

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Estudo da atomização e caracterização de injetores utilizando óleo
pirolítico de pneu usado puro e em misturas com diesel**

Autor: **German Raul Chumpitaz Ayala**

Orientador: **Prof. Dr. Christian Jeremi Coronado Rodriguez**

Co-orientador: **Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Junior**

Itajubá, julho de 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Estudo da atomização e caracterização de injetores utilizando óleo
pirolítico de pneu usado puro e em misturas com diesel**

Autor: **German Raul Chumpitaz Ayala**

Orientador: **Prof. Dr. Christian Jeremi Coronado Rodriguez**

Co-Orientador: **Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Junior**

Curso: **Mestrado em Engenharia Mecânica**

Área de Concentração: **Térmica, fluidos e máquinas de fluxo**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como
parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Itajubá, julho de 2016

M.G. – Brasil

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Estudo da atomização e caracterização de
injetores utilizando óleo pirolítico de pneu
usado puro e em misturas com diesel**

Autor: **German Raul Chumpitaz Ayala**

Orientador: **Prof. Dr. Christian Jeremi Coronado Rodriguez**

Co-Orientador: **Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Junior**

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Christian Jeremi Coronado Rodriguez - IEM/UNIFEI

Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Jr – UNESP/GUARATINGUETÁ

Prof. Dr. Fernando de Souza Costa - LCP/INPE

Prof. Dr. Lourival Jorge Mendes Neto - IEM/UNIFEI

Dedicatória

*A mi familia,
por su apoyo, cariño y fuerza.*

*A mis amigos
Por estar siempre allí, cuando los necesité.*

*A todos ellos que en algún momento
me ayudaron en este largo caminar.*

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr. Christian Jeremi Coronado Rodriguez, por sua orientação, ajuda, compreensão e por sua amizade.

Ao José Carlos Andrade, pela ajuda na parte experimental, conhecimento, amizade e paciência.

Ao Dr. Ely Vieira Cortez, pela sua ajuda, dia a dia, paciência e amizade.

Aos meus amigos brasileiros e estrangeiros os quais graças a Deus, são muitos e que compartilharam inesquecíveis momentos em todo este tempo, obrigado.

Aos professores e funcionários do Instituto de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Itajubá, pela assistência, conhecimento e incentivo.

Ao CNPq (Proc. N° 442050/2014-3), CAPES e FAPEMIG (Proc. N° TEC - APQ-01947-14) pelo apoio e suporte financeiro que permitiu a realização deste trabalho.

“Saber mais é ser mais livre”

César Vallejo

Resumo

O incremento da demanda atual de energia fazem necessária a procura de novas fontes de energia além das energias tradicionais, sendo principalmente as energias baseadas na valorização energética de resíduos uma opção interessante para a obtenção de energia e destinação final adequada. A grande quantidade de pneus produzidos constituem problemas ao final da sua vida útil devido à sua classificação como resíduo perigoso, isto faz necessário uma correta destinação final dos pneus inservíveis, onde os tipos de destinação final adequada dos resíduos sólidos perigosos estão reguladas pelos organismos ambientais mediante um marco normativo.

A pirólise é um método que permite o reaproveitamento de diversos materiais, podendo ser utilizado para a produção de um combustível líquido a partir dos pneus, combustível chamado neste trabalho como óleo pirolítico de pneu usado (OPPU).

Esta dissertação de mestrado visa o estudo e a caracterização do OPPU atomizado e, para isto foi realizado o desenvolvimento de injetores e utilizando uma bancada experimental para a medição do tamanho das gotas geradas. Para isto foram projetados e construídos uma bancada de testes experimentais e dois tipos de injetores: injetor tipo Y e efervescente.

A qualidade do spray gerado pela atomização do OPPU, puro e em misturas (OPPU – diesel), foi quantificado através da medição do tamanho de gotas, utilizando um medidor laser Spraytec Malvern 2007, obtendo-se como resultado valores de D_{32} menores 45 μm e no caso do injetor Y, valores experimentais próximos aos valores teóricos calculados para o caso dos líquidos puros e para as misturas. Também foram medidas as propriedades (massa específica, viscosidade e tensão superficial) dos líquidos puros e em misturas, as pressões e vazões do líquido e do gás de atomização no injetor além das distribuições dos tamanhos de gota gerados no jato atomizado para diferentes valores da relação GLR.

Abstract

The current increase in energy demand make necessary a search for new energy sources beyond traditional energies, particularly with energy based on recovery from waste an interesting option for obtaining energy and proper disposal. The large amount of produced tires are problems at the end of its useful life due to its classification as hazardous waste, proper disposal of used tires is necessary, where the types of proper disposal of hazardous waste are regulated by environmental agencies by a regulatory framework.

Pyrolysis is a method that allows the reutilization of various materials aand his utilization for the production of liquid fuel from tires, fuel which in this work is called pyrolytic oil used tire (OPPU).

This dissertation aims to study and characterization of atomized OPPU and, for this was accomplished the development of nozzles and using an experimental set-up for the measurement of droplet size generated. For that were designed and built a bench of experimental tests and two types of nozzles: nozzle type Y and effervescent.

The quality of the spray generated by the atomizing the OPPU, pure or as mixtures (OPPU - Diesel) was quantified by measuring the droplet size, using a laser measuring Spraytec Malvern 2007, obtaining as a result D_{32} smaller values of 45 μm and in the case of the Y Nozzle, experimental values are close to the theoretical values calculated for pure liquids and mixtures. Were also measured properties (specific gravity, viscosity and surface tension) of pure liquids and mixtures, pressures and flow rates of the liquid and the atomizing gas in the injector in addition to the distribution of drop sizes generated by the atomized jet to different values of the ratio GLR.

Sumário

DEDICATÓRIA	4
AGRADECIMENTOS	5
RESUMO.....	7
ABSTRACT	I
SUMÁRIO.....	II
LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABELAS.....	XII
TERMINOLOGIA	XIV
Caracteres latinos	xiv
Caracteres gregos.....	xiv
Subscritos.....	xv
Abreviaturas.....	xv
Siglas	xvi
CAPÍTULO 1	17
INTRODUÇÃO	17
1.1. Objetivos.....	18
1.2 Desenvolvimento do trabalho	18
CAPÍTULO 2	20
PROCESSOS TERMOQUÍMICOS	20
2.1 Introdução	20
2.2 Gaseificação.....	22
2.2.3 Tipos de gaseificadores.....	23
2.3 Pirólise	24

