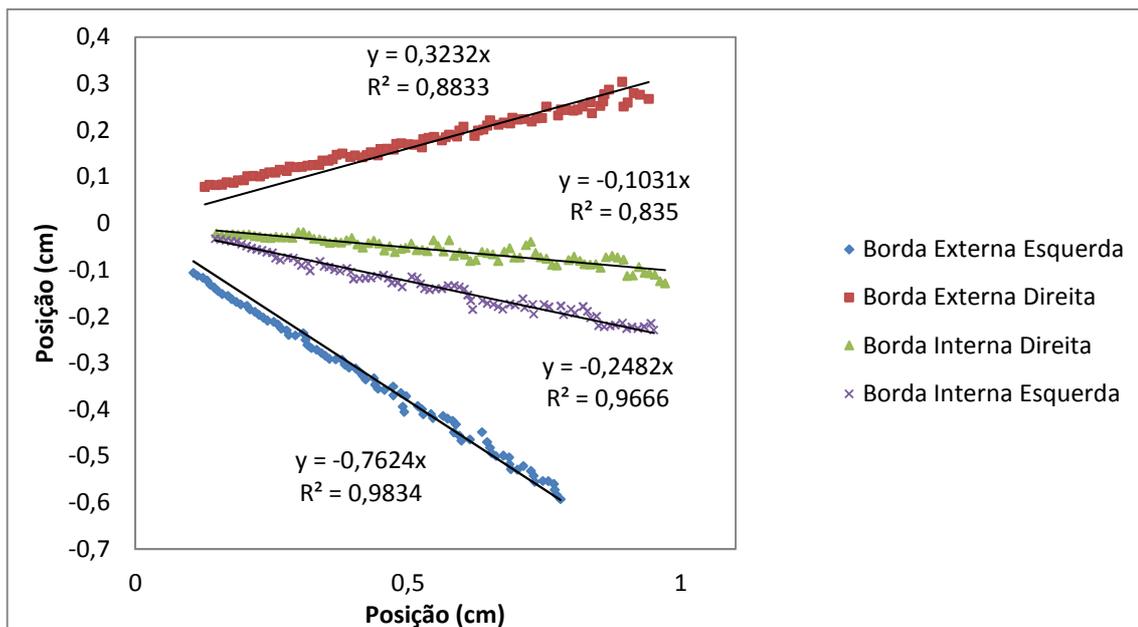


Figura 5.24 - Ajustes lineares aos contornos internos e externos para o spray de gasolina.

Os ângulos calculados utilizando as inclinações das equações ajustadas às bordas (coeficiente de x) nas Equações 4.23 e 4.24 encontram-se na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Ângulos obtidos do ajuste linear às bordas dos sprays.

	Ângulo Interno	Ângulo Externo
Água	24,76°	46,28°
Etanol	4,98°	50,34°
Gasolina	8,05°	55,23°

Com relação aos ângulos internos, a Tabela 5.4 mostra que o cone de água é o mais oco, seguido dos cones de gasolina e etanol. Todos os resultados da segunda coluna da Tabela 5.4 estão dentro das faixas determinadas pela diferença dos ângulos internos da direita e da esquerda da Tabela 5.3.

Para os ângulos externos, verifica-se que a gasolina possui o maior ângulo de cone, a água o menor e o etanol possui um valor intermediário. Estes resultados concordam com a Figura 5.11, em que também é possível chegar à mesma conclusão quanto à comparação dos três fluidos, tornando assim o resultado coerente, pois os ângulos externos utilizados para a construção da Figura 5.11 também foram utilizados nas figuras referentes aos ajustes lineares às bordas.

A metodologia adotada para a obtenção dos ângulos através do ajuste linear às bordas em coordenadas cartesianas possibilita a obtenção de um valor único representativo para este parâmetro. A caracterização dos sprays cônicos quanto ao ângulo é comumente realizada em trabalhos científicos através de apenas um valor e assim a metodologia proposta é semelhante ao que tradicionalmente é realizado. No entanto, um entendimento mais completo deste parâmetro se dá pela análise do ângulo com a posição. A metodologia de estudo de ângulos do item 4.6, portanto, possibilita um avanço maior do entendimento dos sprays quanto ao ângulo de cone.

5.7 Comprimento de Quebra

As Figura 5.25, 5.26 e 5.27 mostram os gráficos relacionando o desvio padrão médio dos valores dos 35 pixels perfazendo um arco dentro das fronteiras do spray cônico em função da posição relativa ao orifício do injetor, respectivamente para a água, o etanol e a gasolina.

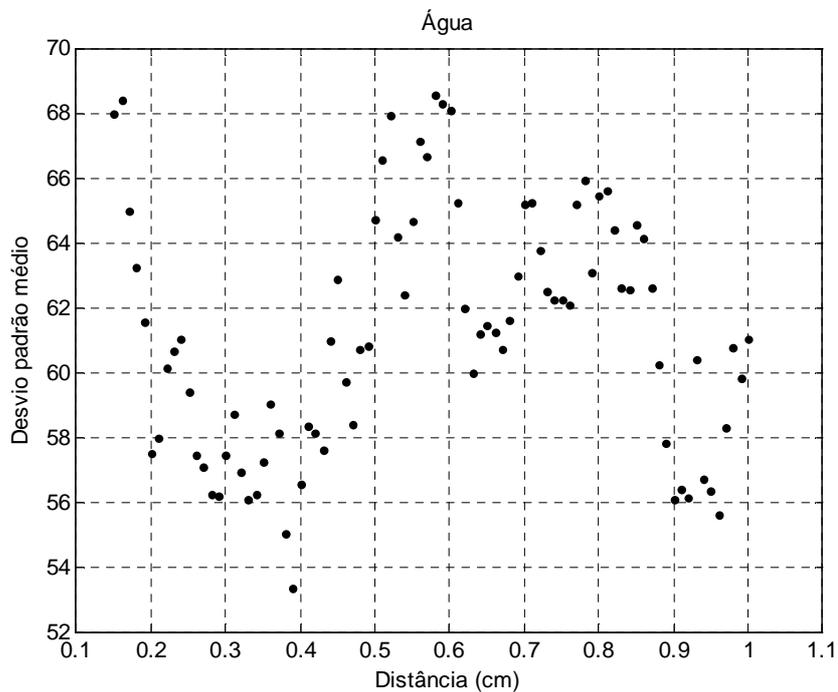


Figura 5.25 - Desvio padrão médio dos pixels situados em arcos confinados dentro das fronteiras externas para o spray de água.

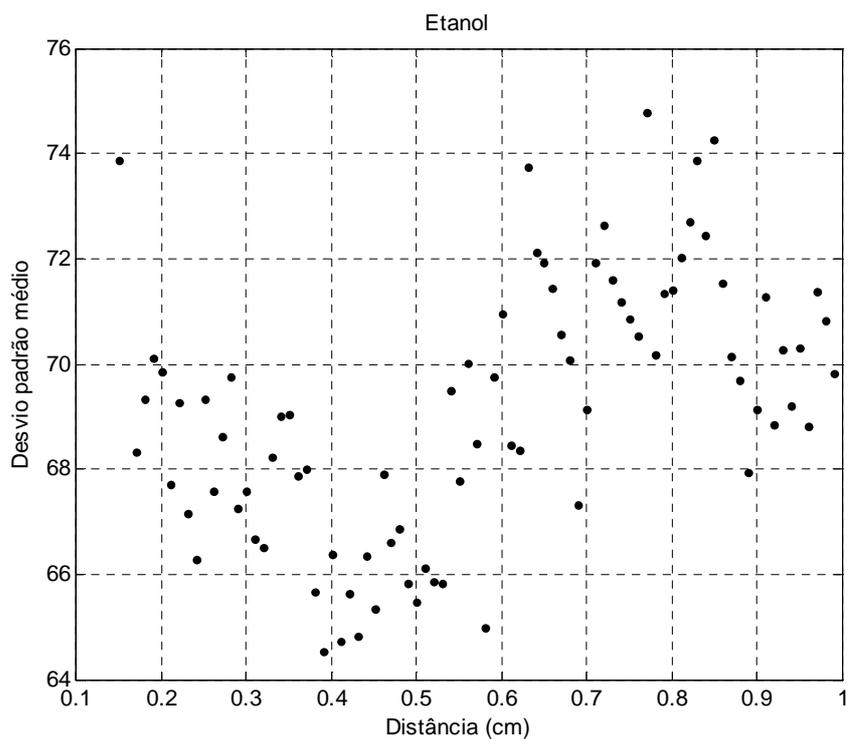


Figura 5.26 - Desvio padrão médio dos pixels situados em arcos confinados dentro das fronteiras externas para o spray de etanol.

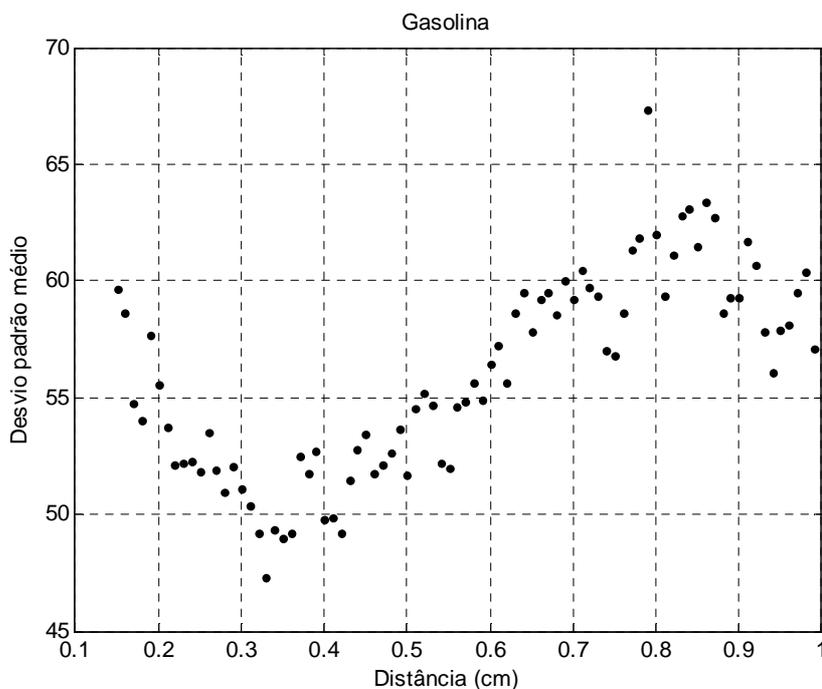


Figura 5.27 - Desvio padrão médio dos pixels situados em arcos confinados dentro das fronteiras externas para o spray de gasolina.

Nota-se nas três figuras relacionando o desvio padrão médio com a distância ao orifício, um mesmo padrão de comportamento geral. Primeiro há um decréscimo do desvio padrão e em seguida um crescimento até atingir um valor máximo, onde é suposto a ocorrência da desintegração do líquido. Cada ponto nestes gráficos representa a média do desvio padrão dos arcos constituídos de 35 pixels igualmente espaçados dentro das bordas externas das 30 imagens obtidas por PIV.

A análise através da verificação do desvio padrão máximo em um conjunto de 30 imagens, com a respectiva faixa de erro aleatório da média revelou os seguintes resultados.

$$L_A = (0,62 \pm 0,06)cm \quad (5.8)$$

$$L_E = (0,67 \pm 0,09)cm \quad (5.9)$$

$$L_G = (0,78 \pm 0,04)cm \quad (5.10)$$

em que L_A , L_E e L_G designam os comprimentos de quebra da água, gasolina e etanol respectivamente.

Em relação aos dados apresentados na Tabela 5.2, referentes aos adimensionais Reynolds e Weber, seria esperado maior comprimento de quebra do jato para a água devido ao baixo valor do número de Weber. Contudo isso não ocorreu possivelmente devido ao maior número de Reynolds, o que indica um regime de turbulência mais intenso que levou a ruptura do jato em uma posição mais próxima do orifício.

Para o etanol e a gasolina existe uma intersecção das faixas de valores obtidas para os comprimentos de quebra. Esta observação está coerente com a proximidade dos valores de Reynolds e Weber para estes testes.

A aquisição de dados referentes ao comprimento de quebra dos sprays como realizado no presente trabalho tem a vantagem de automatizar o procedimento de medição deste parâmetro. Grande quantidade de medições pode ser realizada desta forma. No entanto, a metodologia está baseada em suposições e este fato constitui uma desvantagem do método. As principais suposições adotadas nesta metodologia são: comprimento de quebra entre 0,15 e

1,00 cm e a ocorrência da quebra na posição de máximo desvio padrão dos pixels constituídos de arcos confinados entre as fronteiras externas do cone na faixa de posições analisadas.

5.8 Medições das Penetrações

As Figura 5.28, 5.29 e 5.30 mostram os subsequentes estágios de evolução do início da injeção da água, etanol e gasolina respectivamente.

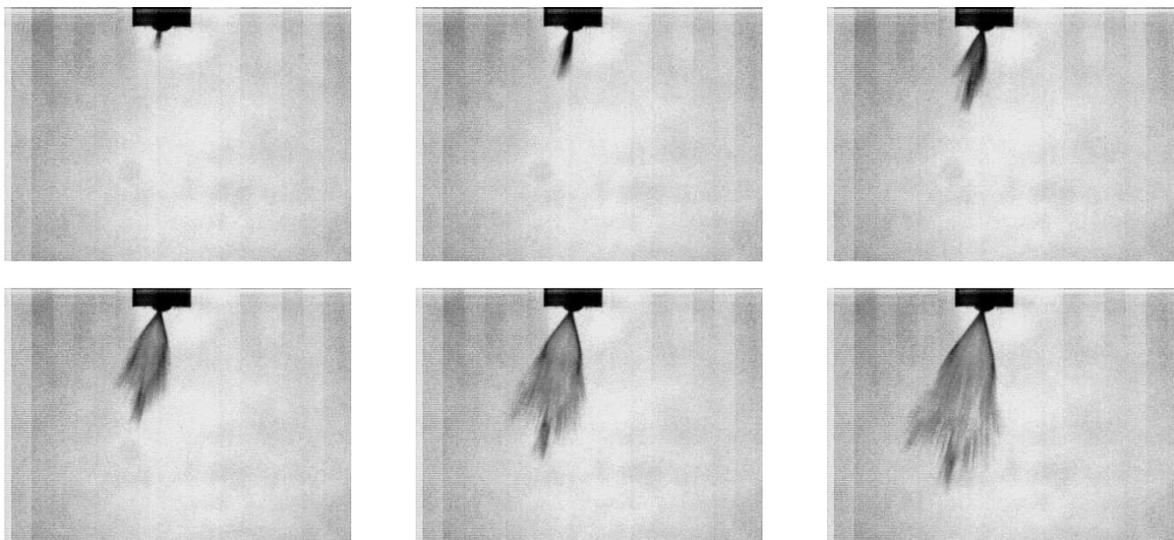


Figura 5.28 - Estágios do desenvolvimento do spray de água.

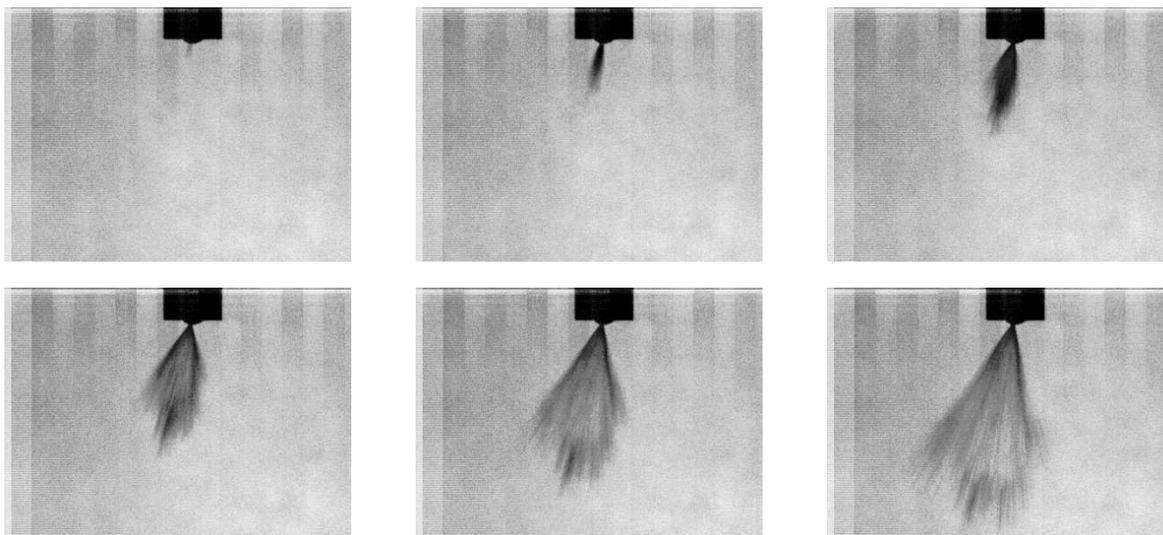


Figura 5.29 - Estágios do desenvolvimento do spray de etanol.

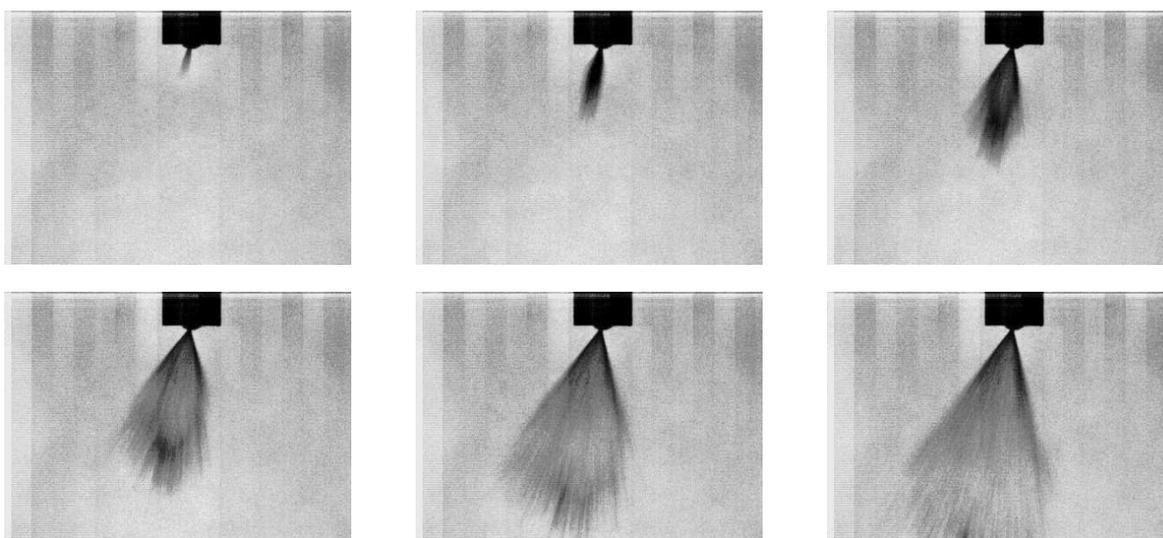


Figura 5.30 - Estágios do desenvolvimento do spray de gasolina.

É perceptível nos três casos que nos instantes iniciais da injeção, o fluido sai do orifício com o formato de um estreito filamento. O formato cônico se desenvolve então em uma fase posterior.

Os gráficos relacionando a penetração total e vertical em função do tempo estão ilustrados nas Figuras 5.31 e 5.32 para a água, Figuras 5.33 e 5.34 para o etanol e Figuras 5.35 e 5.36 para a gasolina com as respectivas equações ajustadas aos gráficos e os limites superior e inferior dados pelas repetitividades dos valores médios.

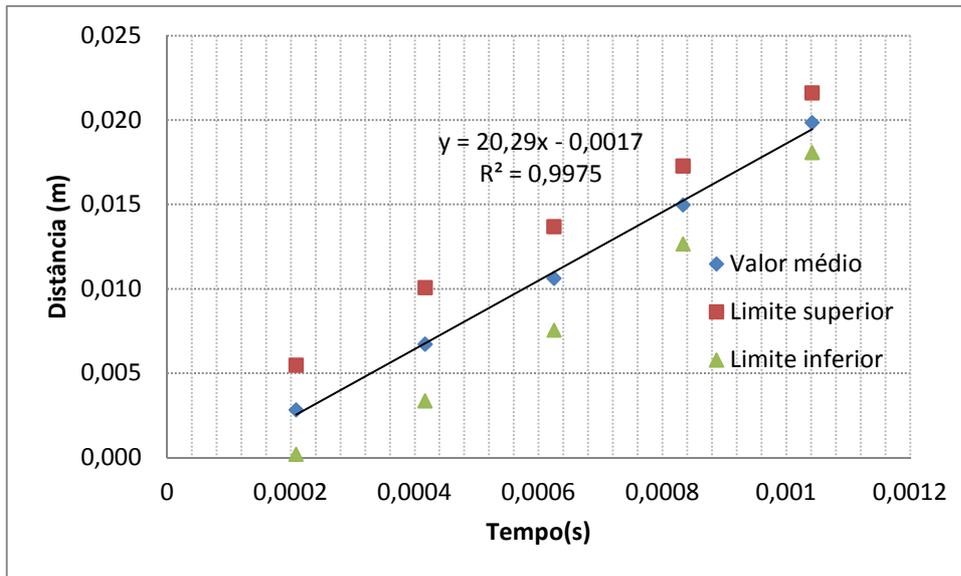


Figura 5.31 - Penetração total da água.