2.3.1 Tipos de pirólise	26
2.3.2 Tipos de reatores na pirólise dos pneus usados.	28
2.4 Combustão.....	33
2.4.1 Principais compostos poluentes produtos da combustão.....	34
CAPÍTULO 3	36
REVISÃO DO TRATAMENTO DOS PNEUS USADOS	36
3.1 Introdução.	36
3.2 Processo de fabricação de pneus no Brasil e no mundo	37
3.2.1 Processo de fabricação de pneus.....	37
3.2.2 Produção de pneus	39
3.3 Descarte dos pneus usados	41
3.4 Alternativas energéticas para uso de pneus inservíveis	43
3.4.1 Utilização dos resíduos de pneus na indústria de cimento (co- procesamento).....	45
3.4.2 Uso da pirolise utilizando resíduos de pneus.....	46
3.5 Caracterização físico – química do óleo pirolítico de pneu usado.....	48
3.5.1 Processo de pirólise de pneus	49
3.5.2 Parâmetros de operação da pirólise de pneus	49
CAPÍTULO 4.....	53
TERMODINÂMICA DA COMBUSTÃO DO OPPU E ATOMIZAÇÃO DE LÍQUIDOS COMBUSTÍVEIS	53
4.1 Introdução	53
4.2 Termodinâmica da Combustão	53
4.2.1 Combustão completa	54
4.2.2 Quantidade estequiométrica de oxidante	54
4.2.3 Razão ar / combustível (A/C)	57
4.2.4 Razão de equivalência	58
4.2.5 Formação de CO ₂ do OPPU	59
4.2.6 Formação de SO ₂ do OPPU	60
4.2.7 Entalpia de combustão ou poder calorífico do OPPU	61

4.2.8 Entalpia de formação do OPPU	63
4.2.9 Temperatura de chama adiabática do OPPU	66
4.3 Atomização	73
4.3.1 Termos básicos	74
4.3.2 Tipos de atomizadores	75
4.3.3 Influência das propriedades do líquido na atomização.....	77
4.3.4 Injetores de mistura interna do tipo Y.	77
4.3.5 Injetores efervescentes.....	83
CAPÍTULO 5.....	87
CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO EXPERIMENTAL DA ATOMIZAÇÃO DO OPPU	87
5.1 Introdução	87
5.2 Determinação experimental das propriedades do OPPU	87
5.2.1 Conceitos iniciais.....	88
5.2.2 Desenvolvimento do procedimento experimental e resultados	92
5.2.3 Resumo	102
5.3 Dimensionamento do atomizador tipo Y para OPPU	104
5.3.1 Parâmetros do injetor.....	104
5.3.2 Cálculo dos parâmetros do injeto	107
5.4 Dimensionamento do atomizador tipo efervescente para OPPU.	115
5.4.1 Parâmetros do injetor.....	115
5.4.2 Cálculo dos parâmetros do injetor.	117
CAPÍTULO 6.....	125
CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL PARA TESTES DE ATOMIZAÇÃO.....	125
6.1 Introdução.	125
6.2 Construção da bancada experimental.	125
6.3 Operação da bancada.	135
6.3.1 Preparação inicial da bancada.....	135
6.3.2 Teste dos injetores.	136

6.3.3 Limpeza ao final dos testes.....	136
6.4 Laser Spraytec Malvern.....	137
CAPÍTULO 7.....	140
ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO	140
7.1 Introdução	140
7.2 Preparação dos testes.	140
7.2.1 Calibração dos rotâmetros	145
7.2.2 Determinação das propriedades dos fluidos.	146
7.2.3 Testes iniciais com injetor Y em acrílico	147
7.3 Testes com injetor Y em aço	150
7.3.1 Testes com injetor Y e óleo de soja, com a quantidade de ar do projeto.....	151
7.3.2 Testes com injetor Y e óleo de soja, com 3,5 l/min de ar.....	154
7.3.3 Testes com injetor Y e OPPU, com os parâmetros do projeto.	157
7.3.4 Testes com injetor Y com mistura Diesel-OPPU, com 2% de OPPU em massa.	161
7.3.5 Testes com injetor Y com mistura Diesel-OPPU, com 5% de OPPU em massa.	163
7.3.6 Testes com injetor Y com mistura Diesel-OPPU, com 10% de OPPU em massa.	164
7.4 Testes no injetor efervescente	169
CAPÍTULO 8.....	174
CONCLUSÕES.....	174
SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	176
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	178
APÊNDICES	186
A. PLANOS DE CONSTRUÇÃO DOS INJETORES	186
A.1 Carcaça para os injetores Y de 7 kW e 35 kW.....	186
A.2 Bico do injetor de 7 kW	189

A.3 Bico do injetor de 35 Kw	191
A.4 Carcaça e bico do injetor efervescente.....	193
B. INFLUÊNCIA DA VISCOSIDADE E A TENSÃO SUPERFICIAL NA PREDIÇÃO DO TAMANHO DE GOTA NA EQUAÇÃO DE WIGG NO INJETOR Y	195
B.1 Óleo de Soja com a quantidade de ar do projeto	195
B.2 Óleo de Soja com 3,5 l/min de ar	195
B.3 Óleo pirolítico de Pneu usado (OPPU)	196
B.4 Mistura Diesel-OPPU, com 2% de OPPU em massa	197
B.5 Mistura Diesel-OPPU, com 5% de OPPU em massa	197
B.6 Mistura Diesel-OPPU, com 10% de OPPU em massa	198
C. DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GOTA	199
C.1 Testes com injetor Y e óleo de soja, com 3,5 l/min de ar	199
C.2 Testes com injetor Y e OPPU, com os parâmetros do projeto.....	201
C.3 Testes com injetor Y com mistura Diesel-OPPU, com 2% de OPPU em massa.	204
C.4 Testes com injetor Y com mistura Diesel-OPPU, com 5% de OPPU em massa.	207
C.5 Testes com injetor Y com mistura Diesel-OPPU, com 10% de OPPU em massa.	210

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 Processos de conversão de biomassa	21
Figura 2. 2 Pirólise em uma partícula de biomassa	25
Figura 2. 3 Diagrama esquemático do sistema de reação de leito fixo	29
Figura 2. 4 Diagrama esquemático de um sistema de pirólise de parafuso sem fim	29
Figura 2. 5 Esquema de um Reator de forno rotativo	30
Figura 2. 6 Reator de Leito fluidizado de tecnologia	32
Figura 2. 7 Tecnologia do Reator a Vácuo	33
Figura 3. 1 Composição química elementar de um pneu	38
Figura 3. 2 Partes de um pneu	39
Figura 3. 3 Volume de Vendas em milhões de unidades	40
Figura 3. 4 Produção de pneus no Brasil por categoria, em milhões de unidades	40
Figura 3. 5 Implementação específica por país (EU)	42
Figura 3. 6 Tendências mundiais na recuperação	43
Figura 3. 7 Processo PETROSIX de reciclagem do pneus	48
Figura 4. 1 Variação da entalpia com a temperatura	62
Figura 4. 2 Entalpías de formação para diferentes composições do OPPU	66
Figura 4. 3 Iterações para determinar a temperatura de chama adiabática, para misturas estequiométricas	68
Figura 4. 4 Variação da temperatura de chama adiabática com a porcentagem de excesso de ar	73
Figura 4. 5 Processo ideal da formação de gotas a partir de uma lâmina líquida	74
Figura 4. 6 Atomização do líquido em um injetor tipo Y	79
Figura 4. 7 Ilustração esquemática do mecanismo de atomização em atomizadores tipo Y	80
Figura 4. 8 Outras configurações de atomizadores tipo-Y (a) ENEL Y-duct atomizador de mistura interna, (b) Atomizador Babcock Y-jet	81
Figura 4. 9 Esquema de um injetor tipo Y-Jet e suas principais dimensões	82