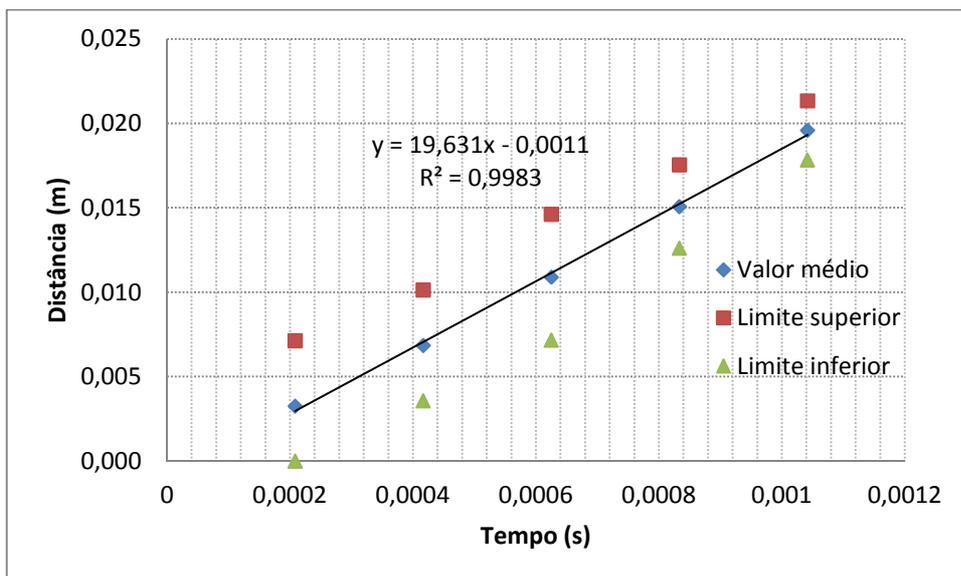


Figura 5.32 - Penetração vertical da água.

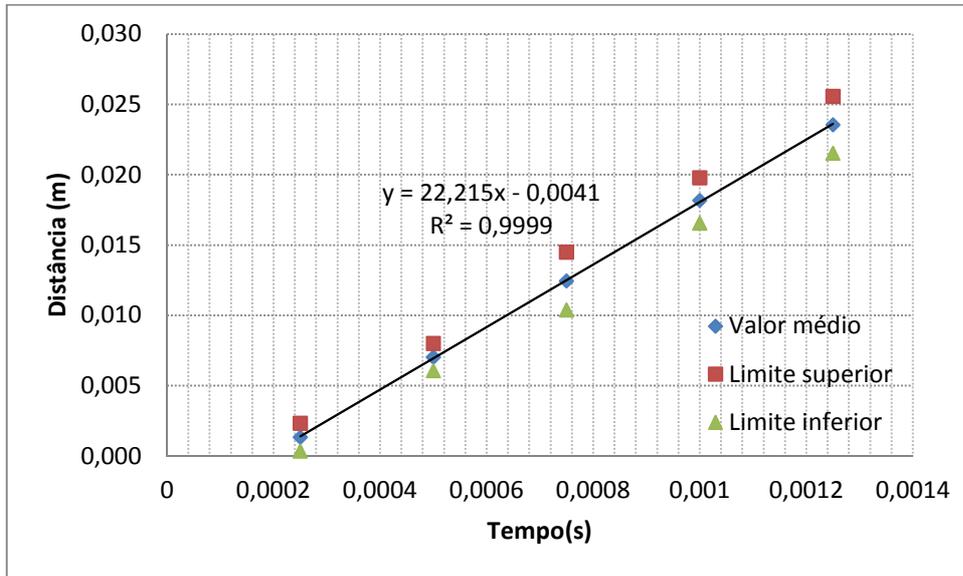


Figura 5.33 - Penetração total do etanol.

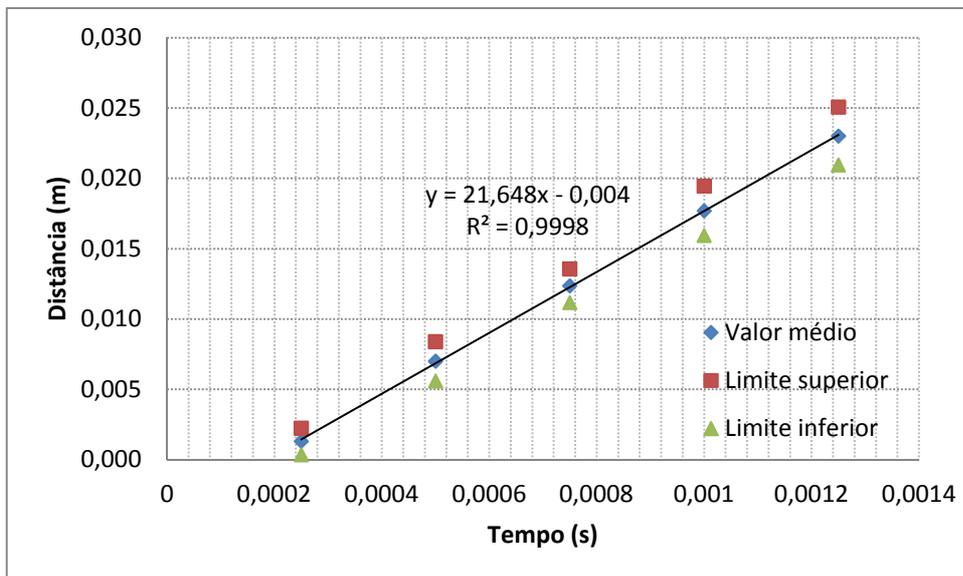


Figura 5.34 - Penetração vertical do etanol.

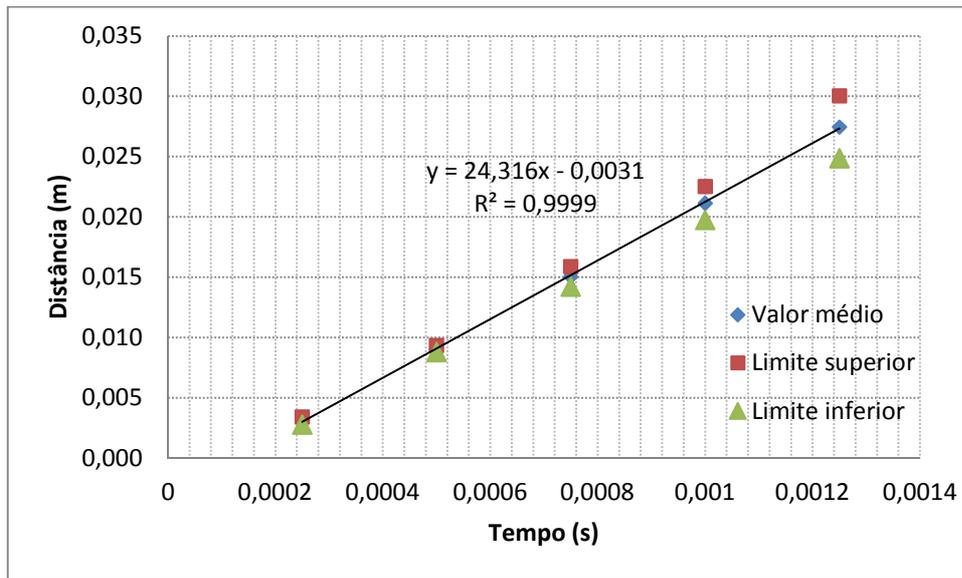


Figura 5.35 - Penetração total da gasolina.

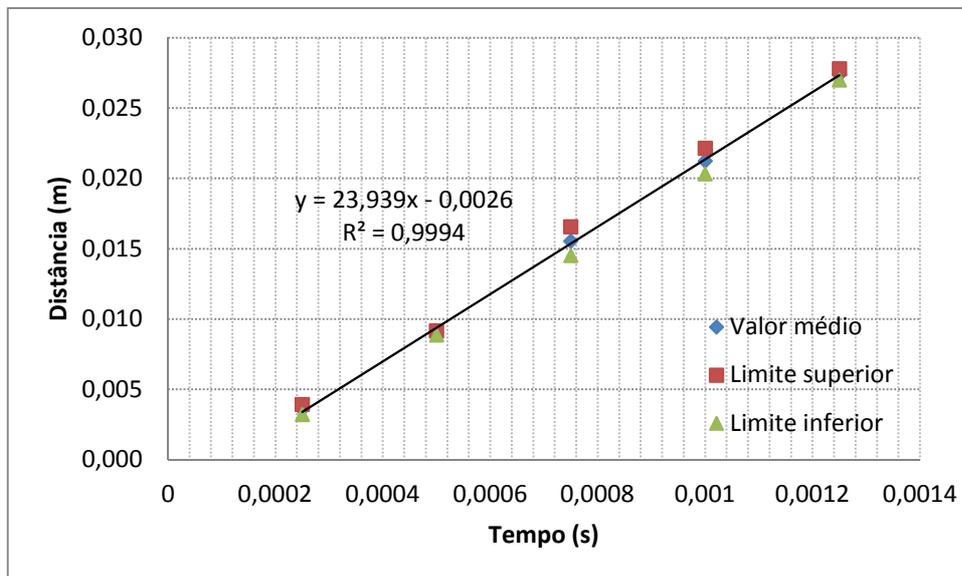


Figura 5.36 - Penetração vertical da gasolina.

Nota-se um comportamento linear dos dados para a faixa de distâncias possíveis de medição (limite em que é possível observar o distanciamento máximo do jato em relação ao orifício). Optou-se então pelo ajuste do tipo $y = ax + b$. A inclinação a representa, desta forma, a derivada da penetração com relação ao tempo, caracterizando assim uma velocidade.

O termo b é dependente da escolha do referencial de tempo utilizado. Se fosse possível denotar $t = 0$ para o instante imediatamente anterior à saída do fluido do injetor, o termo b estaria próximo ao valor zero. No entanto, foi escolhido um tempo inicial igual ao intervalo entre duas imagens para a primeira imagem em que aparece o fluido saindo do injetor, o que obviamente não significa que a imagem anterior sem spray que está no tempo zero, corresponda a uma situação próxima o suficiente do instante imediatamente anterior à injeção a tal ponto que o termo b seja igual a zero.

SHAO et al. (2006) mediram a penetração de sprays em injetores diesel obtendo curvas com inclinações positivas dentro de todo o domínio de tempo utilizado. No entanto o comportamento das curvas obtidas não foram lineares. As inclinações das curvas visualmente apresentaram decréscimo com relação ao tempo.

ZHAO et al. (2002) também apresentam curvas de penetração típicas esperadas para injetores de injeção direta de gasolina com forma geral semelhante ao do trabalho de SHAO et al. (2006).

Os comportamentos lineares observados nos gráficos da penetração provavelmente devem-se ao fato da distância máxima permissível de medição não ser significativa o suficiente à observação da curvatura esperada dos dados. O limite imposto pelo tamanho da imagem está, portanto, dentro do limite linear das penetrações.

Ainda com relação à linearidade nos gráficos da penetração, a pressão ambiente dentro da câmara de acrílico pode não ter sido alta o suficiente para induzir a curvatura.

As inclinações dos gráficos das figuras referentes às penetrações correspondem à velocidade resultante V_R e a componente vertical V_V da velocidade de penetração dos sprays. Uma componente horizontal pode ser obtida pela Equação 5.11.

$$V_U = \sqrt{V_R^2 - V_V^2} \quad (5.11)$$

Da mesma forma o ângulo entre a penetração total do spray em relação à vertical passando pelo orifício pode ser calculado através da Equação 5.12.

$$\theta = \cos^{-1} \frac{V_V}{V_R} \quad (5.12)$$

As velocidades V_R e V_V medidas (obtidas das inclinações dos gráficos da penetração), as velocidades V_U e as inclinações da penetração total com relação à vertical calculadas para os três fluidos encontram-se na tabela Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Componentes vertical e horizontal das taxas de penetrações para os três fluidos testados e ângulo da resultante com a vertical.

	Água	Etanol	Gasolina
Componente U (m/s)	5,129	4,987	4,265
Componente V (m/s)	19,631	21,648	23,939
Resultante R (m/s)	20,290	22,215	24,316
Ângulo θ (graus)	14,64°	12,97°	10,10°

A facilidade em medir penetrações nas imagens correspondentes ao estágio inicial das injeções é uma grande vantagem da metodologia empregada para a obtenção deste parâmetro. A desvantagem é o procedimento manual que inviabiliza a aquisição de uma grande quantidade de dados. Se houver a disponibilização de câmeras capazes de filmar em velocidades maiores sem perda significativa de resolução, haverá melhoria no procedimento adotado, pois assim uma maior quantidade de pontos para determinada faixa de distâncias poderá ser obtida.

5.9 Campos de Velocidades

5.9.1 Gasolina

Os gráficos na Figura 5.37 mostram os perfis de velocidades U para a gasolina em formato de arcos de circunferência centrados no orifício no processamento de correlação adaptativa, utilizando uma área de interrogação igual a 32 x 32 pixels. As distâncias ao orifício escolhidas foram de 0,25; 0,50; 0,75 e 1,00cm.

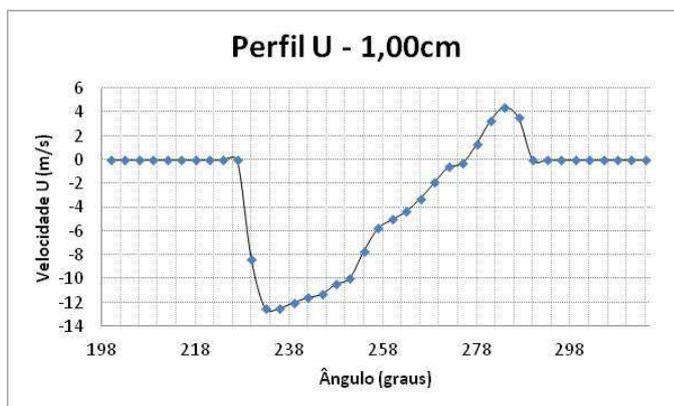
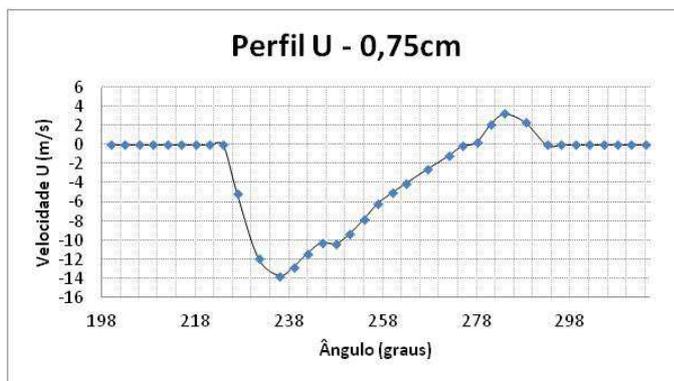
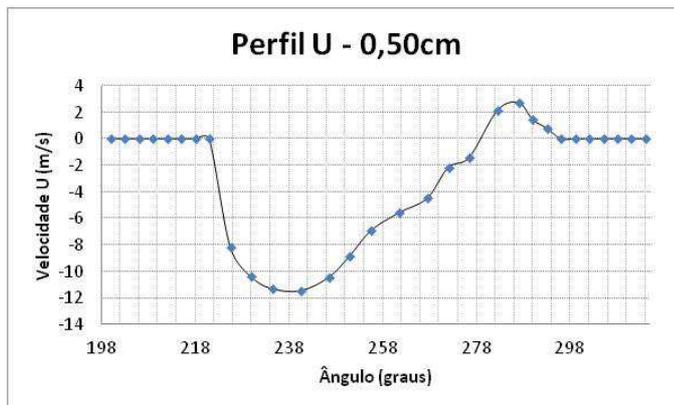
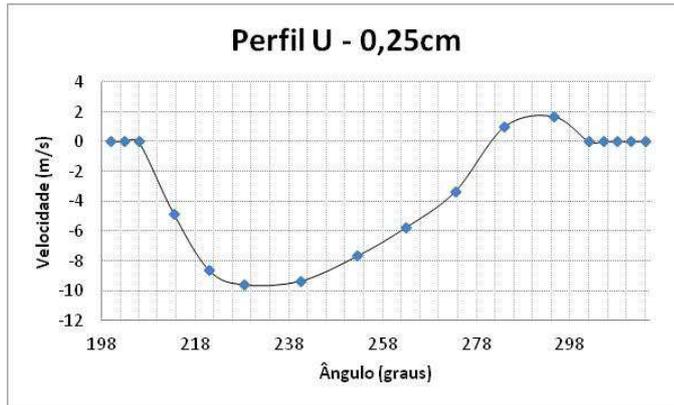


Figura 5.37 - Perfis em arcos das velocidades horizontais para o spray de gasolina.

Para o perfil U, nota-se a divisão do campo em faixas de velocidades positivas e negativas. As velocidades negativas atingem valores absolutos maiores que aqueles atingidos pelas velocidades positivas e estão localizadas em uma faixa maior de ângulos. As velocidades negativas tendem a deslocar o fluido para a esquerda das imagens obtidas enquanto as positivas deslocam o fluido para a direita.

Observando-se as imagens dos sprays, e imaginando-se um plano vertical passando pelo orifício e perpendicular ao plano das mesmas, seria possível notar que a maior parte do fluido estaria localizada à esquerda do plano. O perfil U desta forma, explica a assimetria observada.

Para ter uma melhor percepção da influência da velocidade horizontal, o campo escalar da Figura 5.38 foi construído.

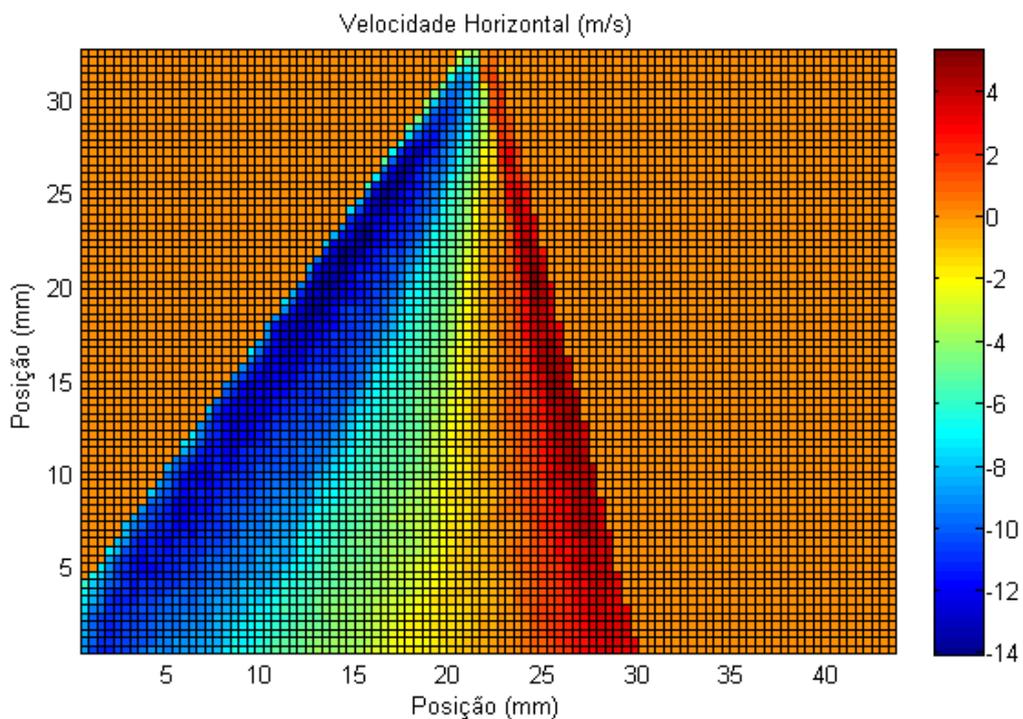


Figura 5.38 - Campo das velocidades horizontais para o spray de gasolina.

A Figura 5.38 mostra uma nítida divisão do spray em três partes. A primeira constituída de um volume maior com velocidades negativas (tons azulados) indicando uma tendência de deslocamento para a esquerda e a segunda constituída por um volume menor

(tons amarelados e avermelhados) com velocidades positivas indicando tendência de deslocamento para a direita. Existe ainda uma região central de transição com velocidades próximas a zero.

Para ter uma noção da faixa de repetitividade da média das velocidades horizontais obtidas, a repetitividade foi traçada para todo o domínio do spray na Figura 5.39.

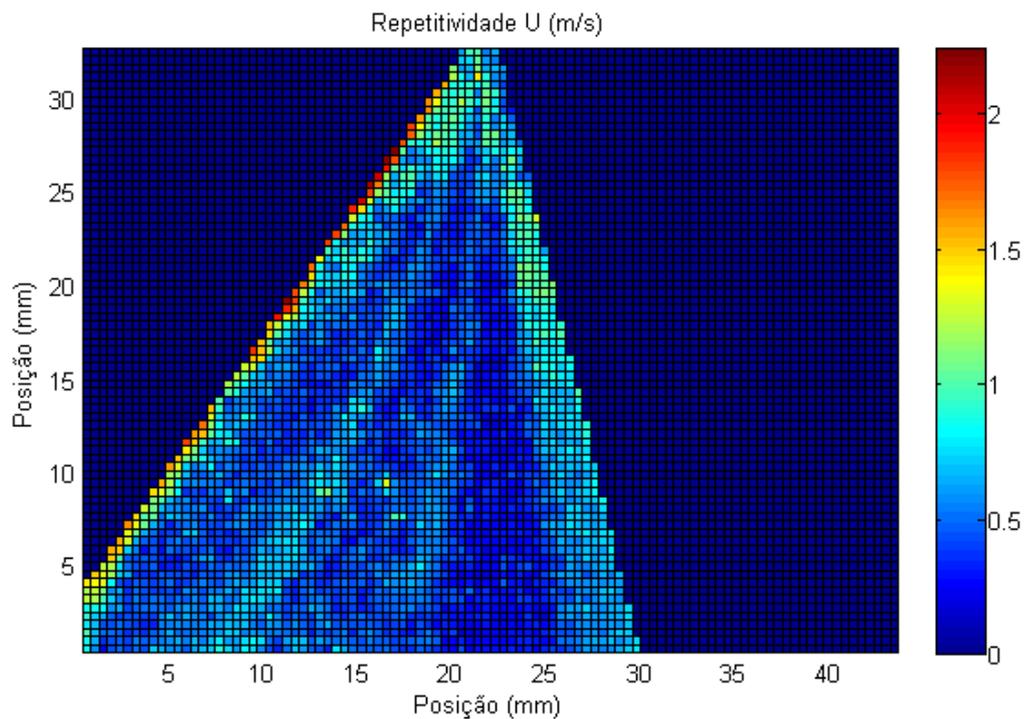


Figura 5.39 - Repetitividade da média do campo U para o spray de gasolina.

Observa-se repetitividades máximas em torno de 2 m/s para o perfil U. Um erro significativo comparado aos valores do campo escalar.

Os gráficos da Figura 5.40 foram obtidos dos perfis em arcos das velocidades verticais também para as distâncias de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,00cm do orifício do injetor.

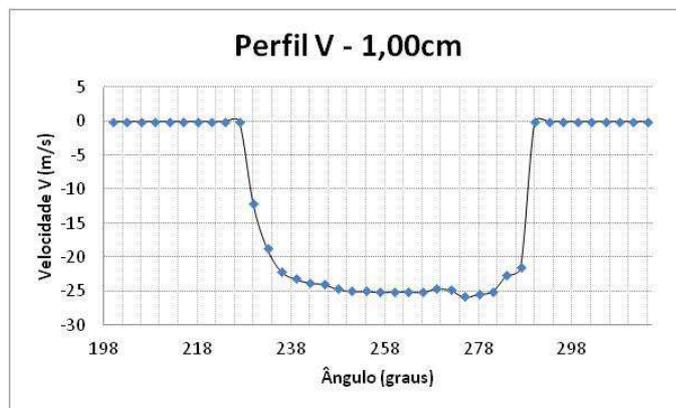
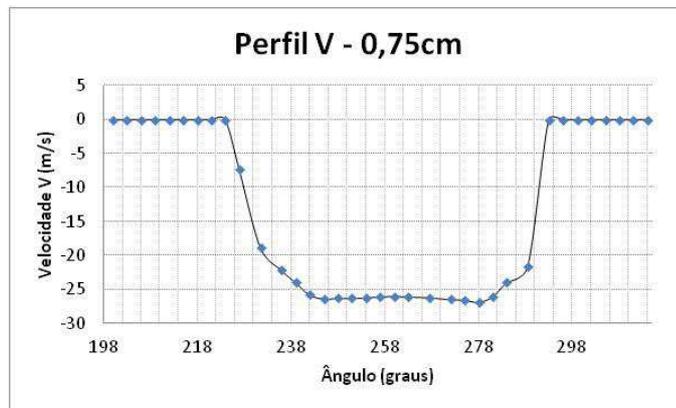
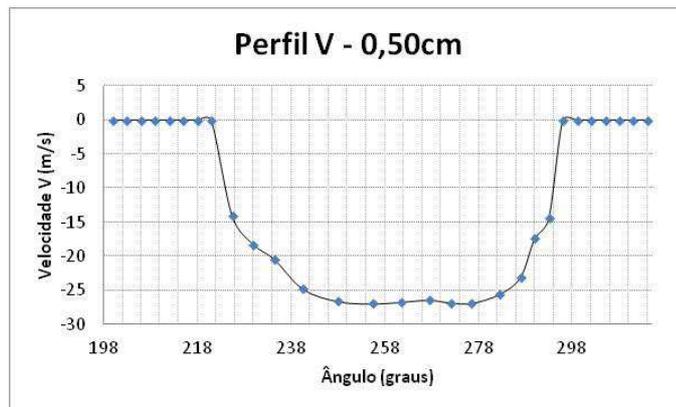
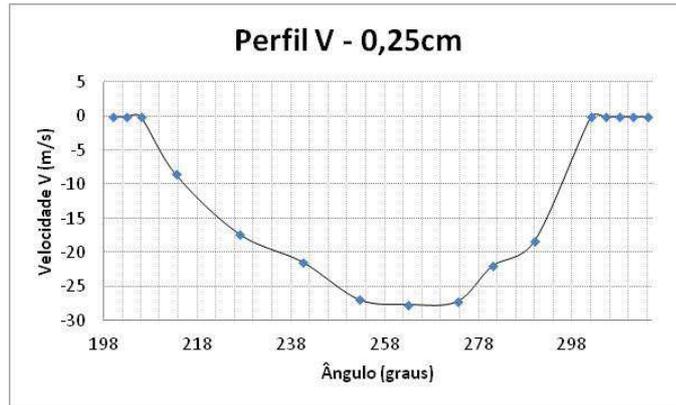


Figura 5.40 - Perfis em arcos, de velocidades horizontais para o spray de gasolina.

É perceptível, através da observação dos perfis, que a faixa de variação das velocidades horizontais e verticais em valores absolutos significativamente diferentes de zero vai se estreitando a medida que são consideradas posições mais afastadas do orifício indicando redução da faixa de ângulos onde existe a presença do fluido.

A Figura 5.41 mostra o campo escalar para a componente vertical.

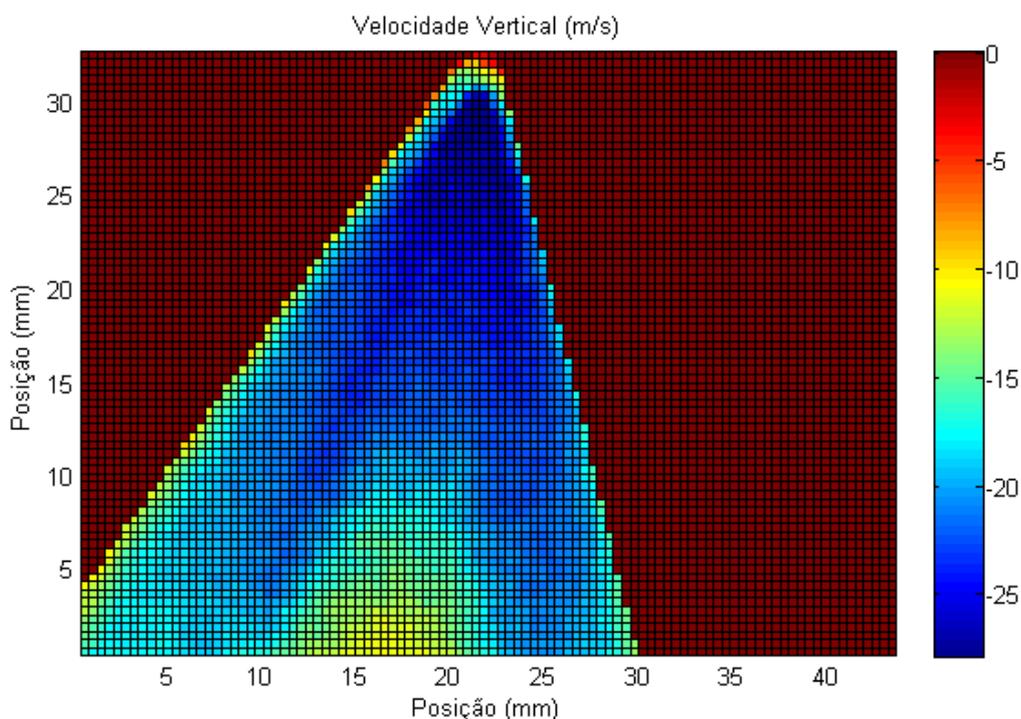


Figura 5.41 - Campo de velocidades V para o spray de gasolina.

A componente vertical da velocidade possui valores absolutos maiores nas proximidades das extremidades e nas regiões menos afastadas do orifício como pode ser verificado pela análise da Figura 5.41.

A repetitividade da média traçada para todo o domínio do campo V está na Figura 5.42.

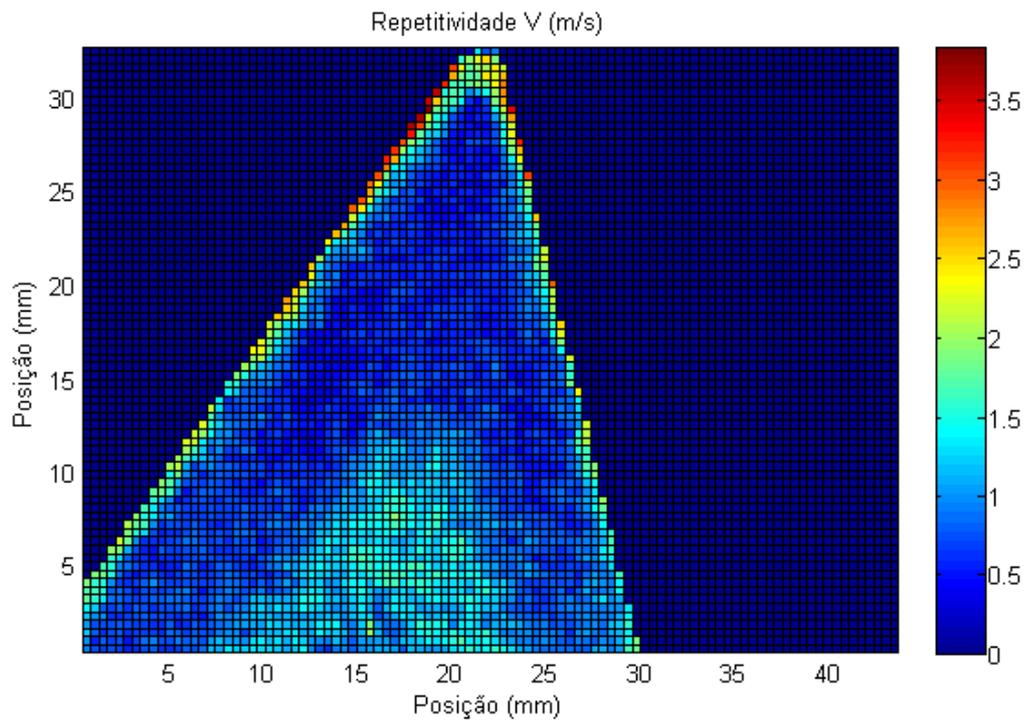


Figura 5.42 - Repetitividade da média das velocidades verticais para o spray de gasolina.

A Figura 5.42 comparada com a Figura 5.41 revela que as menores faixas de repetitividade são aparentemente coincidentes com os maiores valores absolutos da velocidade vertical e representam um percentual de erro aleatório bem menor que aquele obtido para as velocidades horizontais. Existem velocidades absolutas em torno de 25 m/s e erros típicos de 1,0 m/s

O campo vetorial da velocidade resultante com a magnitude dada pela raiz quadrada da soma dos quadrados das componentes horizontais e verticais, com gradação em cor, está representado na Figura 5.43.

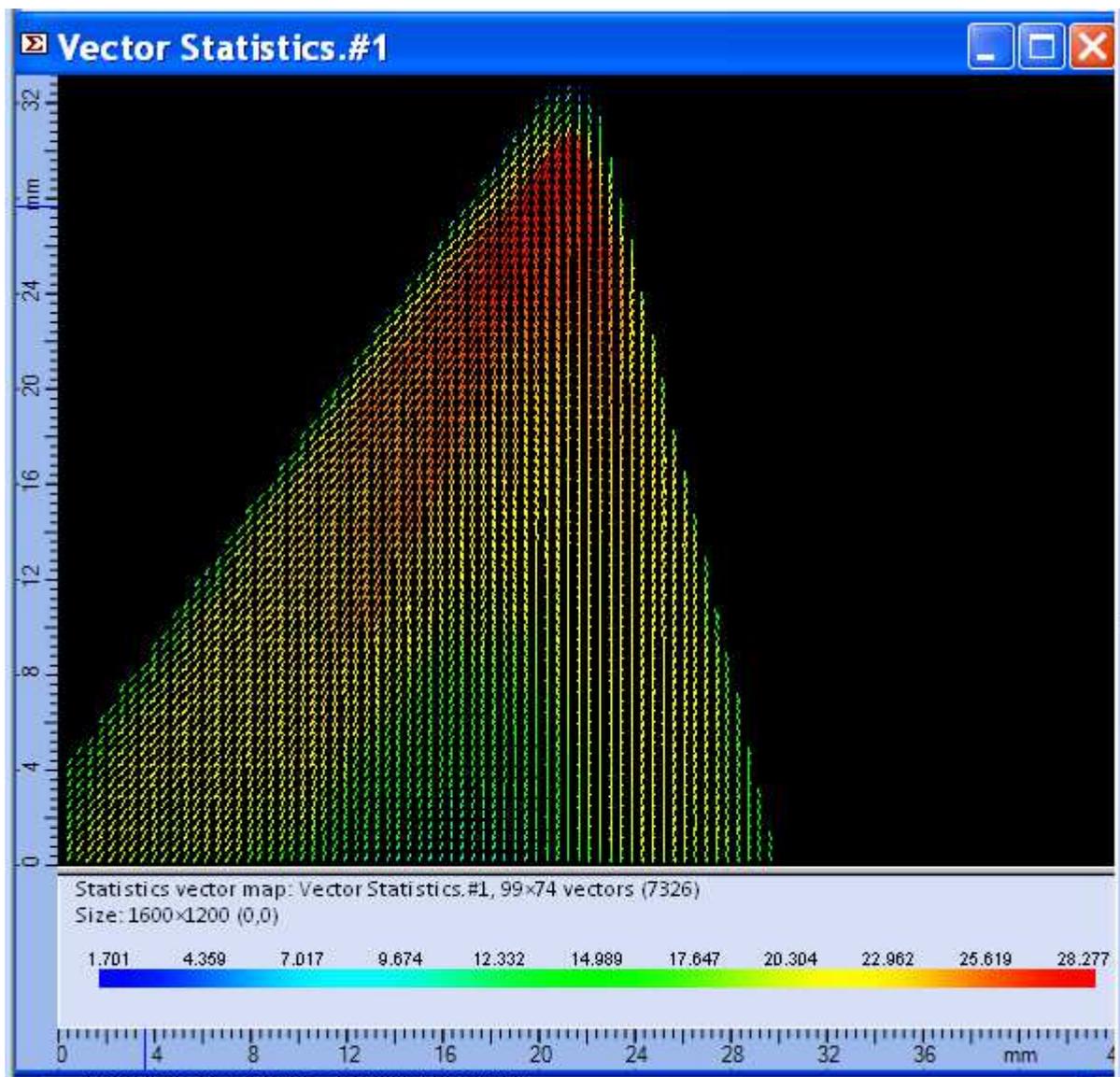


Figura 5.43 – Campo vetorial de velocidades resultante do spray de gasolina.

É nítida uma grande semelhança entre os campos vertical e resultante. A observação dos campos escalares pela escala de cores revela que a velocidade vertical tem uma influência majoritária se comparada à componente horizontal, no campo resultante.

É interessante notar que as velocidades maiores ocorrem para valores em torno de 25 m/s. Este resultado concorda com a velocidade de penetração da gasolina dada pela Tabela 5.5.

O perfil linear de velocidades do orifício até uma distância vertical de 3,0 cm com incrementos de distância de 0,05 cm está traçado no gráfico da Figura 5.44.

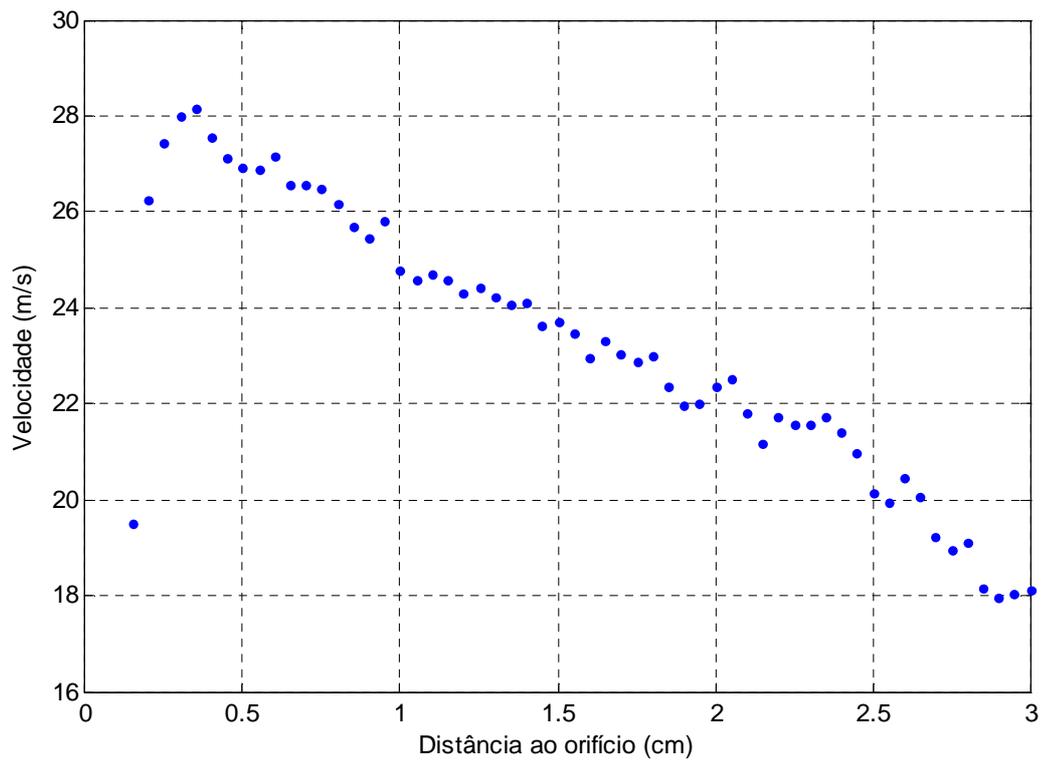


Figura 5.44 - Perfil linear do orifício até uma distância de 3,0 cm para a gasolina.

Observa-se um decréscimo da velocidade de aproximadamente 10 m/s até uma distância de 3,0 cm do orifício, o decréscimo nesta faixa é aparentemente linear.

5.9.2 Etanol

Os gráficos da Figura 5.45 mostram os perfis das velocidades horizontais para o spray de etanol em formatos de arcos centrados no orifício.

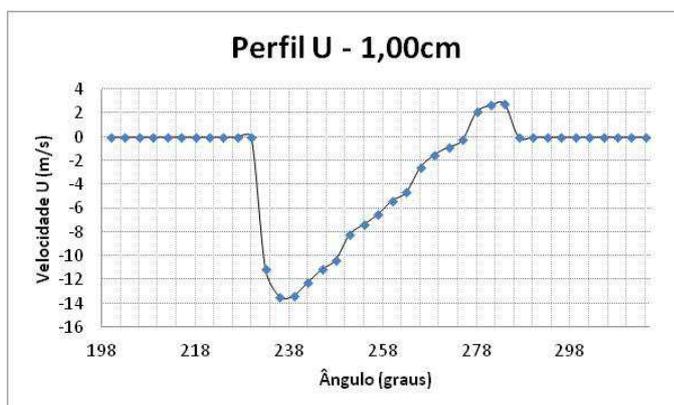
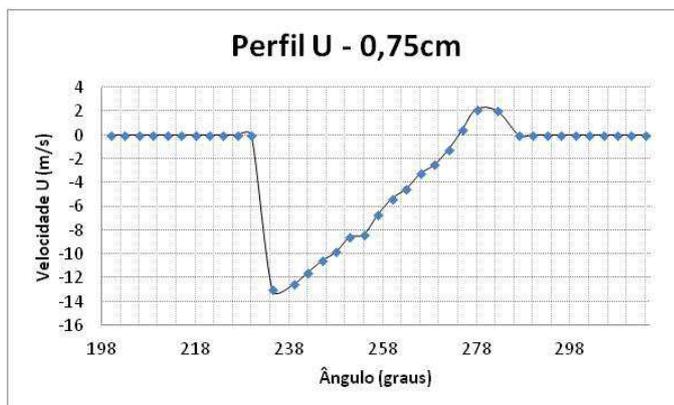
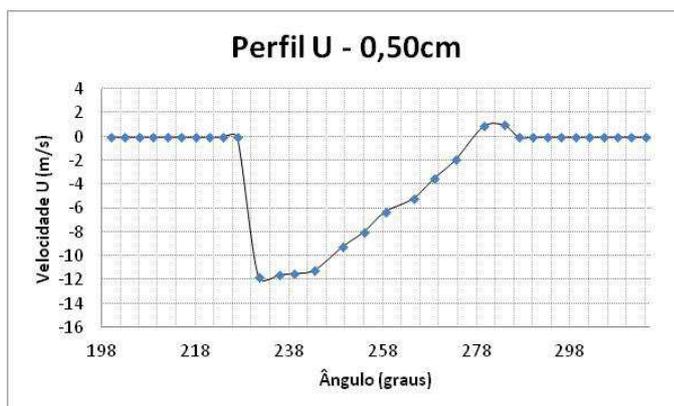
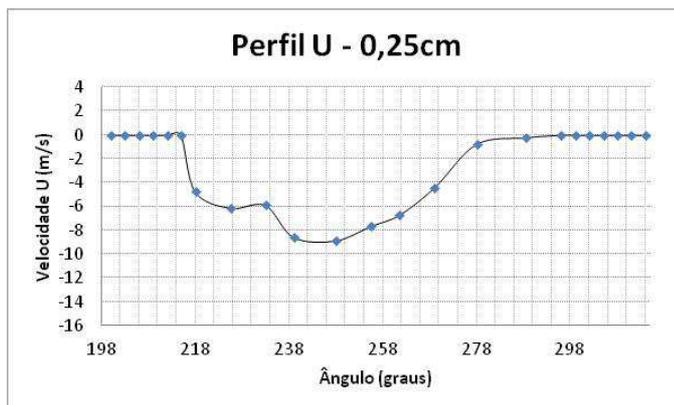


Figura 5.45 - Perfis em arcos, das velocidades horizontais para o spray de etanol.

Percebe-se novamente uma divisão dos perfis das velocidades horizontais em duas partes, uma abrangendo uma faixa maior de ângulos com velocidades negativas e uma faixa menor com velocidades positivas. O campo escalar da velocidade horizontal encontra-se na Figura 5.46.