Figura 4. 10 Atomizador de escoamento efervescente -----	83
Figura 4. 11 Regimes de fluxo para misturas ar/água num escoamento horizontal -----	85
Figura 4. 12 Esquemas simplificados dos desenhos das diferentes configurações dos atomizadores efervescentes, Tipo A, B, C, -----	86
Figura 5. 1 Viscosímetro de Ostwald -----	89
Figura 5. 2 Viscosímetro de rotação, QUIMIS-----	90
Figura 5. 3 Determinação da tensão superficial mediante o tensiômetro de Du Nouy -----	91
Figura 5. 4 Medição da massa com a Balança Mettler M3.-----	93
Figura 5. 5. Medição da mostra do OPPU -----	93
Figura 5. 6 Aparelhos necessários para a determinação da viscosidade -----	95
Figura 5. 7 Detalhes da Medição do OPPU no viscosímetro de Ostwald-----	95
Figura 5. 8 Medição do OPPU no viscosímetro de rotação -----	96
Figura 5. 9 Dinamômetro, termometro e anel. -----	97
Figura 5. 10 Determinação da tensão superficial mediante o método do anel (tensiômetro do Du Nouy) (a) Esquema da submersão do anel no líquido em 8 passos (b) e (c) Procedimento no laboratório com o OPPU. -----	98
Figura 5. 11. Preparação do equipamento de medição.-----	99
Figura 5. 12 Painel de controle com as primeiras medições de tensão superficial -----	100
Figura 5. 13 Calorímetro IKA C200 -----	101
Figura 5. 14 Analisador Perkim Elmer 2400 Series II-----	101
Figura 5. 15 Cálculo de diâmetro mediano mássico (MMD), para diferentes potencias -----	108
Figura 5. 16 Cálculo de diâmetro mediano mássico, para diferentes pressões -----	108
Figura 5. 17 Dimensões do injetor de 7 kW -----	111
Figura 5. 18 (a) Dimensões do injetor de 35 kW, (b) vista isométrica do bico do injetor, (c) Vista isométrica da carcaça do injetor, (d) vista isométrica do montagem das duas peças (bico e carcaça) (e) injetor de 35 kW feito em aço . -----	113
Figura 5. 19 Ponto de funcionamento do injetor, adaptado de-----	120
Figura 5. 20 Esquema da geometria interna do injetor efervescente-----	120

Figura 5. 21 (a) Dimensões do injetor efervescente, (b) detalhe da carcaça do injetor, (c) detalhe bico do injetor, (d) detalhe da montagem da carcaça e bico do injetor ,(e) Detalhe da camara de mistura com as duas fileiras de furos de aeração, (f) injetor efervescente, feito em acrílico (PMMA). -----	124
Figura 6. 1 Esquema da bancada experimental para testes de injetores. -----	126
Figura 6. 2 Bancada experimental construída. -----	127
Figura 6. 3 Cilindros de Nitrogênio (esquerda) e ar puro (direita). -----	128
Figura 6. 4 Válvulas de posto na bancada. -----	128
Figura 6. 5 Esquema dos depósitos de combustível. -----	129
Figura 6. 6 Tanques de combustível na bancada.-----	130
Figura 6. 7 Compressor de limpeza de pluma. -----	131
Figura 6. 8 Medidor de vazão AALBORG. -----	131
Figura 6. 9 Compressor de limpeza de pluma. -----	132
Figura 6. 10 Sensor de pressão. -----	133
Figura 6. 11 conexões das tubulações com os depósitos e os sensores. -----	134
Figura 6. 12 Bancada vista posterior, com as linhas de combustível, e ar finalizadas, além do compressor e os indicadores. -----	134
Figura 6. 13 Bancada, vista frontal, com as válvulas de posto, rotâmetro, medidor de vazão de ar, válvulas agulha, válvulas esfera abre-fecha inversor de corrente e os indicadores. -----	135
Figura 6. 14 Principais componentes do Spraytec-----	138
Figura 6. 15 Princípio de operação do sistema Spraytec -----	139
Figura 6. 16 Diagrama de determinação do tamanho de partícula -----	139
Figura 7. 1 Detalhe do injetor Y com as duas peças. -----	141
Figura 7. 2 Detalhe do injetor efervescente com as duas peças. -----	142
Figura 7. 3 (a)efeitos do OPPU no injetor feito de PMMA (b) efeitos dos compostos aromáticos no acrílico. -----	143
Figura 7. 4 Injetor em acrílico de 35 kW -----	144
Figura 7. 5 Distancias no medidor laser, respeito ao jato e posição do injetor em todas as medições-----	144

Figura 7. 6 Equipamento de medição do tamanho médio das gotas Malvern Spraytec -----	145
Figura 7. 7 Testes do injetor Y a diferentes relações gás combustível. (a) 0,05 (b) 0,075 (c) 0,1 (d) 0,125 (e) 0,15-----	148
Figura 7. 8 Distribuição de gotas no injetor Y utilizando água colorida. -----	149
Figura 7. 9. Pressões nas linhas dentro do injetor Y em acrílico utilizando água.-----	150
Figura 7. 10. Pressões nas linhas do injetor Y em aço, com a quantidade de ar do projeto. -	152
Figura 7. 11. Comparação do tamanho médio de gota (MMD) teórico e experimental, para o óleo de soja-----	152
Figura 7. 12. Distribuição de tamanho de partícula com respeito à GLR, (a) GLR=0,38 (b) GLR=0,47 (c) GLR=0,63 (d) GLR=1,08 em sprays de óleo de soja. -----	154
Figura 7. 13. Pressões nas linhas do injetor Y em aço, com 3,5 l/min de ar e óleo de soja. -	155
Figura 7. 14. Comparação do tamanho médio (MMD) de gota teórico e experimental para o óleo de soja com 3,5 l/min de ar. -----	156
Figura 7. 15. Distribuição de tamanho de partícula com respeito à GLR para óleo de soja 3,5 l/min de ar (a) GLR=0,17 (b) GLR=0,26 (c) GLR=0,5 -----	157
Figura 7. 16. Pressões nas linhas do injetor Y em aço com OPPU. -----	158
Figura 7. 17. Comparação do tamanho de gota teórico e experimental, para o OPPU, com os parâmetros de projeto.-----	159
Figura 7. 18. Comparação das distribuições de tamanho de gota para os valores extremos de GLR, para OPPU a) GLR=0,05; b) GLR=0,15. -----	160
Figura 7. 19. Pressões nas linhas do injetor Y em aço com mistura Diesel-OPPU, com 2% de OPPU em massa.-----	162
Figura 7. 20. Comparação do tamanho de gota teórico e experimental, para o injetor Y com mistura Diesel-OPPU, com 2% de OPPU em massa.-----	162
Figura 7. 21. Pressões nas linhas do injetor Y em aço com mistura Diesel-OPPU, com 5% de OPPU em massa.-----	163
Figura 7. 22. Comparação do tamanho de gota teórico e experimental, para o injetor Y com mistura Diesel-OPPU, com 5% de OPPU em massa.-----	164
Figura 7. 23. Pressões nas linhas do injetor Y em aço com mistura Diesel-OPPU, com 10% de OPPU em massa.-----	165