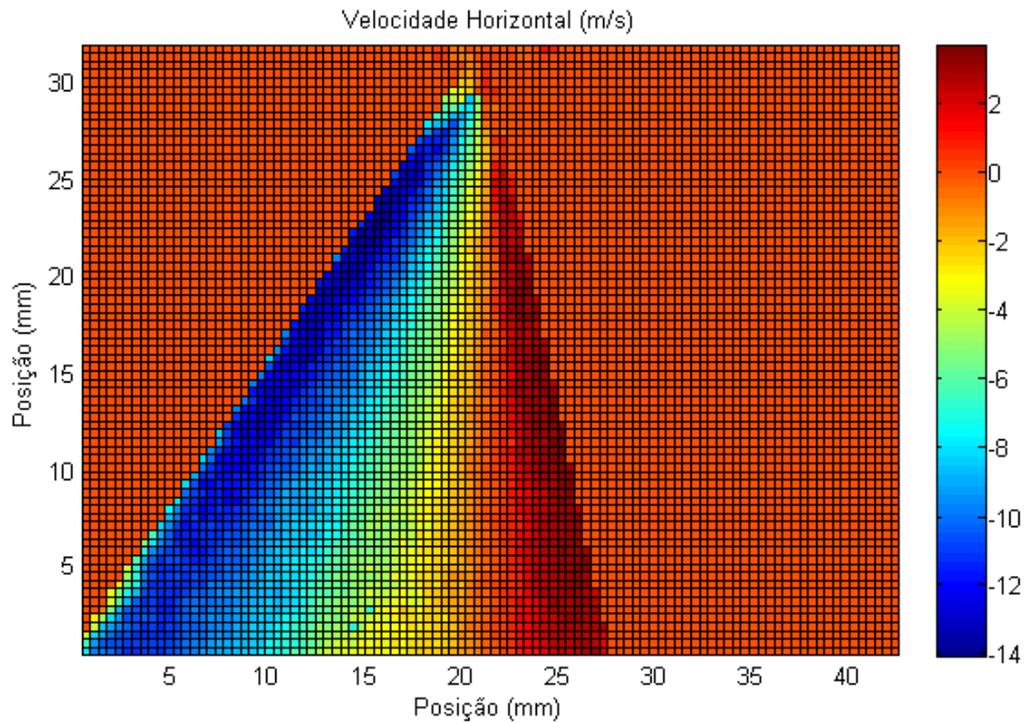


Figura 5.46 - Campo de velocidade horizontal para o spray de etanol.

O campo da Figura 5.46 é muito semelhante ao da Figura 5.38 mostrando novamente a divisão do spray em três partes, uma com velocidades negativas se deslocando para a direita, outra com velocidades próximas de 0 e outra com velocidades positivas indicando deslocamento para a direita. As repetitividades dos valores obtidos para o campo U estão na Figura 5.47.

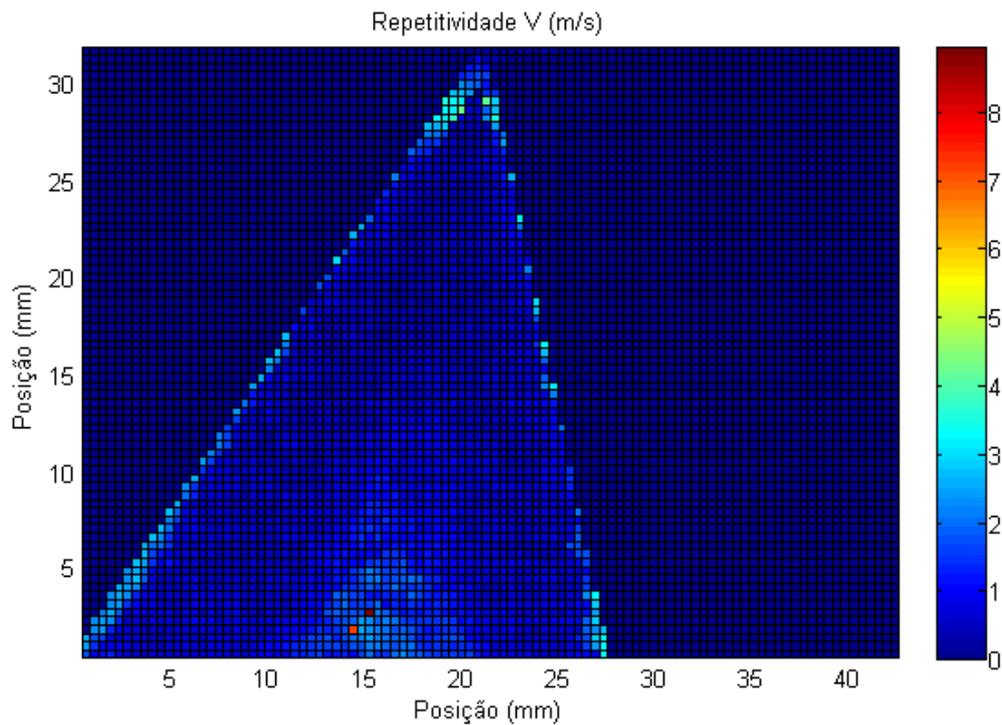


Figura 5.47 - Repetitividade da média das velocidades horizontais para o spray de etanol.

Verifica-se pela observação da Figura 5.47 que as maiores repetitividades estão situadas próximas à borda esquerda do spray com valores próximos de 2,0 e 2,5 m/s em uma região próxima aos maiores valores absolutos da velocidade horizontal que estão em torno de 12 m/s. Existe portanto, um erro aleatório relativo da média, em torno de 20%.

Os perfis das velocidades verticais em formato de arcos centrados no orifício encontram-se nos gráficos da Figura 5.48.

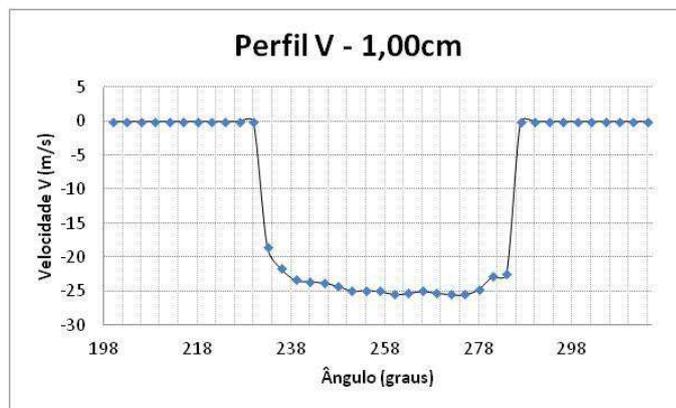
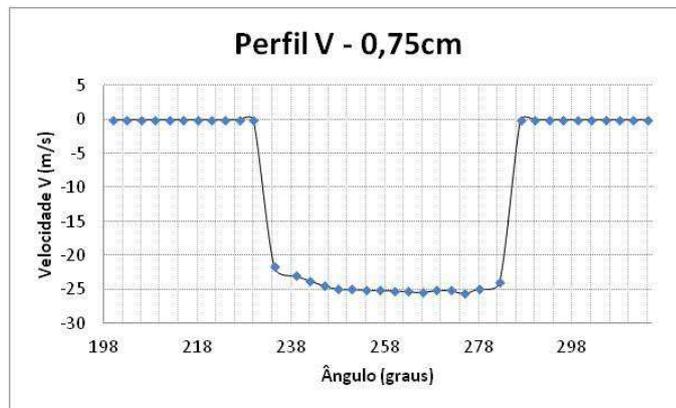
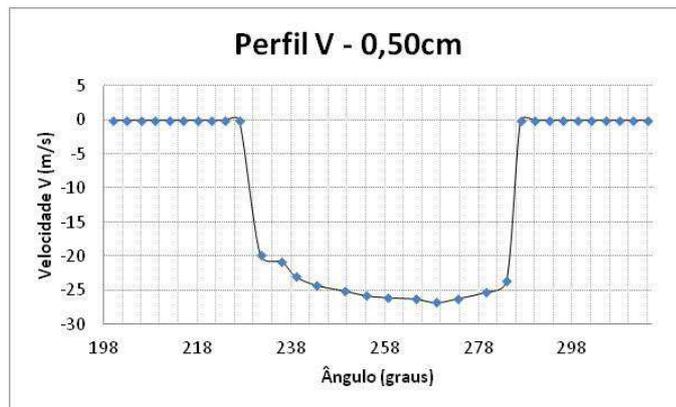
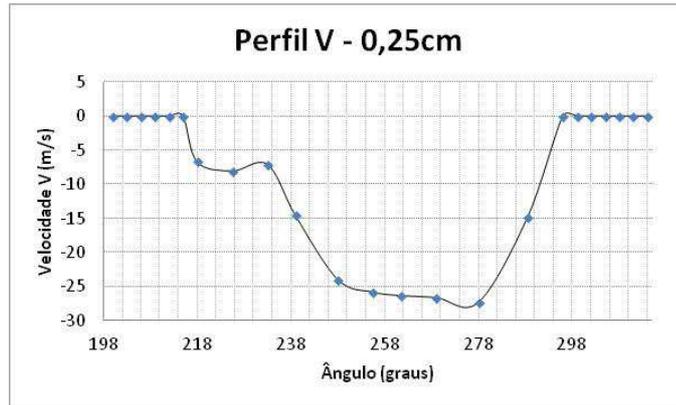


Figura 5.48 - Perfis em arcos das velocidades verticais para o spray de etanol.

Assim como observado para a gasolina ambos os perfis de velocidades horizontais e verticais do etanol possuem valores absolutos maiores que 0 em faixas de ângulos que se estreitam com o aumento da distância ao orifício considerada. Nota-se ainda que não existe um decaimento significativo da velocidade V na faixa de distância analisada. A Figura 5.49 mostra todo o campo escalar para esta componente.

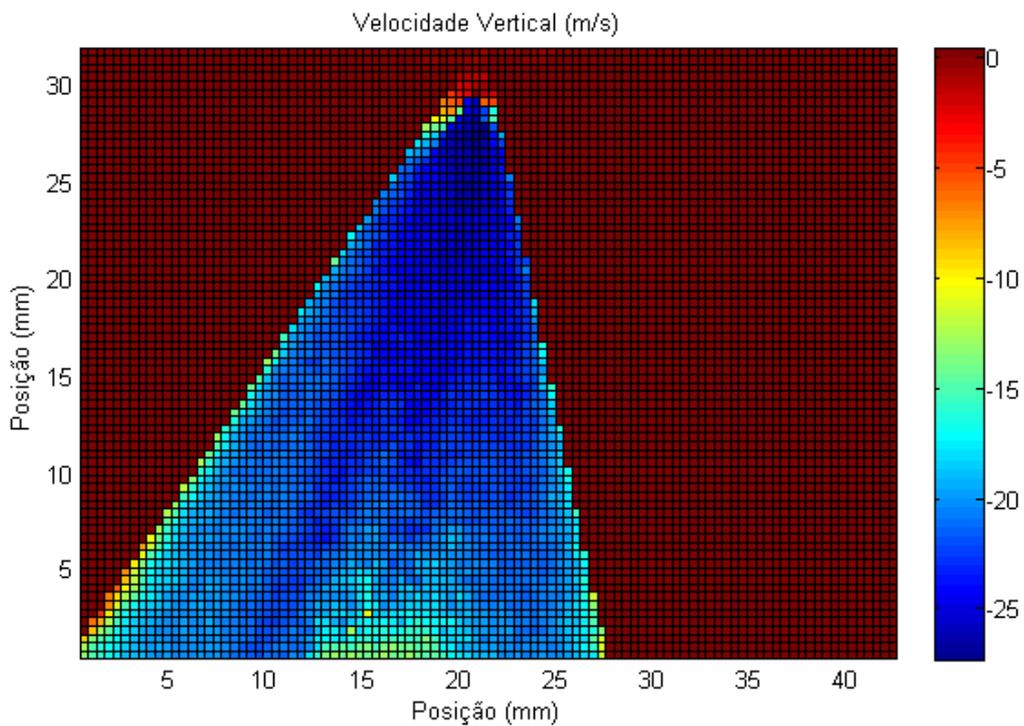


Figura 5.49 - Campo de velocidades V para o spray de etanol.

Observa-se novamente velocidades maiores próximas às bordas do spray para distâncias mais afastadas do orifício, este efeito, porém, parece ser menos significativo que aquele observado para o caso da gasolina e as diferenças entre as regiões central e a periferia parecem ser menos acentuadas. As repetitividades dos valores médios da Figura 5.49 estão mostradas na Figura 5.50.

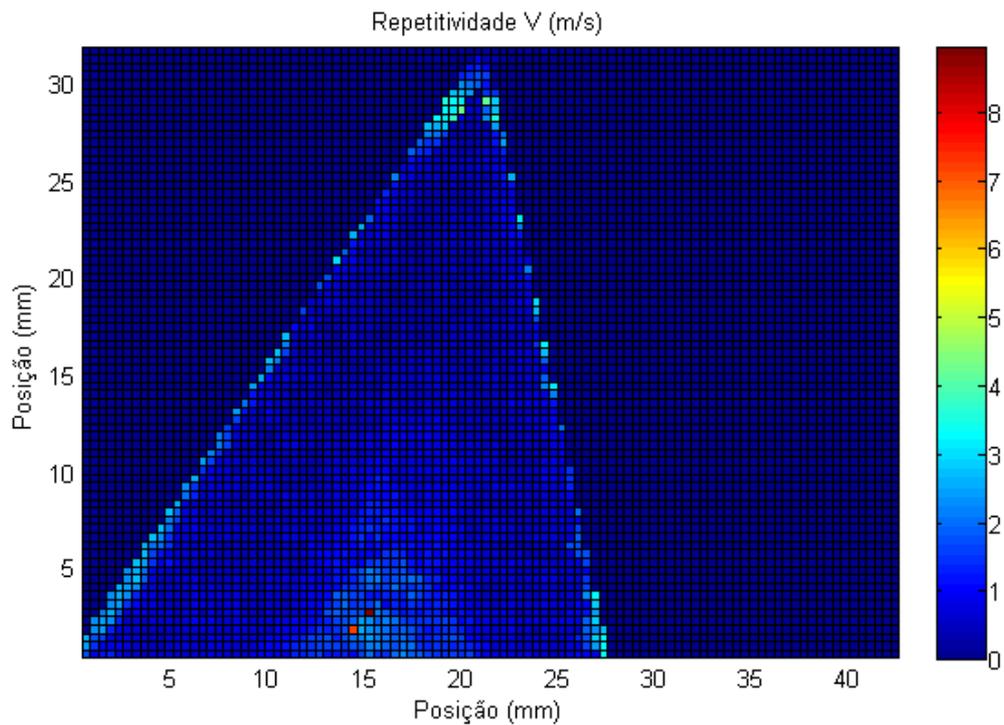


Figura 5.50 - Repetitividade da média das velocidades verticais para o spray de etanol.

Verifica-se uma certa uniformidade nos valores da repetitividade da média com valores em torno de 1,0 m/s. A tendência dos menores erros aleatórios da média acompanharem os maiores valores absolutos de velocidades é aparentemente menos significativa que no caso da gasolina.

A Figura 5.51 mostra o campo vetorial da velocidade resultante com a gradação em cores.

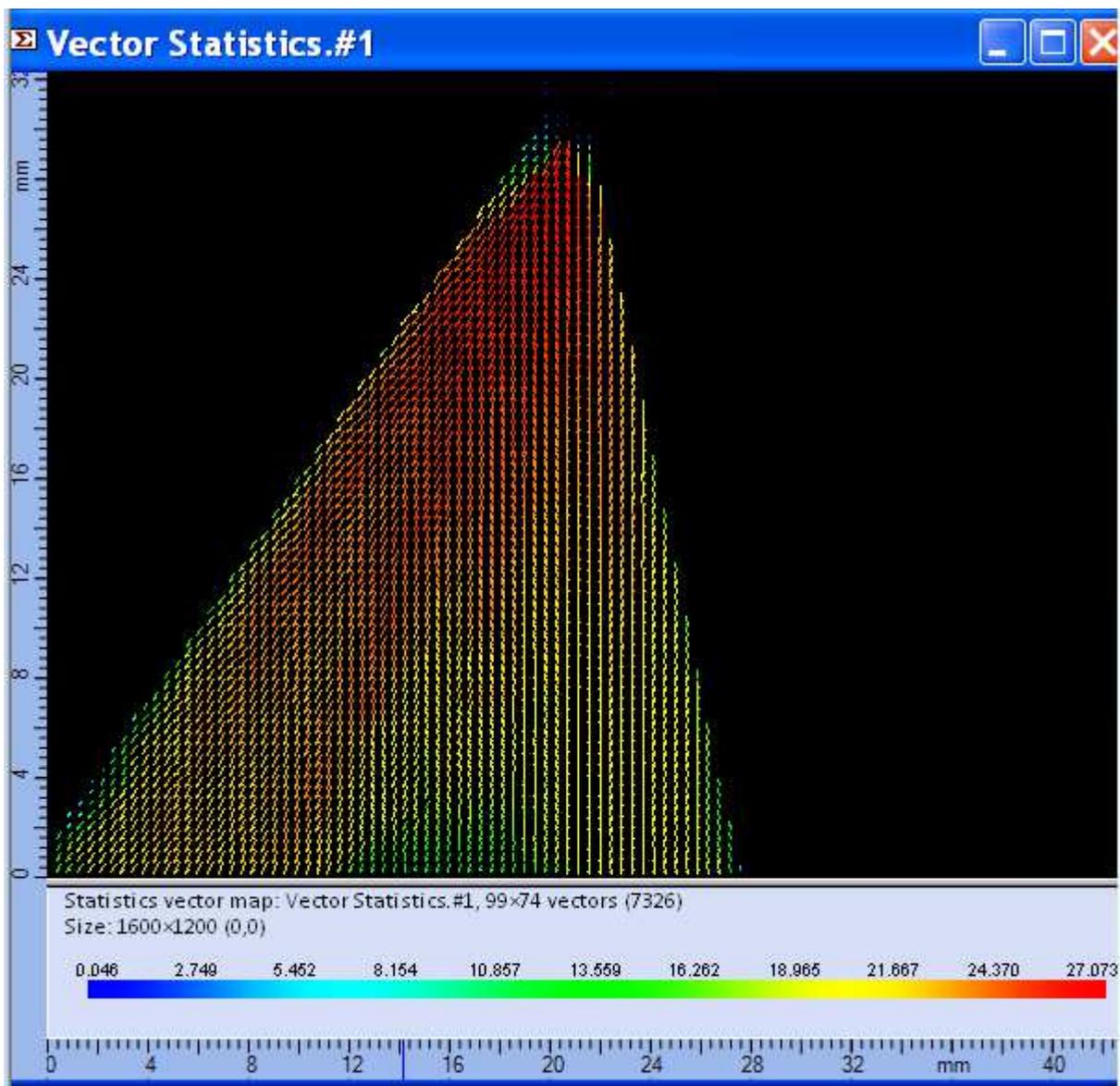


Figura 5.51 - Campo vetorial de velocidades resultante do spray de etanol.

Comparando a Figura 5.51, com a Figura 5.46 e a Figura 5.49 e considerando as respectivas escalas de cores, percebe-se que a velocidade resultante é influenciada majoritariamente pela velocidade vertical. Este resultado concorda com os resultados obtidos para as velocidades de penetração tanto pelos valores numéricos envolvidos quanto pela relativa influência das componentes vertical e horizontal.

O gráfico da Figura 5.52 mostra o perfil linear da velocidade resultante traçado verticalmente a partir do orifício até uma distância de 3,0 cm, com incrementos de 0,05 cm.

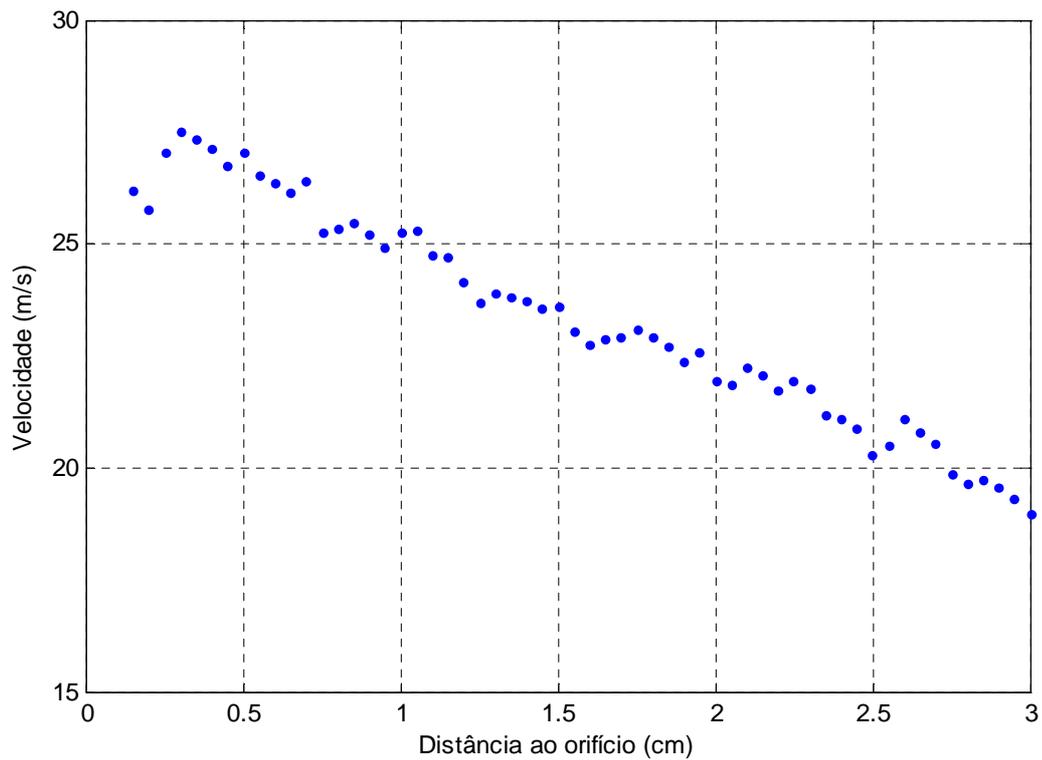


Figura 5.52 - Perfil linear do orifício até uma distância de 3,0 cm para o spray de etanol.

Assim como observado para o perfil linear vertical da gasolina existe um decréscimo aparentemente linear da velocidade do orifício até uma distância situada a 3,0 cm em uma direção vertical.

5.9.3 Água

Os perfis em formato de arcos de circunferência centradas no orifício para a velocidade horizontal do spray de água encontram-se na Figura 5.53.

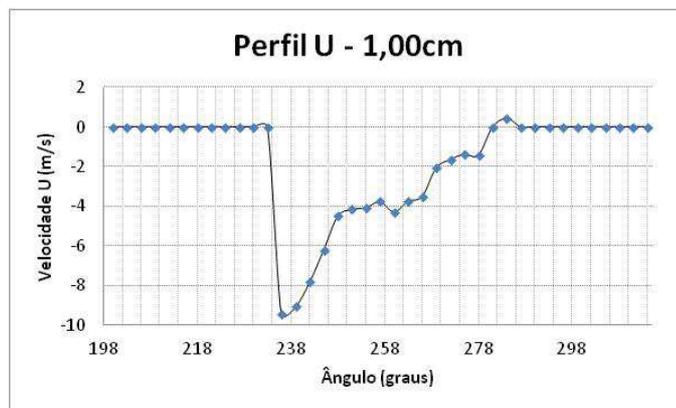
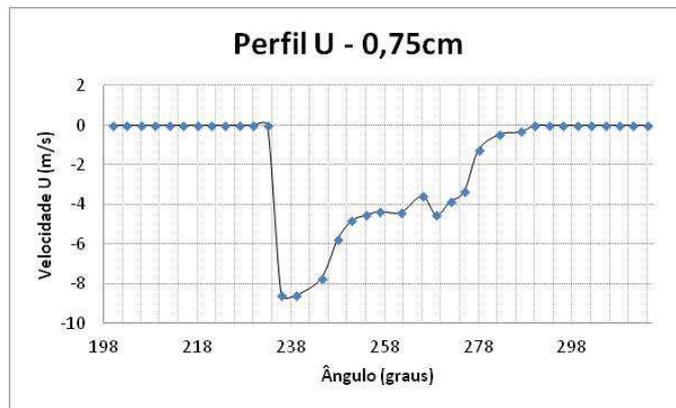
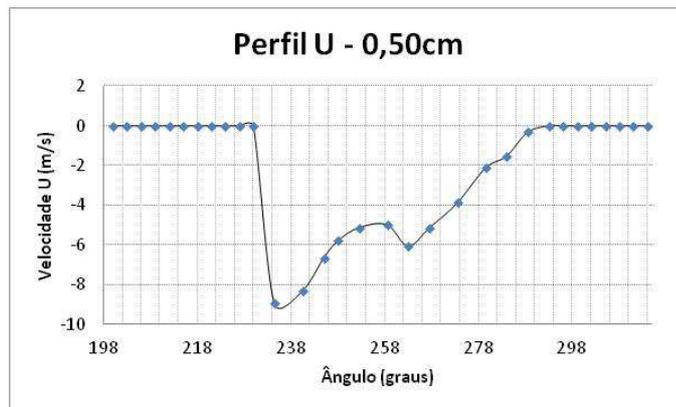
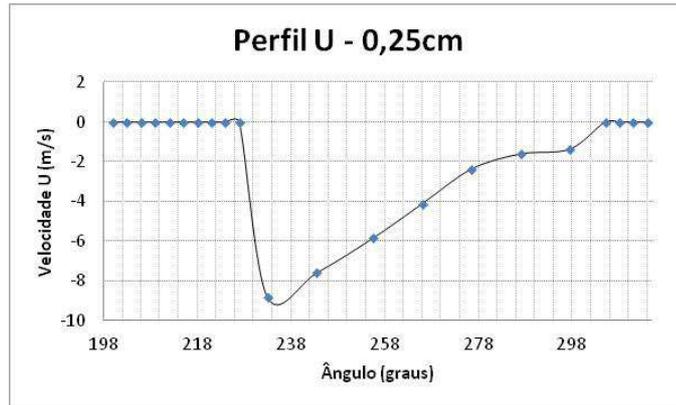


Figura 5.53 - Perfis em arcos das velocidades horizontais para o spray de água.

Os perfis obtidos para a água não demonstraram a divisão das velocidades em faixas de ângulos com velocidades positivas e negativas como foi observado nos perfis de gasolina e etanol. Os resultados parecem ser menos significativos por não possibilitarem estabelecer uma relação lógica entre o campo e a assimetria do spray. O campo escalar da velocidade horizontal encontra-se na Figura 5.54.

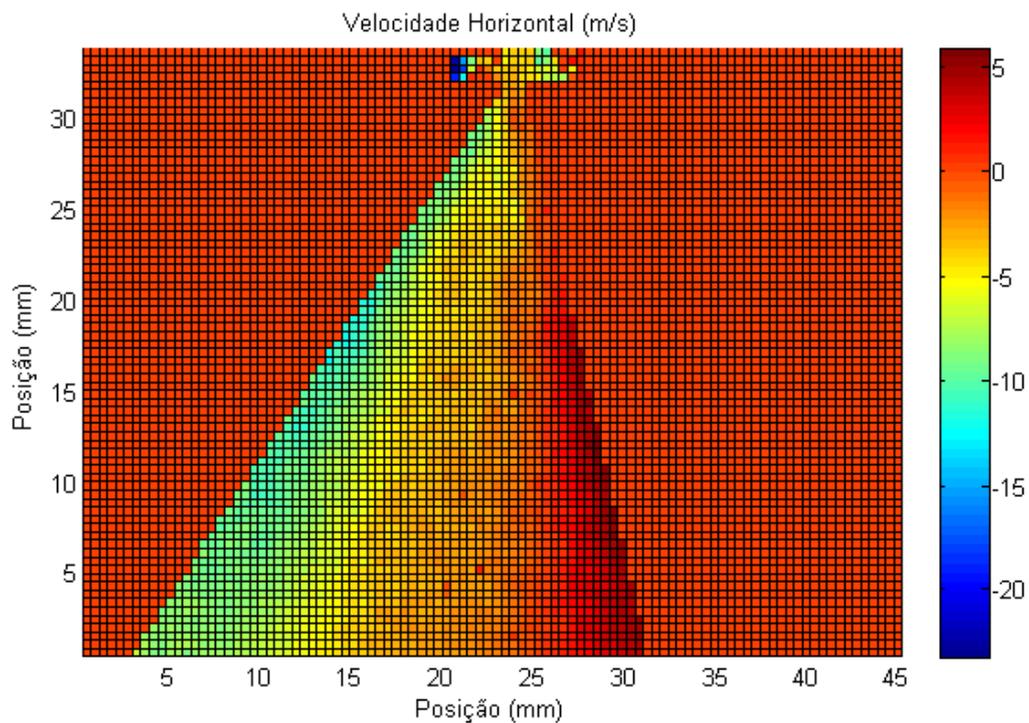


Figura 5.54 - Campo de velocidades horizontal para o spray de água.

O campo escalar da Figura 5.54 mostra que os valores positivos da componente U estão concentrados em regiões mais afastadas do orifício o que constitui uma diferença com relação aos campos obtidos para a gasolina e o etanol, que apresentaram velocidades positivas também para as regiões próximas ao orifício.

As repetitividades dos valores médios que estão na Figura 5.54 estão mostradas na Figura 5.55.

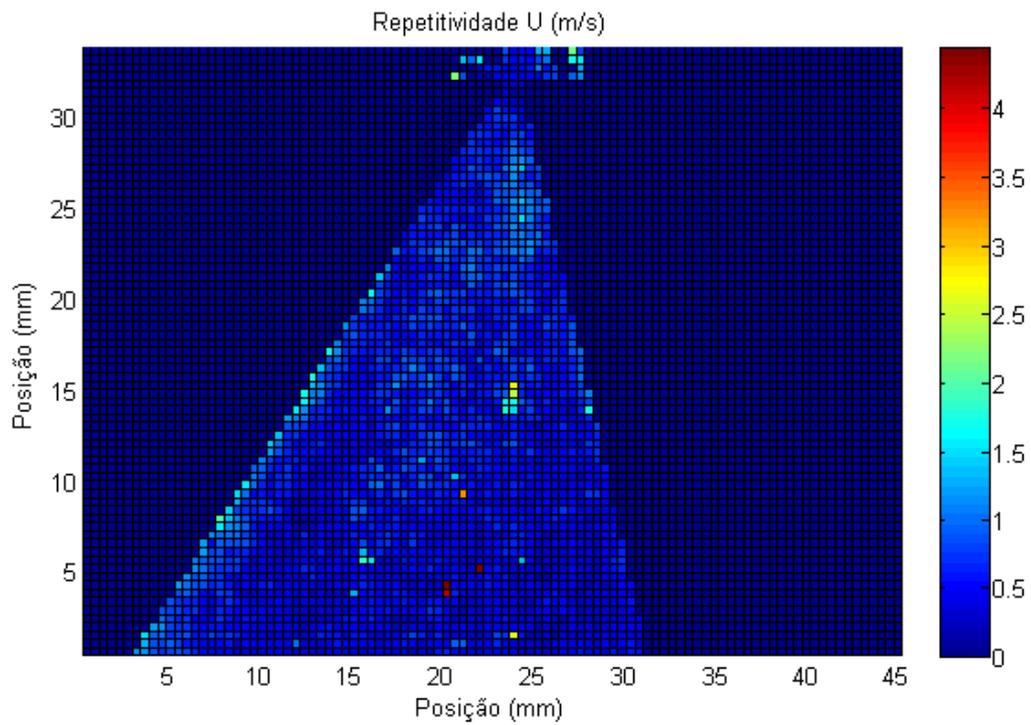


Figura 5.55 - Repetitividades da média das velocidades horizontais para o spray de água.

A Figura 5.55 mostra que os valores maiores das repetitividades da média (tons diferentes do azul) estão dispersos por toda a região do spray e aparentemente não há um padrão geral de comportamento.

Os gráficos correspondentes aos perfis de velocidades verticais em formato de arcos centrados no orifício encontram-se na Figura 5.56.

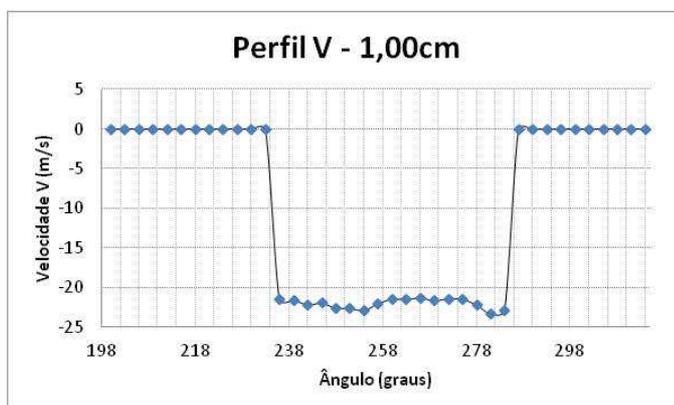
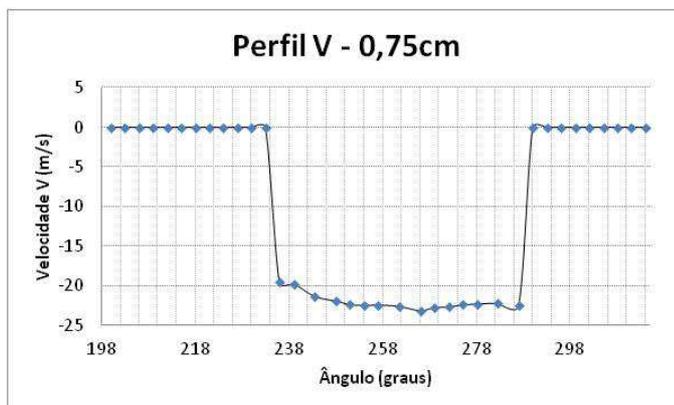
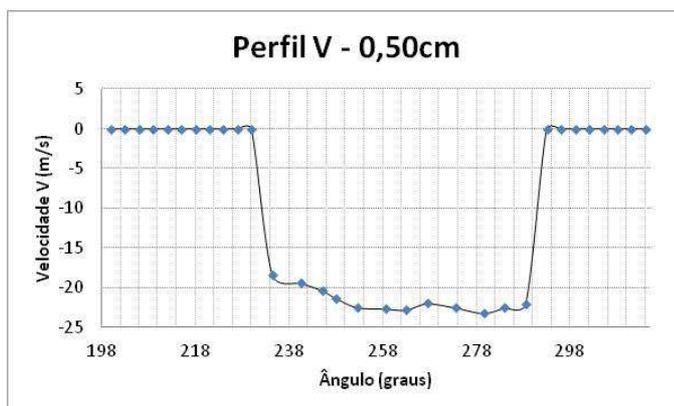
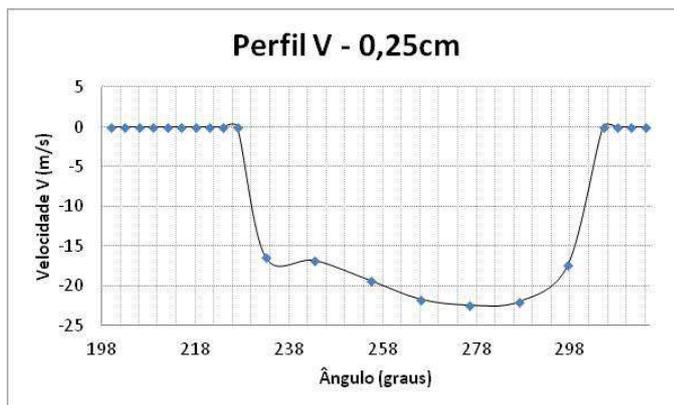


Figura 5.56 - Perfis em arcos de velocidades verticais para o spray de água.

Assim como para a gasolina e o etanol nota-se o estreitamento da faixa dos valores absolutos diferentes de zero para os perfis U e V com o afastamento do orifício indicando redução no ângulo do spray com a distância.

O campo escalar da velocidade vertical está exposto na Figura 5.57.

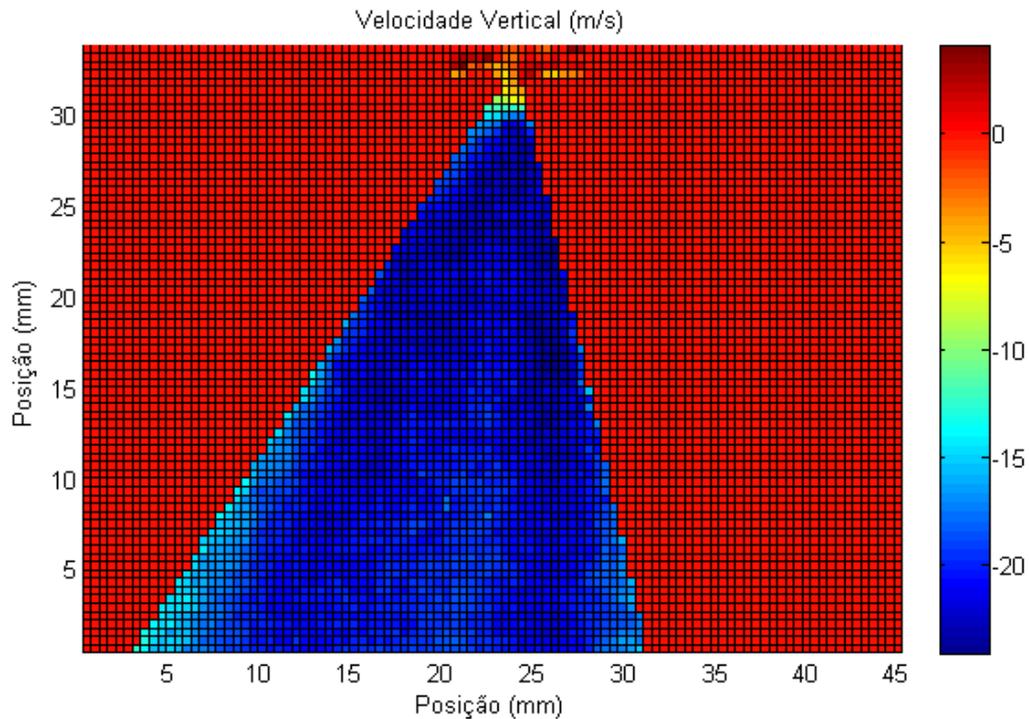


Figura 5.57 - Campo de velocidades V para o spray de água.

A Figura 5.57 mostra uma uniformidade maior da velocidade vertical em todo o domínio do spray se comparado com os respectivos campos verticais da gasolina e do etanol. Novamente observa-se que as velocidades máximas encontradas estão com boa concordância com a taxa de penetração vertical da água com valores em torno de 20 m/s.

As repetitividades dos valores médios das velocidades na Figura 5.57 estão na Figura 5.58.

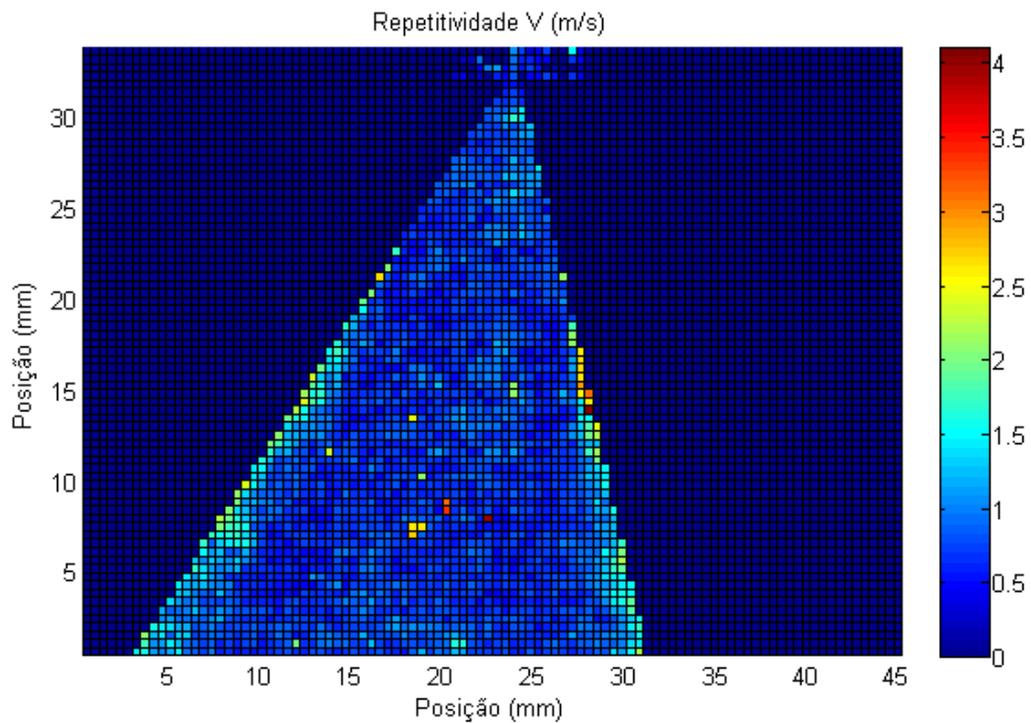


Figura 5.58 - Repetitividades das médias das velocidades verticais para o spray de água.

Existe a predominância de tons azulados dentro do domínio do spray da Figura 5.58 demonstrando valores de repetitividades da média em torno de 1 m/s e portanto há um erro aleatório relativo às médias das velocidades em torno de 5%.

A Figura 5.59 mostra o campo vetorial da velocidade resultante com gradação em cor.

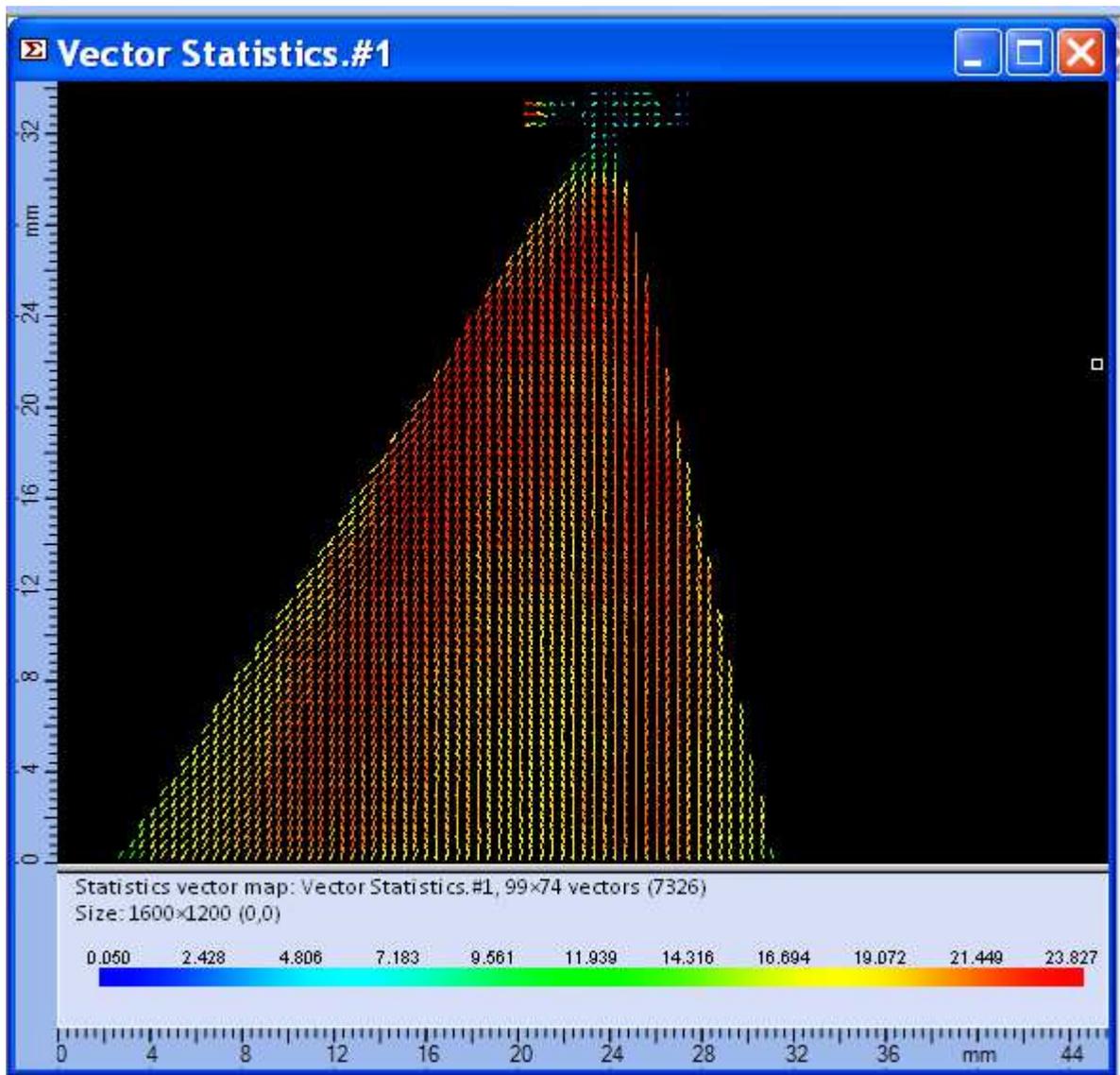


Figura 5.59 - Campo vetorial de velocidades resultante do spray de água.