Figura 7. 24. Comparação do tamanho de gota teórico e experimental, para o injetor Y com mistura Diesel-OPPU, com 10% de OPPU em massa. -----	165
Figura 7. 25. Comparação da distribuição do tamanho das partículas para diferentes composições (a) GLR=0,35; (b) GLR=0,125 e (c) GLR=0,06 -----	168
Figura 7. 26. Pressões nas linhas do injetor efervescente em acrílico com óleo de soja-----	170
Figura 7. 27. Tamanho de gota experimental, para o injetor efervescente com óleo de soja	170
Figura 7. 28. Distribuição do tamanho das partículas para diferentes valores de GLR a) GLR=0,43; b) GLR=0,29; c) GLR=0,22;) GLR=0,18 ;e) GLR=0,15 ;f) GLR=0,13.-----	173

LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1. Composição típica de pneus de passageiros e caminhões-----	37
Tabela 3. 2. Tecnologia destino final e quantidade total de pneus inservíveis destinados -----	44
Tabela 3. 3. Composição dos produtos a diferentes condições-----	51
Tabela 3. 4 Propriedades físico-químicas do OPPU em comparação com combustíveis tradicionais. -----	52
Tabela 4. 1 Comparação das propriedades do OPPU, com os valores da bibliografia pesquisada. -----	56
Tabela 4. 2 Composição dos OPPU. -----	57
Tabela 4. 3 Determinação dos numeros de moles dos elementos nos reagentes-----	57
Tabela 4. 4 Poderes caloríficos de algumas substâncias-----	63
Tabela 4. 5 Calores específicos em função da temperatura, com T em K e CP em kJ/kmol.K	70
Tabela 4. 6 Resumo da descrição do mecanismo de atomização de um injetor tipo Y -----	80
Tabela 4. 7 Recomendações para projeto das dimensões de um atomizador tipo Y-jet -----	82
Tabela 5. 1 Resultados da determinação da massa especifica. -----	94
Tabela 5. 2 Resultados da medição da viscosidade com o Viscosímetro de Ostwald. -----	96
Tabela 5. 3 Medições no viscosímetro de rotação -----	96
Tabela 5. 4. Resultados de tensão superficial obtidos mediante o método de Du Nouy. -----	98
Tabela 5. 5. Resultados de tensão superficial obtidos com o tensiômetro LAUDA TD 3---	100
Tabela 5. 6. Poder calorífico superior, determinado no calorímetro IKA C200 -----	101
Tabela 5. 7. Composição elementar do OPPU-----	102
Tabela 5. 8. Composição elementar do segundo IPT -----	103
Tabela 5. 9. Resumo das propriedades do OPPU.-----	103
Tabela 5. 11. Valores de estagnação -----	107
Tabela 5. 12 Valores calculados para uma potencia de 7 kW e 35 kW. -----	110
Tabela 5. 13 Valores adotados no dimensionamento do injetor Y-----	114
Tabela 5. 14 Valores das propriedades utilizados no calculo. -----	117

Tabela 5. 15 Valores calculados para um consumo de 6 g/s de combustível-----	118
Tabela 5. 16 Valores calculados para um gasto de 7 g/s de combustível -----	119
Tabela 5. 17 Valores adotados para o dimensionamento o injetor-----	119
Tabela 5. 18 Valores recomendados segundo Quispe (2013) -----	121
Tabela 5. 19 Valores adotados, segundo as recomendações de Quispe (2013) -----	121
Tabela 7. 1 Propriedades dos líquidos utilizados nos injetores. -----	146
Tabela 7. 2 Resultados dos testes com o injetor Y em acrílico. -----	150
Tabela 7. 3 Resultados do tamanho médio de gota (MMD)dos testes com o injetor Y em aço, com a quantidade de ar do projeto (6,4 l/min). -----	151
Tabela 7. 4 Resultados do tamanho de gota, com a metade da quantidade de ar do projeto. -----	155
Tabela 7. 5 Resultados do tamanho de gota, dos testes com o injetor Y em aço, utilizando OPPU. -----	158
Tabela 7. 6 Resultados do tamanho de gota (μm) dos testes com o injetor Y em aço, utilizando uma mistura de Diesel-OPPU, com um 2% de OPPU. -----	161
Tabela 7. 7 Resultados do tamanho de gota dos testes com o injetor Y em aço, utilizando uma mistura de Diesel-OPPU, com um 5% de OPPU. -----	163
Tabela 7. 8 Resultados do tamanho de gota dos testes com o injetor Y em aço, utilizando uma mistura de Diesel-OPPU, com um 10% de OPPU.-----	164
Tabela 7. 9 Resultados do tamanho de gota dos testes com o injetor efervescente em PMMA. -----	169

TERMINOLOGIA

Caracteres latinos

g	Aceleração da gravidade
h	Raio da câmara de mistura
k	Coeficiente isentrópico
m	Massa
n	Número de moles
t	Tempo, tonelada
F	Força
M	Massa molar, número de Mach
P	Pressão
R	Raio meio; constante universal dos gases
T	Temperatura
U	Velocidade
ΔH_c	Entalpia de combustão
$\bar{h}_f^\circ$	Entalpia de formação do composto
$\Delta \bar{h}$	Variação de entalpia sensível
$\bar{h}_T$	Entalpia na temperatura adiabática
$\bar{h}_T$	Entalpia a temperatura de referência do composto
C_p	Calor específico
C_d	Coeficiente de descarga
v	Velocidade

Caracteres gregos

ϕ	Razão de equivalência
ρ	Massa específica
μ	Viscosidade dinâmica ou absoluta
ν	Viscosidade cinemática
σ	Tensão superficial

Subscritos

<i>0</i>	Condições de estagnação, a temperatura de referência, saída do injetor.
<i>ar</i>	Ar
<i>c</i>	Câmara
<i>e</i>	Entrada
<i>i</i>	Elemento i
<i>ic</i>	Injeção de combustível
<i>comb</i>	Combustível
<i>esteq</i>	Estequiométrico
<i>reag</i>	Reagentes
<i>prod</i>	Produtos
<i>AR</i>	Ar de atomização
<i>CO₂</i>	Dióxido de carbono
<i>SO₂</i>	Dióxido de enxofre
<i>H₂O</i>	Água
<i>R</i>	Reagentes
<i>P</i>	Produtos
<i>F</i>	Saída
<i>G,g</i>	Gás
<i>L,l</i>	Líquido