Velocidades maiores próximas às bordas do spray para distâncias mais afastadas do orifício são notadas na Figura 5.59.

A própria diferença de luminosidade entre os dois pulsos consecutivos do equipamento de Laser pode ter induzido a erros nos campos de velocidades obtidos para a água. A Figura 5.59 mostra em sua parte superior, que os reflexos do Laser no próprio injetor induziram à obtenção de velocidades não nulas para aquela região. Tal resultado se mostra incoerente por não existir escoamento de fluido, ou então as velocidades medidas podem corresponder às vibrações induzidas pelas injeções no eletroinjetor.

A Figura 5.60 mostra o perfil linear vertical passando pelo orifício das velocidades resultantes.

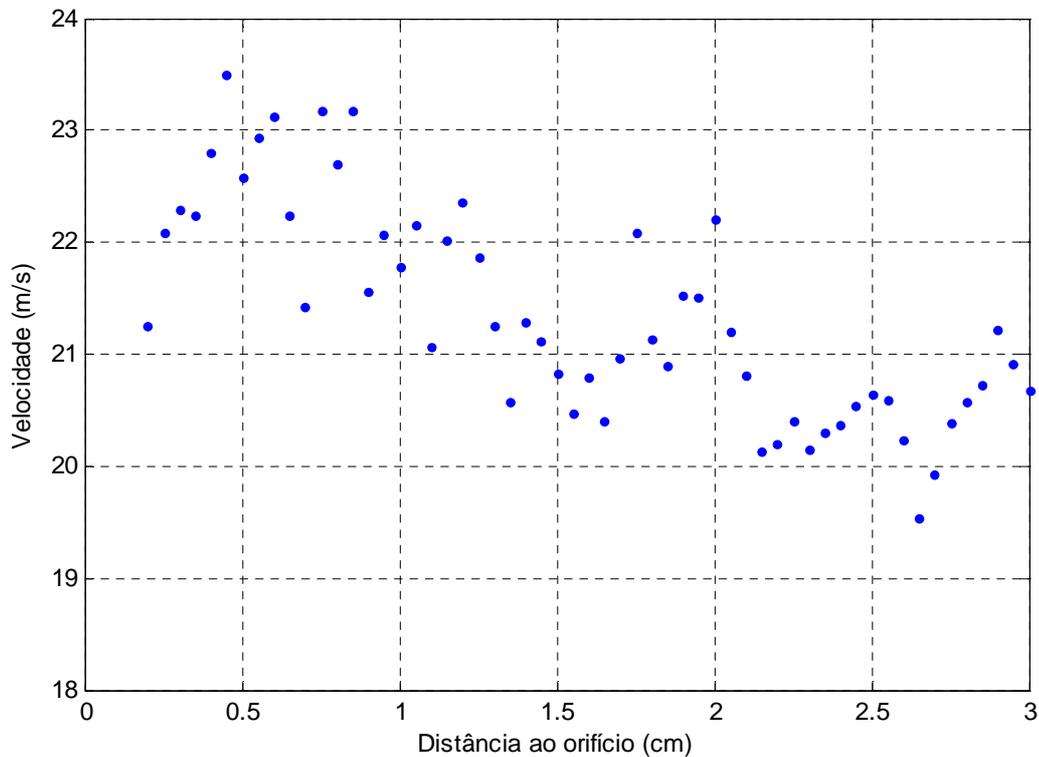


Figura 5.60 - Perfil linear do orifício até uma distância de 3,0 cm para a água.

O decaimento da velocidade em um perfil vertical a partir do orifício se mostrou menos acentuado para a água pela comparação com a gasolina e o etanol. Tal comportamento ocorreu muito em função da uniformidade maior do campo escalar da velocidade V para este fluido que é a componente que mais influencia na velocidade resultante dos sprays.

5.9.4 Considerações finais a respeito das velocidades

Houve nítida diferença entre os campos resultantes das velocidades com a velocidade obtida nos ensaios de vazão. Os ensaios de vazão mostraram uma velocidade média de saída do fluido em torno de 14 m/s. No entanto, como ponderado anteriormente, este valor se refere a um valor hipotético uniforme de velocidade de saída do fluido do orifício em um escoamento contínuo, caso não existissem gradientes de velocidades por toda a área do

orifício. Seria então razoavelmente possível a existência de velocidades maiores que 20 m/s no orifício do injetor.

A Figura 5.61 mostra, por exemplo, o spray de etanol em um momento próximo ao início da saída do fluido do orifício.

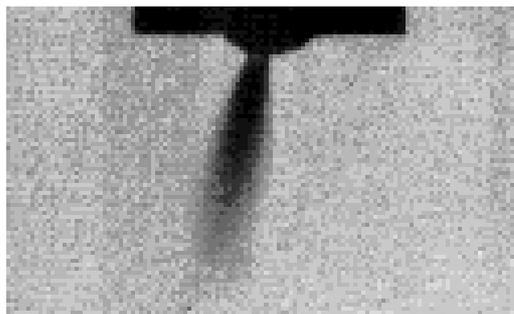


Figura 5.61 - Início da injeção do spray de etanol.

O fluido ejetado do orifício da Figura 5.61 possui um núcleo central mais escuro com uma forte curvatura. Esta observação é um forte indício da existência de elevados gradientes de velocidades na saída do fluido através do orifício.

Além disso, a obtenção das informações referentes às velocidades pela técnica PIV se deu em uma seção de área longitudinal do spray cônico. Portanto, não foram obtidas informações sobre todo o seu volume e assim, a suposição de simetria longitudinal, pode não ser válida.

Para os testes com PIV, foi simulada uma rotação de 2400 rpm onde o injetor alternava 25 milissegundos com injeção de spray e outros 25 milissegundos sem injeção. Para os testes de vazão com água, também foi simulada uma rotação de 2400 rpm. No entanto, os períodos de alternância entre abertura e fechamento do injetor foram de 10 milissegundos e 40 milissegundos respectivamente.

Outra hipótese para a diferença encontrada poderia ser um período de transiência da vazão volumétrica durante o período de injeção cuja consequência seria uma velocidade média bem diferente daquela correspondente ao instante específico de medição da velocidade pela técnica PIV.

A análise dos valores numéricos encontrados, porém, revela que as velocidades máximas obtidas estão próximas de 25 m/s para os três fluidos testados, o que demonstra boa concordância com as taxas de penetrações totais obtidas.

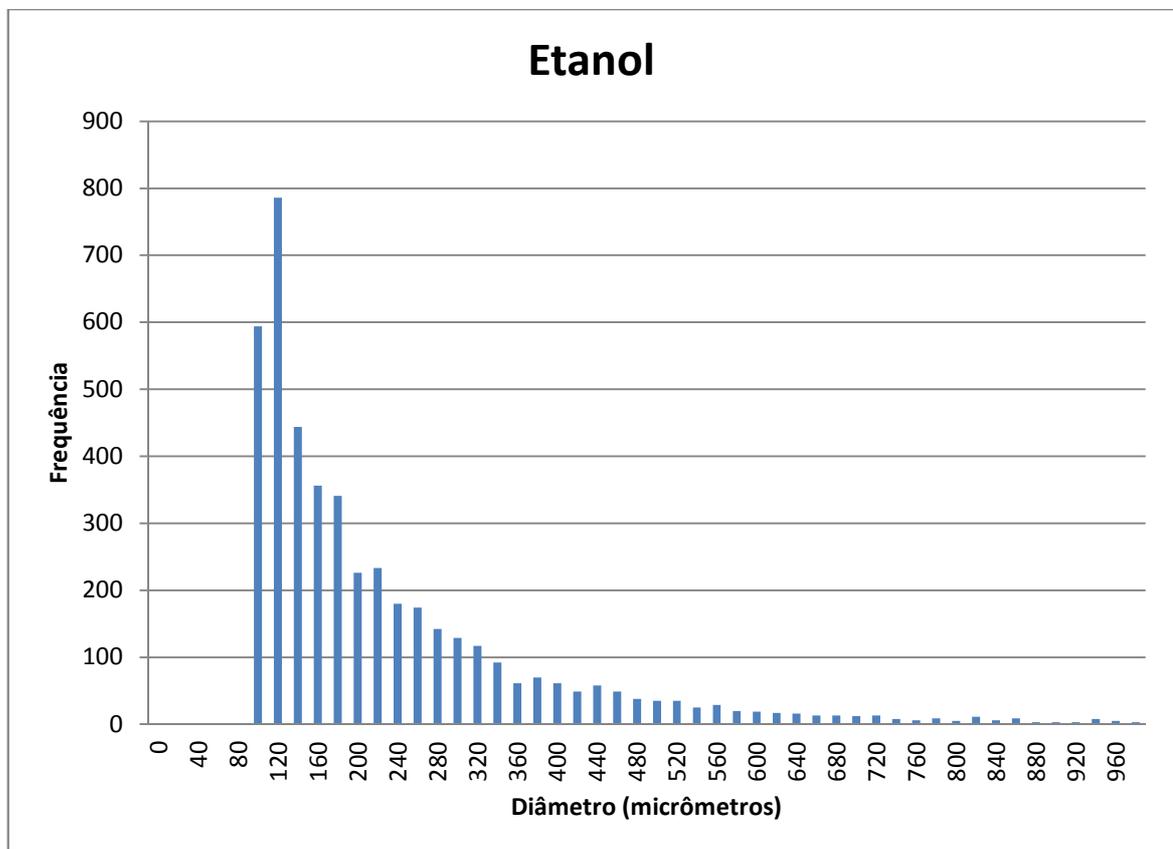
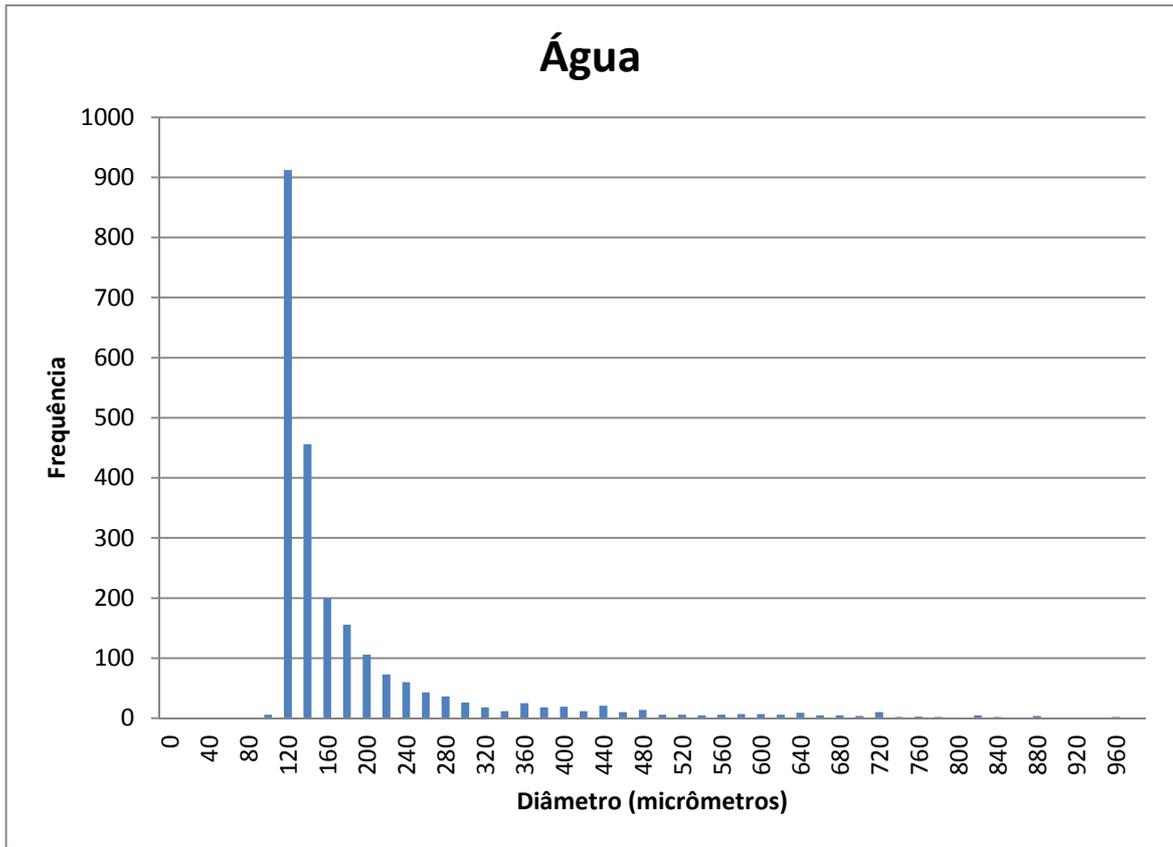
As taxas de penetrações obtidas se referem ao deslocamento máximo do fluido no início da injeção e, portanto, servem como uma estimativa da velocidade máxima do fluido ejetado do injetor.

É provável a existência de regiões do spray de jato líquido em que o fluido não se encontra totalmente desintegrado em gotículas. A técnica PIV é usualmente utilizada para a avaliação de velocidades de partículas, portanto, podem ser inadequadas as estimativas das velocidades nas regiões onde a quebra do jato não tenha ocorrido e tais estimativas podem ter induzido a erros nos valores das velocidades.

As metodologias de análise aqui adotadas para o estudo de velocidades permitem o aprofundamento do conhecimento do processo de injeção dos sprays. No entanto, elas são dependentes da aquisição de dados por uma infraestrutura experimental relativamente complexa.

5.10 Estimativas para o Diâmetro das Gotículas

Os histogramas referentes às estimativas do diâmetro das gotículas dos sprays estão nos gráficos da Figura 5.62.



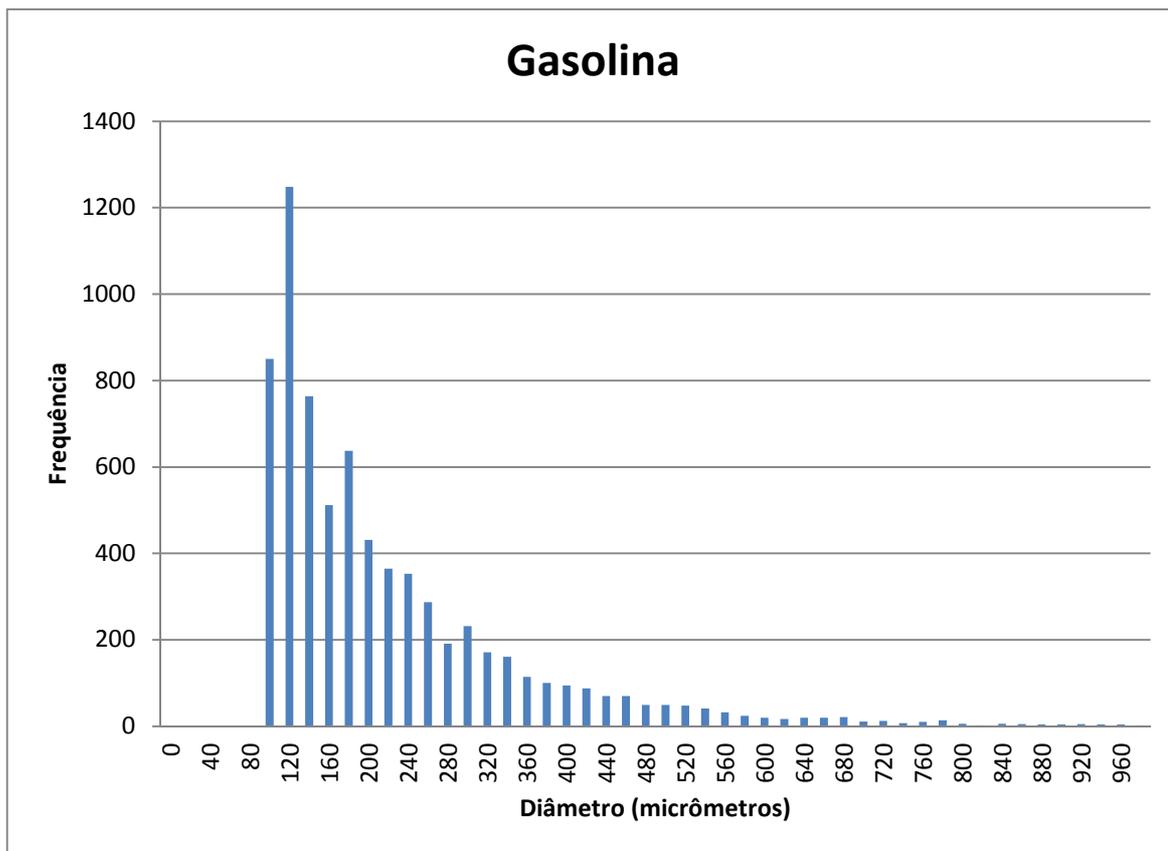


Figura 5.62 - Histogramas referentes ao tamanho de gota dos sprays.

Observa-se nítida semelhança no formato geral dos histogramas. No entanto existe uma frequência maior de gotículas com tamanhos maiores para os sprays de gasolina e etanol e um decaimento mais suave no comportamento da frequência na direção crescente dos maiores diâmetros.

A Tabela 5.6 mostra os diâmetros médios obtidos.

Tabela 5.6 - Diâmetros médios obtidos do processamento PIV.

Fluido	D10 (µm)	D20 (µm)	D30 (µm)	D32 (µm)	D43 (µm)
Água	189,19	226,08	278,61	423,12	570,43
Etanol	229,16	275,64	327,41	461,97	585,21
Gasolina	220,23	259,19	302,76	413,08	527,83

Os diâmetros médios exibidos como resultados na Tabela 5.6 mostraram diferenças não muito significativas entre os três fluidos testados. Particularmente o Diâmetro Médio de Sauter, D32, é explicado em LEFEBVRE (1989) como um parâmetro influenciado

pela quantificação de dois efeitos: o primeiro $D32_1$ pela geração de instabilidades na superfície geradas pelas interações hidrodinâmicas e aerodinâmicas e o segundo $D32_2$ pela conversão da superfície em ligamentos e em seguida gotículas. Estes dois efeitos estão quantificados na Equação 5.13.

$$D32 = D32_1 + D32_2 \quad (5.13)$$

A magnitude de $D32_1$ depende parcialmente do número de Reynolds que fornece uma medida das forças de desintegração do jato líquido e do número de Weber na forma da Equação 5.14.

$$\frac{D32_1}{D} \propto (Re \times \sqrt{We})^{-x} \quad (5.14)$$

O efeito de $D32_2$, no entanto é dependente apenas do número de Weber. A relação de proporcionalidade correspondente é dada na Equação 5.15.

$$\frac{D32_2}{D} \propto (We)^{-y} \quad (5.15)$$

A Tabela 5.7 mostra os valores das expressões entre parênteses das relações de proporcionalidades anteriores. Foram utilizados os valores da Tabela 5.2 para a obtenção da segunda e terceira colunas.

Tabela 5.7 - Adimensionais relacionados aos testes.

Fluido	$Re \times \sqrt{We}$	We
Gasolina	$3,05 \times 10^5$	$3,61 \times 10^3$
Etanol	$3,60 \times 10^5$	$3,95 \times 10^3$
Água	$3,36 \times 10^5$	$1,51 \times 10^3$

A diferença relativa entre os números de Weber da água com os combustíveis testados e a proximidade entre os valores da segunda coluna da Tabela 5.7 sugerem maior influência da primeira parcela da soma do lado direito da Equação 5.13 se as constantes de proporcionalidade e os parâmetros x e y das Equações 5.14 e 5.15 forem próximos. Desta forma, as interações aerodinâmicas e hidrodinâmicas dos sprays com o ar, possuem influência mais significativa no mecanismo de formação das gotículas.

A Figura 5.63 e a Figura 5.64 mostram os histogramas de duas regiões diferentes do spray de água.

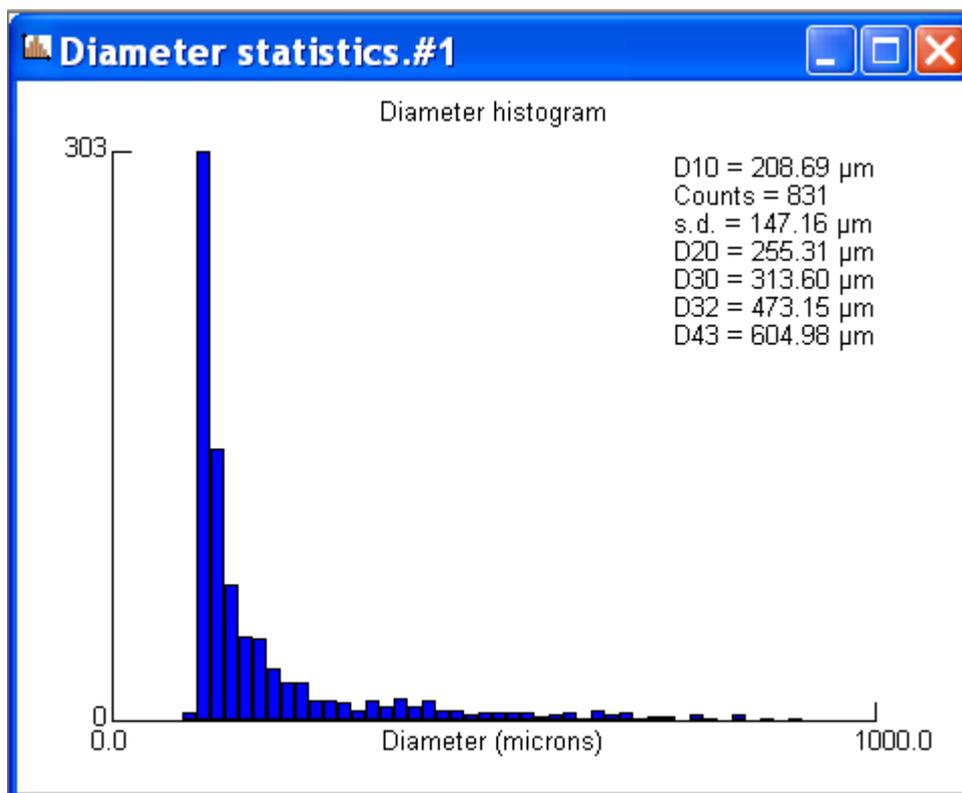
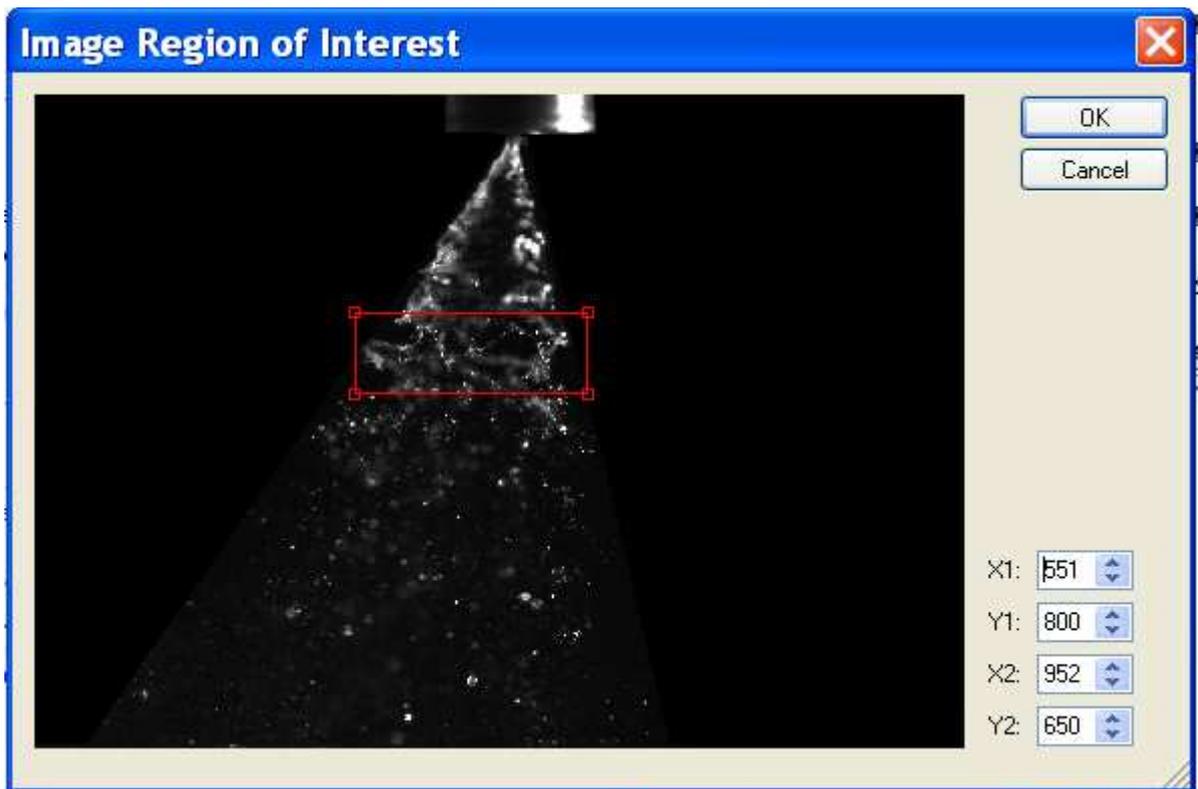


Figura 5.63 - Histograma de diâmetros referente a uma região mais próxima do orifício do injetor para o spray de água.

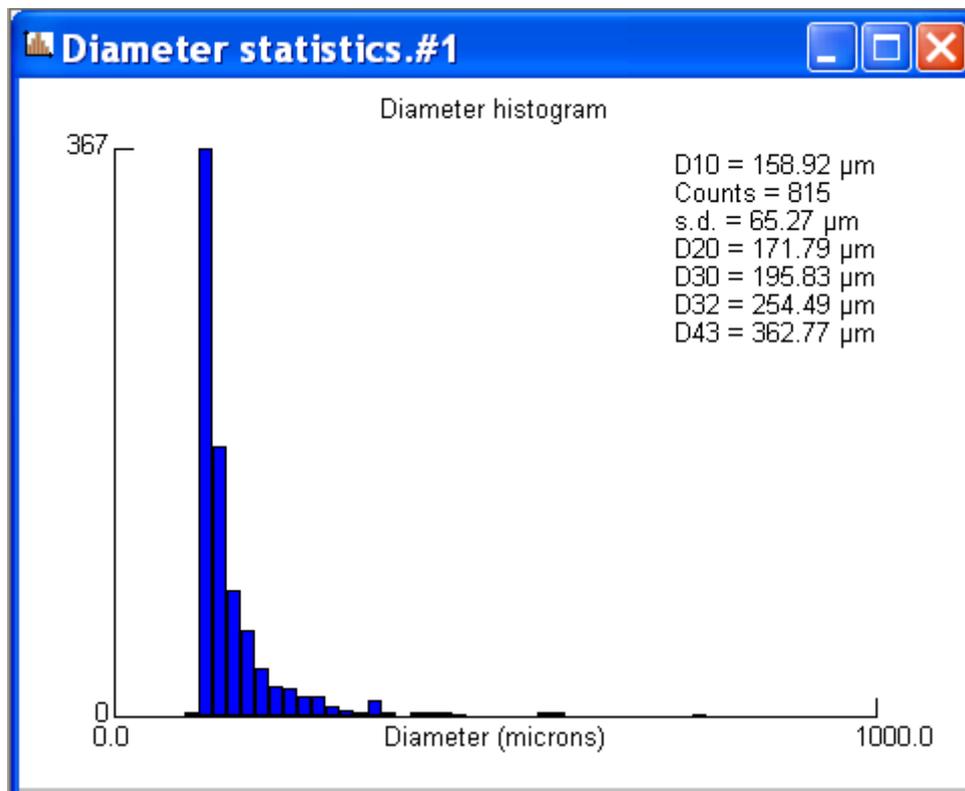
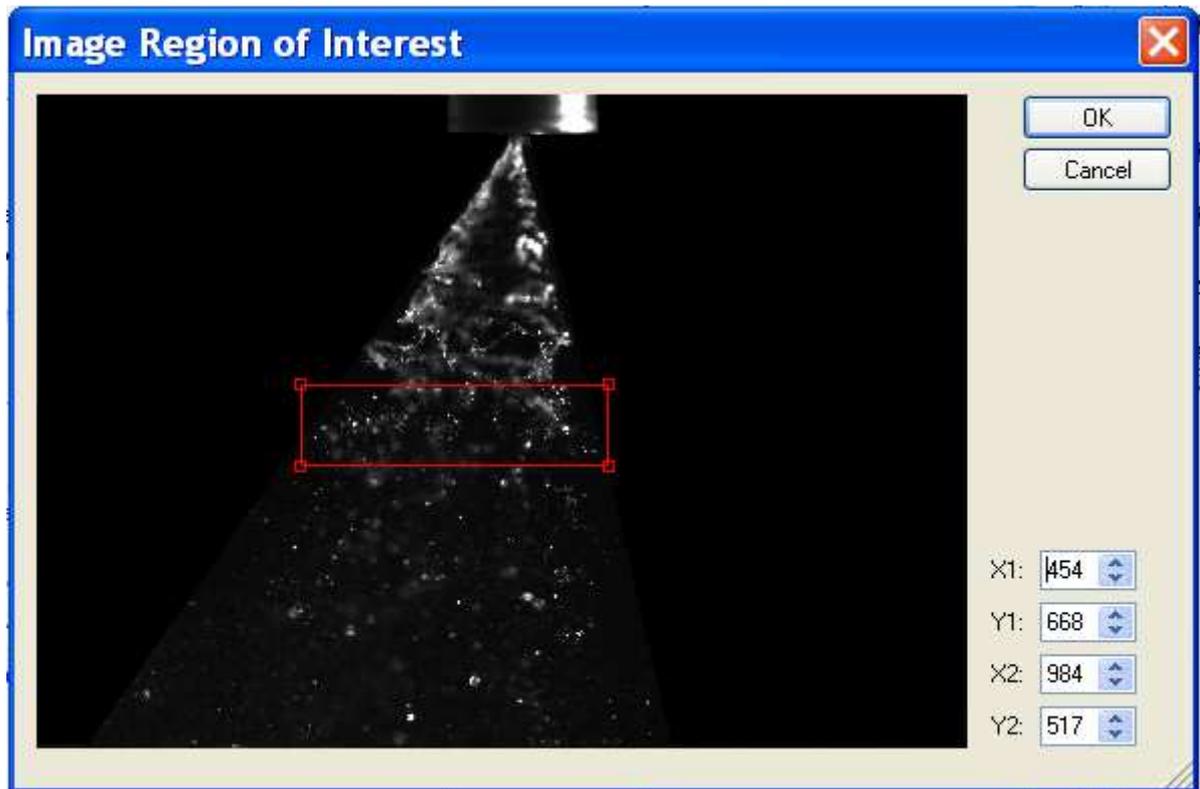


Figura 5.64 - Histograma de diâmetros referente a uma região mais afastada do orifício do injetor para o spray de água.

A comparação da Figura 5.63 com a Figura 5.64 revela uma diminuição do tamanho das gotículas com o afastamento do orifício para todos os diâmetros avaliados. Esta observação está coerente com as explicações de LEFEBVRE (1989) e BAUMGARTEN (2006) sobre a quebra dos sprays em duas etapas, a primeira mais próxima ao orifício gerando gotículas maiores e a segunda através de desintegração subsequente em gotículas menores.

A análise de tamanhos de gotas por um processamento através da técnica PIV não é a mais adequada. Existem atualmente técnicas mais avançadas para a medição de tamanho de partículas que também utilizam tecnologia não intrusiva. Uma metodologia de análise baseada em técnicas mais apropriadas possibilitaria uma análise mais significativa.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a proposição e a aplicação de métodos de análises no estudo dos sprays cônicos obtidos por um injetor de injeção direta. Análises referentes à quantificação e caracterização de parâmetros importantes tais como ângulo de cone, comprimento de quebra, as penetrações, os diâmetros das gotículas e os campos de velocidades foram aqui realizadas.

Uma abordagem matemática com a definição de uma função e um sistema de referência possibilitou a localização das bordas dos sprays utilizando a matriz dos valores dos pixels das imagens. Tal procedimento foi seguido por um método de medição de ângulos que levou em consideração as dificuldades comumente encontradas na obtenção deste parâmetro devido às curvaturas existentes nas bordas. Os resultados mostraram ângulos maiores para a gasolina, ângulos menores para a água e valores intermediários para o etanol combustível. As análises das imagens obtidas por PIV revelam a dependência deste parâmetro com as propriedades dos fluidos. Não houve, no entanto, diferenciação significativa entre o etanol e a água através do mesmo processamento nas imagens tratadas dos sprays da shadowgrafia associada à filmagem a alta velocidade. No entanto, as imagens obtidas por shadowgrafia passaram por um prévio tratamento. Este fato que pode ter influenciado nos resultados obtidos. As bordas dos sprays também foram construídas em coordenadas cartesianas, o que possibilitou a medição dos ângulos através das inclinações das retas ajustadas aos dados.

As informações referentes à localização das bordas também foram utilizadas na metodologia empregada na obtenção do comprimento de quebra dos sprays. O procedimento utilizado baseou-se na observação da dispersão da luminosidade nas imagens. Os desvios médios dos valores dos pixels em arcos centrados no orifício e confinados entre as fronteiras externas dos sprays foram obtidos para os três fluidos testados e revelaram um comportamento geral similar. Os resultados obtidos por uma análise estatística mostraram comprimentos de quebra da ordem de 0,62 cm para a água, 0,67 cm para o etanol combustível e 0,78 cm para a gasolina. Verificou-se ainda intersecção das faixas de valores para o etanol e gasolina coerentes com as proximidades dos adimensionais Reynolds e Weber para os ensaios com estes fluidos.

As penetrações foram obtidas através da medição do deslocamento máximo e deslocamento vertical dos sprays, os deslocamentos horizontais correspondentes foram

obtidos através de cálculos. As taxas das penetrações foram calculadas pelas derivadas do ajuste linear aos dados, revelando um maior valor para a gasolina, menor valor para a água e um valor intermediário para o álcool combustível. Os valores das taxas ficaram entre 20 e 25 m/s e serviram como estimativas para as velocidades máximas dos sprays.

Os diâmetros das gotículas foram obtidos através da seleção de uma área do spray e o processamento foi realizado com o software do equipamento de laser. Não ocorreram diferenças significativas nos valores dos diâmetros médios encontrados, porém, as distribuições nos histogramas apresentaram pequenas diferenças ao ser comparados gasolina e etanol com a água. A seleção de duas áreas no spray de água sugere mecanismos de quebras em etapas, com gotículas maiores mais próximas ao orifício e gotículas menores em regiões mais afastadas.

Os campos de velocidades foram determinados através de Velocimetria por Imagens de Partículas. As velocidades máximas resultantes obtidas pela técnica PIV ficaram entre 25 – 30 m/s enquanto para os ensaios de vazão foi calculado um valor de (14 ± 2) m/s como velocidade média de saída do fluido através do orifício. A discrepância entre as velocidades obtidas por PIV e ensaios de vazão sugere fortes gradientes de velocidades do fluido através da área do orifício. Houve boa concordância entre os campos obtidos com as taxas de penetrações. Além disso, pelo fato das velocidades terem sido determinadas somente para uma seção longitudinal, não são conhecidos os comportamentos das velocidades por todo o volume do spray e não se sabe se a suposição de simetria longitudinal é válida. As velocidades obtidas por PIV ocorreram para um instante específico da injeção de modo que um período transiente significativo durante a abertura do injetor dificultaria a comparação das velocidades no instante específico com a velocidade média obtida nos ensaios.

As estratégias de análises empregadas neste trabalho demonstraram constituir ferramentas capazes de gerar resultados para o aprofundamento e melhor entendimento dos conhecimentos relativos aos sprays cônicos da injeção direta. Vale ressaltar, porém, que muitas condições operacionais dos testes não corresponderam àquelas encontradas na câmara de combustão dos motores à gasolina e, portanto, o direcionamento do trabalho ocorreu no sentido de estabelecer metodologias de análises e na verificação da validade das estratégias empregadas.

7 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, são sugeridas as aplicações das metodologias aqui empregadas para testes que consigam reproduzir com maior fidelidade as condições de injeção dentro da câmara de combustão, como por exemplo, as pressões de trabalho do injetor, as condições de temperaturas e as pressões ambientes onde o combustível é injetado.

Outra forma de avançar o entendimento do fenômeno em estudo seria a utilização de técnicas mais avançadas para a medição do diâmetro das gotículas para a melhor compreensão do mecanismo de quebra dos sprays em etapas. A técnica PIV não é a ferramenta mais adequada na avaliação do tamanho de partículas.

Análises dimensionais também poderiam ser realizadas para a obtenção de correlações que estimem parâmetros importantes relacionados aos sprays.

Estudos envolvendo simulação numérica das injeções e a comparação dos resultados com aqueles gerados através das estratégias aqui empregadas também constituem em uma boa alternativa para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBERTAZZI, A.; SOUZA, A. R. Fundamentos de metrologia científica e industrial. Barueri, SP: Manole, 2008. 408 p.
- ALEIFERIS, P. G.; PEREIRA, J. S.; ROMUNDE, Z. V.; CAINE, J.; WIRTH, M. Mechanisms of spray formation and combustion from a multi-hole injector with E85 and gasoline. *Combustion and Flame* 157, p. 735-756, 2010
- AZEVEDO E.; CONCI, A. Computação gráfica: geração de imagens. Rio de Janeiro: Elsevier, 2003. 353 p.
- BAUMGARTEN, C. *Mixture formation in internal combustion engines*. Germany: Springer, 2006. 294 p.
- CHENGLI, Z.; XUEZHANG, H.; ZHIQIANG, S. Application Research on Digital Image Technology in the Measurement of Spray Cone Angle. *IEEE*, 2011.
- CONCI, A.; AZEVEDO, E.; LETA, F. R. Computação gráfica: teoria e prática. Rio de Janeiro: Elsevier, 2008. v. 2.
- DANTEC DYNAMICS. Measurements Principles of PIV. Disponível em: <http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=1049>. Acesso em: 18 de jul. 2012.
- DING, H.; HUANG, D.; HUANG, R. Experiment Study On Spray Structure Of A Multi-Hole GDI Injector. *IEEE*, 2011.
- DING, N.; GAO, W.; CHEN, M.; ZHANG, X. Spray characteristics of new generation multi-hole injector for spark-ignition gasoline with direct fuel injection. *International Conference on Information Engineering*, *IEEE*, 2010.
- FRANÇA, J. L.; VASCONCELLOS, A. C.; Manual para normalização de publicações técnico-científicas. 8 Ed. Belo Horizonte: UFMG, 2009. 258 p.
- GANESAN, V. *Internal Combustion Engines*. New York: McGraw Hill, Inc., 1995. 540 p.
- HEYWOOD, John B. *Internal combustion engines fundamentals*. New York: McGraw-Hill, Inc., 1988. 930 p.

- LEFEBVRE, A. H. *Atomization and Sprays*. USA: Taylor & Francis, USA, 1989. 416 p.
- LIDE, D. R. *Handbook of chemistry and physics*. 84th Ed. CRC Press, 2004. 2474 p.
- LU PEI, JUNTAO Y, HU JI. Measuring on Spray Angle of Shower Nozzle Based on Embedded Image Processing System. IEEE, 2009.
- MÜLLER, S. H. R.; BÖHM, B.; GLEIBNER, M. Flow fuel measurements in an optically accessible, direct-injection spray-guided internal combustion engine using high-speed PIV. *Exp Fluids*, p 281-290, 2010.
- PARK, S. H.; KIM, H. J.; SUH, H. K.; LEE, C. S. 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* (30), p. 1182-1192, 2009.
- PARKER, A. Como funcionam os motores de injeção direta. Disponível em: <http://carros.hsw.uol.com.br/motores-de-injecao-direta.htm>. Acesso em: 18 de jul. 2012.
- RAFFEL, M.; WILLERT, C.; WERELEY, S.; KOMPENHANS, J. *Particle Image Velocimetry: a practical guide*. 2 Ed. Germany: Springer, 2007. 448 p.
- SETTLES, G. S. *Schlieren and shadowgraph techniques: visualizing phenomena in transparent media*. 2 Ed. Germany: Springer, 2006. 376 p.
- SHAFARAEI, M.; BANITABAEI, S. A.; ASHJAEI, M.; ESFAHANIAN, V. Effect of flow conditions on spray cone angle of a two-fluid atomizer. *Journal of Mechanical Science and Technology* 25 (2), p. 365~369, 2011.
- SHAO, J.; YAN, Y. Digital Imaging Based of Diesel Spray Characteristics. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Sorrento, Italy 2006.
- ZHAO, F.; HARRINGTON, D. L.; LAI, M. C. *Automotive gasoline direct-injection engines*. USA: SAE, 2002. 352 p.
- ZIGAN, L. SCHMITZ, I.; FLÜGEL, A.; TOBIAS, K.; WENSING, M. LEIPERTZ, A. Effect of fuel properties on spray breakup and evaporation studied for a multi-hole direct injection spark ignition injector. *Energy Fuels* (24), p. 4341-4350, 2010.