Abreviaturas

<i>mboe</i>	Milhão de barris equivalentes de petróleo (<i>million barrels of oil equivalente</i>)
<i>WGS</i>	Reação de mudança do vapor de água (<i>water gas shift</i>)
<i>EF</i>	Tipo de gaseificador (<i>Entrained flow</i>)
<i>BFP</i>	Gaseificador de leito fluidizado borbulhante (<i>Bubbling fluidized bed</i>)
<i>CFB</i>	Gaseificador de leito fluidizado circulante (<i>Circulating fluidized bed</i>)
<i>Dual FB</i>	Gaseificador de Leito Dual fluidizado (<i>Dual fluidized bed</i>)
<i>PCI</i>	Poder calorífico inferior
<i>PCS</i>	Poder calorífico superior
<i>OPPU</i>	Óleo pirolítico de pneu usado
<i>D_{MMD}</i>	Diâmetro mediano de massa das gotas do spray
<i>GLR</i>	Relação gás/líquido (<i>Gás liquid Ratio</i>)
% m/m	Percentagem mássica ou percentagem em massa (<i>percentage by weight, weight percent or weight-weight percentage (wt%)</i>)

Siglas

<i>ASTM</i>	Sociedade Americana de Testes e Materiais (<i>American Society for Testing and Materials</i>)
<i>INPE</i>	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
<i>IPT</i>	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
<i>LACG</i>	Laboratório de Aplicações em Combustão e Gaseificação
<i>PMMA</i>	Polimetil-metacrilato (<i>Poly(methyl methacrylate)</i>)
<i>UE</i>	União Europeia
<i>UNIFEI</i>	Universidade Federal de Itajubá

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

O volume de pneus vendidos no mundo anualmente gera uma grande quantidade de pneus descartados, estes tipos de resíduos apresentam características que fazem difícil seu apropriado descarte devido a sua composição. Devido a estas características foram publicadas algumas normas para o correto descarte dos pneumáticos usados.

Outro aspecto a destacar é o aproveitamento de novas fontes de energia, devido ao decréscimo das fontes de energia tradicionais, isto inclui o aproveitamento de novos tipos de combustíveis.

Este trabalho apresenta um estudo da atomização e caracterização de injetores utilizando óleo pirolítico de pneu usado puro e em misturas com diesel.

A atomização do óleo pirolítico foi efetuada através da utilização de injetores do tipo Y e do tipo efervescente. Uma bancada de testes móvel foi projetada e construída para a caracterização dos injetores.

A importância desta pesquisa reside no aproveitamento de um resíduo de difícil reciclagem para a obtenção de um combustível com poder calorífico um pouco menor aos combustíveis tradicionais, embora com um alto conteúdo de enxofre.

1.1. Objetivos

Estudar e caracterizar a atomização do óleo pirolítico de pneus usados (OPPU) puro e /ou misturado com diesel em uma bancada de ensaios de atomização construída para esta dissertação.

Para cumprir este objetivo foram realizadas as seguintes atividades:

- Revisão do descarte dos pneus usados no Brasil e as alternativas energéticas.
- Caracterização do OPPU e óleo diesel líquidos.
- Projeto de um sistema de injeção de OPPU (tipos Y e efervescente).
- Construção de uma bancada experimental para a caracterização e estudo do processo de atomização do OPPU puro e em misturas com diesel.
- Caracterização dos sprays produzidos pelos injetores.

1.2 Desenvolvimento do trabalho

Esta dissertação está estruturada, além deste primeiro Capítulo introdutório, em outros 8 capítulos que são descritos a seguir

No Capítulo 2 apresenta-se uma descrição dos processos termoquímicos de decomposição, gaseificação, pirólise e combustão.

No Capítulo 3 faz-se uma revisão concernente à problemática do descarte dos pneus utilizados, apresentando-se um panorama geral do volume de fabricação, as alternativas de descarte apropriado dos pneus segundo a legislação atual, com especial foco no processo da pirólise.

No Capítulo 4 se aborda o estudo teórico da combustão do óleo pirolítico de pneu usado calculando a entalpia de combustão de formação e a temperatura de chama adiabática. É feita uma descrição do processo de atomização nos dois tipos de injetores selecionados para os testes.

No Capítulo 5, descreve-se inicialmente a caracterização do combustível com a determinação experimental das propriedades necessárias para o projeto dos injetores. Em seguida apresenta-se o projeto e dimensionamento dos injetores.

No Capítulo 6, descreve-se a construção e a operação da bancada construída para testar os injetores. No Capítulo 7 são apresentados os resultados dos testes realizados com os dois injetores e finalmente no Capítulo 8 apresentam-se as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

Capítulo 2

PROCESSOS TERMOQUÍMICOS

2.1 Introdução

Os processos termoquímicos e bioquímicos são usados para a recuperação de energia a partir de biomassa, como é mostrado na Figura 2. 1. Processos bioquímicos estão envolvidos na metanização da biomassa. Processos termoquímicos são a combustão, pirólise e gaseificação. (KIRUBAKARAN, SIVARAMAKRISHNAN, *et al.*, 2009).

A gaseificação é um processo termoquímico que converte materiais carbonáceos, como a biomassa em convenientes combustíveis gasosos úteis, ou matéria-prima química. A pirólise, oxidação parcial e hidrogenação são processos relacionados. Combustão também converte materiais carbonáceos em gases produtos, mas existem algumas diferenças importantes. Por exemplo, os gases produto da combustão não tem valor calorífico útil, mas os gases proveniente da gaseificação do produto tem valor calorífico. Gaseificação mantém energia em ligações químicas, enquanto a combustão libera energia. Gaseificação ocorre num ambiente redutor (déficit de oxigênio) que requerem calor; combustão ocorre em um ambiente oxidante com liberação de calor (BASU, 2010).