APÊNDICE 1 – Rotina para a análise de uma única imagem (ângulo externo)

```
clear all
B = input('Nome do arquivo da imagem com spray ');
R11 = input('Distância do orifício do eletroinjeter (cm) ');
R1 = R11*361.54; %R1 é a distância em pixels
B1 = imread(B);
i = 31; % i e j são as posições na matriz onde se encontra o vértice do
cone
j = 779;
k=0;
E=B1;%E vai ser a matriz que será exibida como resultado.
F=B1;
a=0;
dx=double(0);

for teta = 43*pi/36:pi/720:7*pi/4 %Variação de ângulo de 215 a 315 graus
    k=k+1;
    x1(k)=B1(round(i+R1*(-sin(teta))),round(j+R1*cos(teta)));
    xreal(k)=double(x1(k));
    angulo3(k)=teta*(180/pi);
    E(round(i+R1*(-sin(teta))),round(j+R1*cos(teta)))=255;
    if k>=2
        dx(k)=(xreal(k)-xreal(k-1))/((pi/720)*R1);
    end

    if abs(dx(k))>=15 & a==0
        angulo1=teta;
        a=1;
    end

end
b=0;
for m = k:-1:1
    teta2 = 43*pi/36+m*(pi/720);
    if abs(dx(m))>=15 & b==0
        angulo2=teta2;
        b=1;
    end
end
%Vetor para o cálculo do desvio padrão
l=0;
for n = angulo2:(angulo1-angulo2)/35:angulo1
    l=l+1;
    x2(l)=B1(round(i+R1*(-sin(n))),round(j+R1*cos(n)));
    F(round(i+R1*(-sin(n))),round(j+R1*cos(n)))=255;
end
figure
plot(angulo3,x1,'.')
grid on
xlabel('Ângulos');
ylabel('Valores dos Pixels');
figure
plot(angulo3,dx,'.')
ylabel('Valores da Função');
xlabel('Ângulos');
```

```
grid on
angulo = (angulo2-angulo1)*(180/pi)
angulodireito = angulo2*180/pi
anguloesquerdo = angulo1*180/pi
desvio = std(double(x2))
imtool(E)
imtool(F)
```

APÊNDICE 2 – Rotina para a análise de 30 imagens (ângulo externo)

```
clear all

R11(1) = input('Distância inicial do orifício do eletroinjeter (cm) ');
R111 = input('Incrementos de distância a partir da distância inicial (cm) ');
R1111 = input('Distância final ');
R1 = R11*361.54;
i = 31; % i e j são as posições na matriz onde se encontra o vértice do cone
j = 779;
k=0;
dx(1)=0;
e=0;
while R1<=R1111*361.54
    c = 1;
    d = 0;
while c<=30
    if c==1
        B1 = imread('Gasolina0.tif');
        E = B1;
        c=2;
    elseif c==2
        B1 = imread('Gasolina1.tif');
        E = B1;
        c=3;
    elseif c==3
        B1 = imread('Gasolina2.tif');
        E = B1;
        c=4;
    elseif c==4
        B1 = imread('Gasolina3.tif');
        E = B1;
        c=5;
    elseif c==5
        B1 = imread('Gasolina4.tif');
        E = B1;
        c=6;
    elseif c==6
        B1 = imread('Gasolina5.tif');
        E = B1;
        c=7;
    elseif c==7
        B1 = imread('Gasolina6.tif');
        E = B1;
        c=8;
    elseif c==8
        B1 = imread('Gasolina7.tif');
        E = B1;
        c=9;
    elseif c==9
        B1 = imread('Gasolina8.tif');
        E = B1;
        c=10;
    elseif c==10
        B1 = imread('Gasolina9.tif');
        E = B1;
```

```

c=11;
elseif c==11
B1 = imread('Gasolina10.tif');
E = B1;
c=12;
elseif c==12
B1 = imread('Gasolina11.tif');
E = B1;
c=13;
elseif c==13
B1 = imread('Gasolina12.tif');
E = B1;
c=14;
elseif c==14
B1 = imread('Gasolina13.tif');
E = B1;
c=15;
elseif c==15
B1 = imread('Gasolina14.tif');
E = B1;
c=16;
elseif c==16
B1 = imread('Gasolina15.tif');
E = B1;
c=17;
elseif c==17
B1 = imread('Gasolina16.tif');
E = B1;
c=18;
elseif c==18
B1 = imread('Gasolina17.tif');
E = B1;
c=19;
elseif c==19
B1 = imread('Gasolina18.tif');
E = B1;
c=20;
elseif c==20
B1 = imread('Gasolina19.tif');
E = B1;
c=21;
elseif c==21
B1 = imread('Gasolina20.tif');
E = B1;
c=22;
elseif c==22
B1 = imread('Gasolina21.tif');
E = B1;
c=23;
elseif c==23
B1 = imread('Gasolina22.tif');
E = B1;
c=24;
elseif c==24
B1 = imread('Gasolina23.tif');
E = B1;
c=25;
elseif c==25
B1 = imread('Gasolina24.tif');
E = B1;
c=26;

```

```

elseif c==26
B1 = imread('Gasolina25.tif');
E = B1;
c=27;
elseif c==27
B1 = imread('Gasolina26.tif');
E = B1;
c=28;
elseif c==28
B1 = imread('Gasolina27.tif');
E = B1;
c=29;
elseif c==29
B1 = imread('Gasolina28.tif');
E = B1;
c=30;
elseif c==30
B1 = imread('Gasolina29.tif');
E = B1;
c=31;
end
a=0;
k=0;
for teta = 29*pi/36:-pi/360:pi/3
k=k+1;
angulo3(k)=teta*(180/pi);
x1(k)=B1(round(i+R1*sin(teta)),round(j+R1*cos(teta)));
xreal(k)=double(x1(k));
E(round(i+R1*sin(teta)),round(j+R1*cos(teta)))=250;
if k>=2
dx(k)=(xreal(k)-xreal(k-1))/((pi./360).*R1);
end
if abs(dx(k))>=15 & a==0
angulo1=teta;
a=1;
end
end
b=0;
for l = k:-1:1
teta2 = 29*pi/36-l*(pi/360);
if abs(dx(l))>=15 & b==0
angulo2=teta2;
b=1;
end
end
d=d+1;
angulo4(d)=(angulo1-angulo2)*(180/pi);
end
R1=R1+R111*361.54;
e = e+1;
if e>1
R11(e)=R11(e-1)+R111;
end
angulo(e) = mean(angulo4);
erro(e) = 2.045*(std(angulo4))/(30^0.5);
angulomaiserro(e)=angulo(e)+erro(e);
angulomenoserro(e)=angulo(e)-erro(e);
end
plot(R11,angulo,'o',R11,angulomaiserro,'x',R11,angulomenoserro,'+');
legend('Média','Limite Superior','Limite Inferior');
grid on

```

APÊNDICE 3 – Rotina para análise de 30 imagens (ângulos externos, ângulos internos, bordas em coordenadas cartesianas, desvio padrão médio)

```
clear all
R11(1) = input('Distância inicial do orifício do eletroinjeter (cm) ');
R111 = input('Incrementos de distância a partir da distância inicial (cm) ');
R1111 = input('Distância final (cm) ');
R1 = R11*361.54; %distância em pixels
i = 31; % i e j são as posições na matriz onde se encontra o vértice do cone
j = 779;
dx(1)=0; %dx é uma função para determinar o ângulo de corte, ela será iniciada com valor 1.
e=0;

while R1<=R1111*361.54
    c = 1; % O c determina qual imagem será utilizada em cada loop.
    d = 0;
while c<=30
    if c==1
        B1 = imread('Gasolina0.tif');
        c=2;
    elseif c==2
        B1 = imread('Gasolina1.tif');
        c=3;
    elseif c==3
        B1 = imread('Gasolina2.tif');
        c=4;
    elseif c==4
        B1 = imread('Gasolina3.tif');
        c=5;
    elseif c==5
        B1 = imread('Gasolina4.tif');
        c=6;
    elseif c==6
        B1 = imread('Gasolina5.tif');
        c=7;
    elseif c==7
        B1 = imread('Gasolina6.tif');
        c=8;
    elseif c==8
        B1 = imread('Gasolina7.tif');
        c=9;
    elseif c==9
        B1 = imread('Gasolina8.tif');
        c=10;
    elseif c==10
        B1 = imread('Gasolina9.tif');
        c=11;
    elseif c==11
        B1 = imread('Gasolina10.tif');
        c=12;
    elseif c==12
        B1 = imread('Gasolina11.tif');
        c=13;
    elseif c==13
```

```

B1 = imread('Gasolina12.tif');
c=14;
elseif c==14
B1 = imread('Gasolina13.tif');
c=15;
elseif c==15
B1 = imread('Gasolina14.tif');
c=16;
elseif c==16
B1 = imread('Gasolina15.tif');
c=17;
elseif c==17
B1 = imread('Gasolina16.tif');
c=18;
elseif c==18
B1 = imread('Gasolina17.tif');
c=19;
elseif c==19
B1 = imread('Gasolina18.tif');
c=20;
elseif c==20
B1 = imread('Gasolina19.tif');
c=21;
elseif c==21
B1 = imread('Gasolina20.tif');
c=22;
elseif c==22
B1 = imread('Gasolina21.tif');
c=23;
elseif c==23
B1 = imread('Gasolina22.tif');
c=24;
elseif c==24
B1 = imread('Gasolina23.tif');
c=25;
elseif c==25
B1 = imread('Gasolina24.tif');
c=26;
elseif c==26
B1 = imread('Gasolina25.tif');
c=27;
elseif c==27
B1 = imread('Gasolina26.tif');
c=28;
elseif c==28
B1 = imread('Gasolina27.tif');
c=29;
elseif c==29
B1 = imread('Gasolina28.tif');
c=30;
elseif c==30
B1 = imread('Gasolina29.tif');
c=31;
end

a=0; % a deve ser zerado ao considerar uma nova imagem.
k=0; % k deve ser zerado ao considerar uma nova imagem.
for teta = 43*pi/36:pi/720:7*pi/4
k=k+1;
angulo3(k)=teta*(180/pi); %converter radianos em graus

```

```

        x1(k)=B1(round(i-R1*sin(teta)),round(j+R1*cos(teta))); %armazenando os
valores dos pixels para cada teta
        xreal(k)=double(x1(k)); % transformar o valor do pixel em variável real
        if k>=2 %para k =1 dx(k)=0.
            dx(k)=(xreal(k)-xreal(k-1))/((pi./720).*R1); %função para o ângulo
de corte.
        end
        if abs(dx(k))>=15 & a==0 %condição para achar ângulo externo de
corte.
            angulo1=teta;
            a=1; %Achada a condição do primeiro angulo externo de corte tal
ângulo é
                %armazenado e os comandos entre if e end não mais serão
executados para uma mesma imagem
            end
        end
b=0; % tem a mesma função do "a" para o corte do ângulo só que desta vez
para o ângulo externo da outra extremidade.
for m = k:-1:1 %identificar angulo externo da direita.
    teta2 = 43*pi/36+m*(pi/720);
    if abs(dx(m))>=15 & b==0
        angulo2=teta2;
        b=1;
    end
end

%identificando o ângulo interno da esquerda
a2=0;
for m =180:-1:1 %180*pi/720 = 100 graus em radianos, aproximadamente no
meio do cone nos perfis.
    teta3 = 43*pi/36+m*(pi/720);
    if abs(dx(m))>=30 & a2==0
        angulo5=teta3;
        a2=1;
    end
end

%identificando o ângulo interno da direita
b2=0;
for m = 180:1:400
    teta4 = 43*pi/36+m*(pi/720);
    if abs(dx(m))>=30 & b2==0
        angulo6=teta4;
        b2=1;
    end
end

%determinando o desvio padrão do perfil circular em 35 pontos.
l=0;
for n = angulo2:(angulo1-angulo2)/35:angulo1
    l=l+1;
    x2(l)=B1(round(i-R1*sin(n)),round(j+R1*cos(n)));
end

d=d+1;
angulo4(d)=(angulo2-angulo1)*(180/pi);
angulodireito(d) = angulo2;
anguloesquerdo(d) = angulo1;
anguloidir(d)=angulo6*(180/pi);
anguloiesq(d)=angulo5*(180/pi);
desvio(d)=std(double(x2));
x3(d)=(R1/361.54)*cos((3*pi/2)-angulo1);

```

```

y3(d)=-(R1/361.54)*sin((3*pi/2)-angulo1);
x4(d)=(R1/361.54)*cos(angulo2-(3*pi/2));
y4(d)=(R1/361.54)*sin(angulo2-(3*pi/2));
x5(d)=(R1/361.54)*cos(angulo6-(3*pi/2));
y5(d)=(R1/361.54)*sin(angulo6-(3*pi/2));
x6(d)=(R1/361.54)*cos(angulo5-(3*pi/2));
y6(d)=-(R1/361.54)*sin((3*pi/2)-angulo5);
end

R1=R1+R111*361.54; %incremento de distâncias em pixels
e = e+1;
if e>1
    R11(e)=R11(e-1)+R111; %incrementos de distâncias em cm
end
y3m(e) = mean(y3);
x3m(e) = mean(x3);
x4m(e) = mean(x4);
y4m(e) = mean(y4);
x5m(e) = mean(x5);
y5m(e) = mean(y5);
x6m(e) = mean(x6);
y6m(e) = mean(y6);
angulo(e) = mean(angulo4);
anguloesquerdainterno(e)=mean(anguloiesq);
angulodireitainterno(e)=mean(anguloidir);
desviomedio(e)=mean(desvio);
erro(e) = 2.045*(std(angulo4))/(30^0.5);
angulomaiserro(e)=angulo(e)+erro(e);
angulomenoserro(e)=angulo(e)-erro(e);
angulodireitomeia(e) = mean(angulodireito);
anguloesquerdomedia(e) = mean(anguloesquerdo);
end
R1 = R11(1)*361.54;
for e2=1:1:e
    R1=R1+R111*361.54;
end
figure
plot(R11,angulo,'o',R11,angulomaiserro,'x',R11,angulomenoserro,'+');
legend('Média','Limite Superior','Limite Inferior');
xlabel('Posição (cm)');
ylabel('Ângulos (graus)');
grid on
figure
plot(R11,anguloesquerdainterno,'.',R11,angulodireitainterno,'. ');
legend('esquerda','direita');
xlabel('Posição (cm)');
ylabel('Angulo interno (graus)');
Title('Gasolina');
grid on
figure
plot(R11,desviomedio,'. ');
xlabel('Distância(cm)');
ylabel('Desvio Padrão Médio');
grid on
figure
plot(x3m,y3m,'.',x4m,y4m,'.',x5m,y5m,'.',x6m,y6m,'. ');
grid on
title('Gasolina');
xlabel('Posição (cm)');
ylabel('Posição (cm)');

```

APÊNDICE 4 – Determinação do comprimento de Quebra (análise de 30 imagens)

```
clear all

R11(1) = input('Distância inicial do orifício do eletroinjeter (cm) ');
R111 = input('Incrementos de distância a partir da distância inicial (cm) ');
R1111 = input('Distância final (cm) ');
R1 = R11*361.54; %distância em pixels
i = 31; % i e j são as posições na matriz onde se encontra o vértice do cone
j = 779;
e = 0; %e vai variar com a imagem.
c=1;
dx(1)=0;
while c<=30
    if c==1
        B1 = imread('Gasolina0.tif');
        c=2;
    elseif c==2
        B1 = imread('Gasolina1.tif');
        c=3;
    elseif c==3
        B1 = imread('Gasolina2.tif');
        c=4;
    elseif c==4
        B1 = imread('Gasolina3.tif');
        c=5;
    elseif c==5
        B1 = imread('Gasolina4.tif');
        c=6;
    elseif c==6
        B1 = imread('Gasolina5.tif');
        c=7;
    elseif c==7
        B1 = imread('Gasolina6.tif');
        c=8;
    elseif c==8
        B1 = imread('Gasolina7.tif');
        c=9;
    elseif c==9
        B1 = imread('Gasolina8.tif');
        c=10;
    elseif c==10
        B1 = imread('Gasolina9.tif');
        c=11;
    elseif c==11
        B1 = imread('Gasolina10.tif');
        c=12;
    elseif c==12
        B1 = imread('Gasolina11.tif');
        c=13;
    elseif c==13
        B1 = imread('Gasolina12.tif');
```

```

c=14;
elseif c==14
B1 = imread('Gasolina13.tif');
c=15;
elseif c==15
B1 = imread('Gasolina14.tif');
c=16;
elseif c==16
B1 = imread('Gasolina15.tif');
c=17;
elseif c==17
B1 = imread('Gasolina16.tif');
c=18;
elseif c==18
B1 = imread('Gasolina17.tif');
c=19;
elseif c==19
B1 = imread('Gasolina18.tif');
c=20;
elseif c==20
B1 = imread('Gasolina19.tif');
c=21;
elseif c==21
B1 = imread('Gasolina20.tif');
c=22;
elseif c==22
B1 = imread('Gasolina21.tif');
c=23;
elseif c==23
B1 = imread('Gasolina22.tif');
c=24;
elseif c==24
B1 = imread('Gasolina23.tif');
c=25;
elseif c==25
B1 = imread('Gasolina24.tif');
c=26;
elseif c==26
B1 = imread('Gasolina25.tif');
c=27;
elseif c==27
B1 = imread('Gasolina26.tif');
c=28;
elseif c==28
B1 = imread('Gasolina27.tif');
c=29;
elseif c==29
B1 = imread('Gasolina28.tif');
c=30;
elseif c==30
B1 = imread('Gasolina29.tif');
c=31;
end
d=0; %d vai variar com a distância.
R1=R11*361.64;
while R1<=R1111*361.54
k=0;
a=0;
for teta = 29*pi/36:-pi/720:pi/3
k=k+1;
angulo3(k)=teta*(180/pi); %converter radianos em graus

```

```

        x1(k)=B1(round(i+R1*sin(teta)),round(j+R1*cos(teta))); %armazenando os
valores dos pixels para cada teta
        xreal(k)=double(x1(k)); % transformar o valor do pixel em variável real
        if k>=2 %para k =1 dx(k)=0.
            dx(k)=(xreal(k)-xreal(k-1))/((pi./720).*R1); %função para o ângulo
de corte.
        end

        if abs(dx(k))>=15 & a==0 %condição para achar ângulo externo de
corte.
            angulo1=teta;
            a=1; %Achada a condição do primeiro angulo externo de corte tal
ângulo é
                %armazenado e os comandos entre if e end não mais serão
executados para uma mesma imagem
            end
        end
        b=0; % tem a mesma função do "a" para o corte do ângulo só que
desta vez para o ângulo externo da outra extremidade.
for l = k:-1:1 %identificar angulo externo da direita.
    teta2 = 29*pi/36-l*(pi/720);
    if abs(dx(l))>=15 & b==0
        angulo2=teta2;
        b=1;
    end
end

l=0;
for n = angulo2:(angulo1-angulo2)/35:angulo1
    l=l+1;
    x2(l)=B1(round(i+R1*sin(n)),round(j+R1*cos(n)));
end
d=d+1;
desvio(d)=std(double(x2));
R(d)=R1/361.54;
R1=R1+R1111*361.54;

end
figure
plot(R,desvio);
grid on
xlabel('Distância ao orifício (cm)');
ylabel('Desvio');
desviomaximo=max(desvio);
for m=1:1:d %determinar a posição do desvio máximo
    if desvio(m)==desviomaximo
        breakup1=R(m);
    end
end
clear('desvio');
e = e+1;
breakup2(e)=breakup1;
end
compbreakup=mean(breakup2)
erro=2.042*std(breakup2)/(30^0.5)

```

APÊNDICE 5 – Obtenção dos Perfis de velocidades

```
AC3232
disp('Escolha o tipo de perfil')
disp('1 - Perfil circular')
disp('2 - Perfil linear')
perfil = input(' ');
a=0;
b=0;
i = 31/16;
j = 779/16;
i2 = 31;
j2 = 779;
A = imread('ImagemdocampoCC3232.bmp');
for j1 = 1:99
    for i1 = 74:-1:1
        a=a+1;
        x1(i1,j1)=x(a);
        y1(i1,j1)=y(a);
        xpix1(i1,j1)=xpix(a);
        ypix1(i1,j1)=ypix(a);
        U1(i1,j1)=U(a);
        V1(i1,j1)=V(a);
        vel(i1,j1)= ((U(a)).^2)+((V(a)).^2).^0.5;
        dpU1(i1,j1) = dpU(a);
        dpV1(i1,j1) = dpV(a);
    end
end
if perfil == 1
    R = input('Distância ao orifício (cm) ');
    R1 =R*(361.54/16);
    R2 = R*(361.54);
for teta = 10*pi/9:pi/60:7*pi/4
    b=b+1;
    vell(b)=vel(round(i-R1*sin(teta)),round(j+R1*cos(teta)));
    V1_2(b)=V1(round(i-R1*sin(teta)),round(j+R1*cos(teta)));
    U1_2(b)=U1(round(i-R1*sin(teta)),round(j+R1*cos(teta)));
    A(round(i2-R2*sin(teta)),round(j2+R2*cos(teta)),1)=0;
    A(round(i2-R2*sin(teta)),round(j2+R2*cos(teta)),2)=0;
    A(round(i2-R2*sin(teta)),round(j2+R2*cos(teta)),3)=0;
    angulo(b)=teta*(180/pi);
end
figure
plot(angulo,vell, '.')
grid on
xlabel('Ângulo (graus)');
ylabel('Velocidade m/s');
figure
plot(angulo,V1_2)
grid on
xlabel('Ângulo (graus)');
ylabel('Velocidade V (m/s)');
figure
plot(angulo,U1_2)
xlabel('Ângulo (graus)');
ylabel('Velocidade U');
grid on
figure
```

```

contour(xpix1,ypix1,vel)
figure
imshow(A)
else
    R = input('Maior distância a partir do orifício (cm)');
    Rfinal =R*(361.54/16);
    R11 = input('Incrementos de distância a partir do orifício (cm)');
    R111 = R11*(361.54/16);
    tetal = input('Ângulo do perfil com a vertical (graus)');
    teta = (-tetal*(pi/180))+pi/2;
    for R1 = R111:R111:Rfinal
        R2 = R1*16;
        b=b+1;
        d1(b)=R1/(361.54/16);
        vell1(b)=vel(round(i+R1*sin(teta)),round(j+R1*cos(teta)));
        V1_2(b)=V1(round(i+R1*sin(teta)),round(j+R1*cos(teta)));
        U1_2(b)=U1(round(i+R1*sin(teta)),round(j+R1*cos(teta)));
        A(round(i2+R2*sin(teta)),round(j2+R2*cos(teta)),1)=0;
        A(round(i2+R2*sin(teta)),round(j2+R2*cos(teta)),2)=0;
        A(round(i2+R2*sin(teta)),round(j2+R2*cos(teta)),3)=0;
        angulo(b)=teta*(180/pi);
    end
figure
plot(d1,vell1, '.')
xlabel('Distância ao orifício (cm)');
ylabel('Velocidade (m/s)');
grid on

end

```