O objetivo da gaseificação ou pirólise não é apenas conversão de energia; produção de matéria-prima química é também uma importante aplicação. Na verdade, a primeira aplicação de pirólise da madeira em carvão vegetal em torno de 4000 a.C. não foi para o aquecimento, mas para redução do minério de ferro. Nos tempos modernos, a gaseificação não é restrita a

hidrocarbonetos sólidos. Sua matéria-prima inclui líquidos ou até gases para a produção de combustíveis mais úteis. A oxidação parcial de gás metano é amplamente utilizada na produção de gás de síntese¹, ou *syngas*, o que é uma mistura de H₂ e CO. (BASU, 2010)

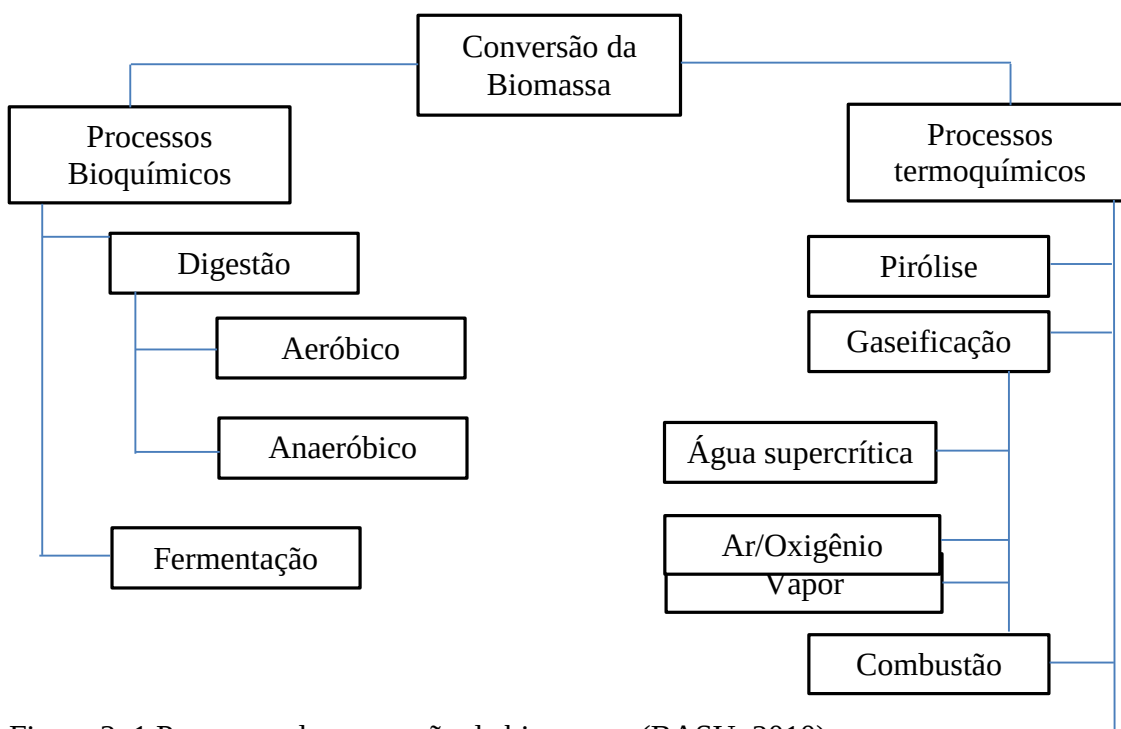


Figura 2. 1 Processos de conversão de biomassa (BASU, 2010)

Em resumo, a conversão termoquímica, da biomassa, pode ser realizada por três processos diferentes: gaseificação, pirólise e queima direta, sendo a gaseificação o processo mais eficiente. A gaseificação é a conversão de biomassa, ou qualquer combustível sólido, num gás energético através da oxidação parcial a temperaturas ligeiramente elevadas. Este gás, denominado gás de síntese, constitui uma mistura de monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂), metano (CH₄), pequenas quantidades de outros hidrocarbonetos leves (C_nH_m), dióxido de carbono (CO₂), e vapor de água (H₂O), além do nitrogênio (N₂) presente no ar e fornecido para a reação. Devido ao processo, também resultam quantidades variáveis de carbono, ácidos pirolenhosos e alcatrão². A formação de alcatrão é um dos maiores problemas enfrentados

¹ Gás de síntese (*syngas*), é uma mistura dos gases hidrogênio e monóxido de carbono. Não deve ser confundido com SNG (a abreviatura para "sintético (ou substituto) de gás natural"), que é feito principalmente de gás metano. Gás de síntese é uma importante matéria-prima para as indústrias químicas e de energia. Um grande número de hidrocarbonetos tradicionalmente produzidos a partir de óleo de petróleo, também podem ser produzidos a partir de gás de síntese. Gás de síntese pode ser produzido a partir de muitos dos hidrocarbonetos, incluindo carvão e coque de petróleo, assim como a partir da biomassa. Para distinguir o gás de síntese gerado a partir da biomassa do aquele que é produzido a partir de combustíveis fósseis, o primeiro é por vezes chamado biosyngas (BASU, 2010)

² Alcatrão, geralmente é um líquido negro espesso, altamente viscoso que se condensa nas zonas de baixa temperatura de um gaseificador, obstruindo a passagem do gás e levando a interrupções do sistema. Alcatrão (tar) é altamente indesejável.

durante a gaseificação de biomassa. Alcatrão condensado em temperaturas reduzidas polimeriza-se em equipamentos, como motores e turbinas. (PEREIRA, DA SILVA, *et al.*, 2012)

2.2 Gaseificação

A biomassa em 1999 fornece cerca de 14% da energia do mundo, cerca de 25 milhões de barris de óleo equivalente por dia (mboe³ / dia) (=55 EJ). É a mais importante (35%) fonte de energia em países em desenvolvimento, mas também desempenha um papel significativo num certo número de países industriais, por exemplo, nos EUA obtém 4% (1,5 mboe/dia) da sua energia a partir de biomassa, e na Suécia cerca de 14%; ambos países têm planos para aumentar a produção e uso da bioenergia. Na biomassa o problema é obter a energia para aqueles que precisam dela em uma forma ambientalmente sustentável, e que também seja economicamente viável quando todos os custos internos e externos são contabilizados. Existe uma margem considerável para modernizar os sistemas que fornecem produção de energia da biomassa para proporcionar uma variedade de formas de energia, tais como energia elétrica, combustíveis líquidos e gases. (HALL, 1991)

O termo gaseificação abrange a conversão de qualquer combustível carbonáceo para um produto gasoso com um poder calorífico utilizável. (HIGMAN e VAN DER BURGT, 2008)

Esta definição exclui a combustão, porque o gás de combustão do produto de aquecimento não tem qualquer valor residual. Ele inclui as tecnologias de pirólise, oxidação parcial, e de hidrogenação. As primeiras tecnologias dependiam fortemente da pirólise (isto é, a aplicação de calor para a matéria-prima, na ausência de oxigênio), mas este é de menor importância na produção de gás hoje. A tecnologia dominante é a oxidação parcial, que produz gás de síntese (também conhecido como syngas) que consiste em hidrogênio e monóxido de carbono em proporções variadas, em que o oxidante pode ser oxigênio puro, ar e / ou vapor de água. Oxidação parcial pode ser aplicada a matérias-primas sólidas, líquidas e gasosas, como carvão, óleos residuais e gás natural. (HIGMAN e VAN DER BURGT, 2008)

Uma vez que um material sólido ou líquido carbonado é convertido para o estado gasoso, as substâncias indesejáveis, tais como compostos de enxofre e cinzas podem ser removidos do gás. Em contraste com os processos de combustão, que funcionam com excesso de ar, processos de gaseificação operam em condições subestequiométricas, com fornecimento controlado de oxigênio (geralmente de 35 por cento da quantidade de O₂ teoricamente

³ mboe = milhões de barris de óleo equivalente, correspondente a um milhão de boe (barris de óleo equivalente), sendo 1 boe, uma unidade de energia com base na energia aproximada liberada pela queima de um barril (42 galões americanos ou 158,9873 litros) de petróleo bruto.

necessária para a combustão completa ou menos) de tal forma que, tanto, calor e combustível gasoso novo sejam produzidos, na mesma proporção que o material de alimentação seja consumido. Alguns processos de gaseificação também usam o aquecimento indireto, evitando a combustão do material de alimentação no reator de gaseificação e evitar a diluição do produto gasoso com Nitrogênio e excesso de CO₂. (REZAIYAN e CHEREMISINOFF, 2005)

O uso da biomassa causa baixas emissões dos gases de efeito estufa em comparação com os combustíveis fósseis, uma vantagem que é a chave para a disseminação desta fonte de energia, desde que a preocupação ambiental é um dos pilares da sustentabilidade, que é tão procurado em todo o mundo. (PEREIRA, DA SILVA, *et al.*, 2012)

A produção de um gás combustível a partir de materiais contendo carbono já é uma tecnologia antiga. A chamada destilação seca ou pirólise (aquecimento da matéria-prima na ausência de oxigênio, resultando em decomposição térmica do combustível de gases voláteis e carbono sólido) foi praticada pela primeira vez, em escala comercial, em 1812, por uma empresa de gás em Londres. (QUAAK, KNOEF e STASSEN, 1999)

Biomassa e os biocombustíveis podem ser utilizados como substitutos de combustíveis fósseis na geração de calor, eletricidade e na criação de produtos químicos, trazendo benefícios tais como a sustentabilidade, o desenvolvimento econômico regional, social e o desenvolvimento agrícola, um fornecimento regular de energia, redução das emissões de gases efeito de estufa, e, conseqüentemente, a sua mitigação

A composição do gás de síntese é afetada pelas condições de gaseificação, tais como a temperatura, a razão de equivalência⁴ e pressão. (PEREIRA, DA SILVA, *et al.*, 2012)

2.2.3 Tipos de gaseificadores

Existem vários tipos de tecnologias de gaseificação que foram demonstradas ou desenvolvidas para a conversão de matérias-primas de biomassa. A maioria deles foram desenvolvidas e comercializados para a produção de calor e energia eléctrica a partir do gás de síntese, em vez de produção de combustível líquido. Os principais tipos são mostrados a seguir (NNFCC, 2009)

- a) Gaseificador de corrente ascendente, ou contracorrente de leito fixo
- b) Gaseificador de corrente descendente, tiro invertido ou concorrente e leito fixo
- c) Gaseificador de escoamento arrastado
- d) Gaseificador de leito fluidizado borbulhante
- e) Gaseificador de leito fluidizado circulante

⁴ Razão de equivalência (*equivalence Ratio*, ϕ) ver capítulo 4, [item 4.2.4](#)

- f) Gaseificador de leito dual fluidizado
- g) Gaseificador a plasma.

2.3 Pirólise

A pirólise é um processo termoquímico que permite quebrar as ligações das moléculas mais pesadas, adicionando calor em condições na ausência de oxigênio (vácuo ou atmosfera inerte). A principal vantagem da pirólise é a capacidade de tratar resíduos de difícil reciclado, tornando-os reutilizáveis, até decompor em elementos mais simples. Este tratamento é utilizado para converter resíduos sólidos em combustíveis de elevado poder calorífico, produtos químicos, monómeros e outros materiais valiosos (MARTÍNEZ, MURILLO, *et al.*, 2014)

A pirólise é também conhecido como carbonização, destilação destrutiva, destilação seca, ou retortagem. Na prática, não é possível conseguir uma atmosfera completamente livre de oxigênio; sistemas pirolíticos são operados com um menor valor da quantidade estequiométrica de oxigênio. Uma vez que alguma quantidade de oxigênio está presente em qualquer sistema de pirólise, também acontece uma oxidação nominal. Processos de gaseificação produzem uma variedade de derivados de sólidos e líquidos e gases combustíveis, em função das condições do processo e do conteúdo de matéria orgânica da matéria prima. (REZAIYAN e CHEREMISINOFF, 2005)

A pirólise tem sido utilizada para a produção de carvão a partir de biomassa por centenas de séculos. A pirólise do carvão e da biomassa (principalmente madeira) foi utilizado comercialmente para a produção de gás combustível assim como combustíveis sólidos (carvão vegetal) desde 1700 a inícios de 1900. A pirolise permite quebrar os enlaces das moléculas mais pesadas mediante a adição de calor em condições com ausência de oxigênio (atmosfera inerte ou vácuo). Semanticamente derivasse da palavra Pyro, palavra latina para definir o fogo. A principal vantagem da pirólise é a capacidade de tratar resíduos que são difíceis de reciclar e, em seguida, torná-los reutilizáveis, quebrando-as em elementos mais leves. Este tratamento é utilizado para converter os resíduos em combustíveis com alto poder calorífico, produtos químicos, monómeros e de outros materiais valiosos. Este tratamento se usa para converter os resíduos em combustíveis de alto poder calorífico, químicos, monómeros e outros materiais valiosos (MARTÍNEZ, MURILLO, *et al.*, 2014).

Existem duas grandes diferenças entre os processos de combustão e pirólise. Em primeiro lugar, os processos de combustão são exotérmicos (isto é, geram calor), enquanto a pirólise é um processo endotérmico (isto é, a pirólise requer a adição de calor). Em segundo lugar, os produtos de processos de combustão são CO_2 , água, e cinzas, enquanto os produtos da pirólise são carvão, óleo ou alcatrão e gases combustíveis. Estes produtos podem ser utilizados como combustível para o processo de combustão ou como produtos intermediários para a síntese e a produção de produtos químicos. (REZAIYAN e CHEREMISINOFF, 2005).

O produto inicial da pirólise é feito de gases condensáveis e de negro de fumo. O gás condensável pode-se quebrar ainda mais em gases não condensáveis (CO , CO_2 , H_2 e CH_4), líquido e carbono. Esta decomposição ocorre, em parte, através de reações homogêneas na fase gasosa, e em parte através de reações térmicas heterogêneas na fase sólido - gasosa. Em reações na fase gasosa, o vapor condensável é quebrado em moléculas menores de gases incondensáveis, tais como CO e CO_2 . O processo é mostrado na Figura 2. 2 (BASU, 2010)

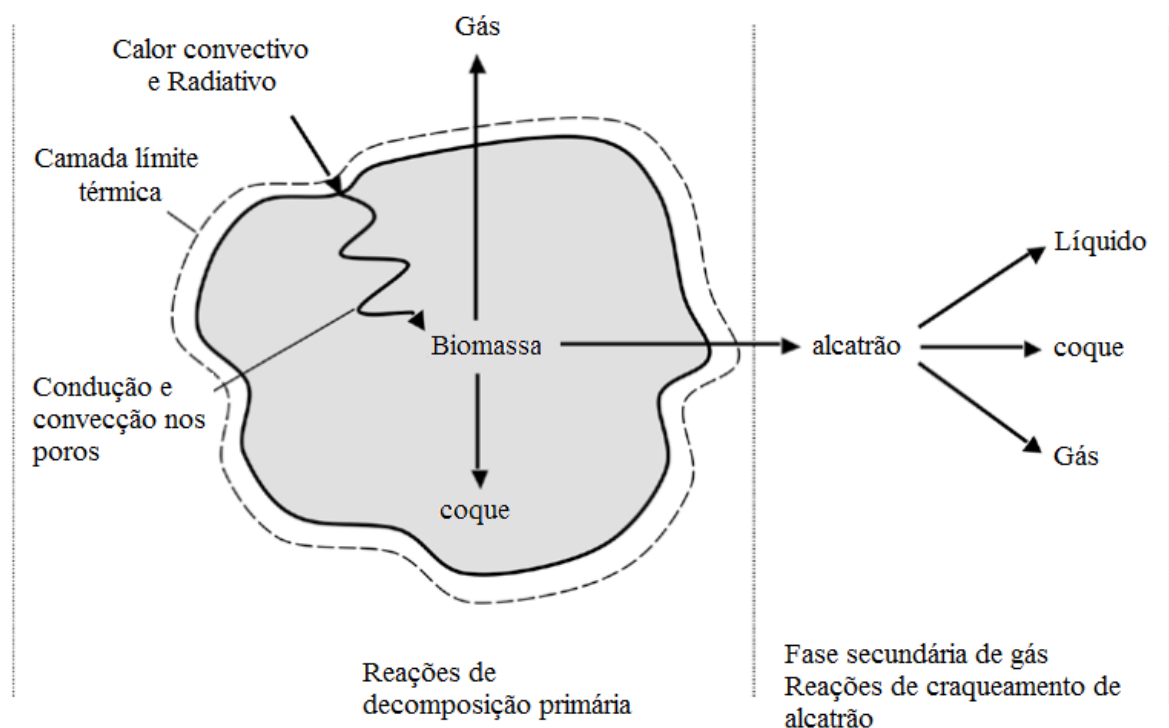


Figura 2. 2 Pirólise em uma partícula de biomassa (BASU, 2010).

A pirólise pode ser classificada como atmosférica, de vácuo, catalítica, rápida ou lenta de acordo com os parâmetros de operação aplicadas. De acordo com a pressão aplicada, a pirólise pode ser a vácuo ou atmosférica.

O interesse pela pirólise a vácuo resulta de vantagens associadas com:

- Decréscimo da taxa de fluxo de gás inerte.

- Tempo de residência dos voláteis no reator.
- Requisitos de energia mais baixos para o processo.
- Dispositivos mais simples para condensação do produto volátil.
- Maior rendimento da fração líquida.
- Melhor controle da sua composição, quer para aumentar a quantidade de componentes de alto valor agregado, como limoneno, ou a melhoria da qualidade do combustível e melhor qualidade do negro de fumo⁵. Uma vez que os indesejados processos de carbonização volátil, devido às reações secundárias, são minimizados; as propriedades de superfície do negro de fumo são semelhantes aos comerciais. (ANTONIOU e ZABANIOTOU, 2013)

2.3.1 Tipos de pirólise

Existem várias tipos de pirólise em função das condições de funcionamento, tais como, a velocidade de aquecimento, tempo de residência dos voláteis e a temperatura. (MARTÍNEZ, PUY, *et al.*, 2013)

a) Pirólise Lenta

Este tipo de pirólise, como o nome sugere, apresenta uma decomposição pirolítica lenta a baixas temperaturas. Pirólise lenta é caracterizada por baixas taxas de aquecimento (menores que 2°C/s), os tempos de residência relativamente longos dos sólidos e vapor (na ordem de minutos a horas) e, por vezes, a baixa temperatura.

Tempos de permanência mais longos resultam conduzindo a conversões secundárias de produtos primários, dando origem a mais coque, alcatrão, bem como produtos termicamente estáveis. Este fato faz com que a pirólise lenta também seja denominada de carbonização.

Ao contrário de pirólise rápida, o objetivo da pirólise lenta é a produção de carvão, embora o alcatrão e os gases também sejam obtidos, mas não necessariamente recuperados. Um exemplo é a produção clássica de carvão vegetal a partir da biomassa vegetal, devido à lenta volatilização do combustível, bem como às reações secundárias de coqueificação e polimerização dos produtos primários mais voláteis. (MARTÍNEZ, PUY, *et al.*, 2013; PARADELA RAMOS, 2012)

⁵ Negro de fumo (*carbon black*) É o termo coletivo para a gama de substâncias carbonadas abrangendo resíduos de plantas parcialmente carbonizadas a fuligem altamente grafitado. Negro de fumo pode influenciar o ambiente à escala local, regional e global de maneiras diferentes. Negro de fumo é formado a partir de uma combustão incompleta em ambientes reduzidos ou anóxicos, o termo 'carbono elementar (*elemental carbon*)' é usado para as frações de carbono medidos após a combustão oxidante na presença de oxigênio acima de um determinado limite de temperatura. (SHRESTHA, TRAINA e SWANSTON)

b) Pirólise rápida

Contrariamente à pirólise lenta, a pirólise rápida implica em uma decomposição térmica rápida caracterizada por taxas de aquecimento maiores. Este processo geralmente requer uma matéria-prima com tamanhos de partículas pequenas e dispositivos concebidos para permitir a remoção dos vapores liberados rapidamente. (MARTÍNEZ, PUY, *et al.*, 2013)

Taxas de aquecimento elevadas (10 a 200°C/s), com tempos de permanência curtos (gás entre 0,5 a 2s) na zona quente e aquecimento rápido dos produtos (voláteis) favorecem a formação de produtos líquidos, com os voláteis liberados no processo de pirólise condensados antes de que a nova reação quebre as espécies de maior peso molecular em produtos gasosos. Deste modo, um combustível líquido com um valor calorífico mais elevado é obtido.

De fato, a pirólise rápida é reconhecida como uma via de conversão eficaz para a produção de combustíveis líquidos, produtos químicos e produtos derivados com rendimento mais elevado (geralmente cerca de 50-60% em peso por matéria-prima de borracha). É utilizada, por exemplo, na produção de bio-óleo a partir de biomassa vegetal. (MARTÍNEZ, PUY, *et al.*, 2013) (PARADELA RAMOS, 2012)

c) Pirólise Catalítica

Normalmente, pirólise catalítica é o nome dado a qualquer processo pirolítico, que compreende um material catalítico no mesmo processo, a fim de favorecer ou melhorar algum rendimento ou algumas propriedades dos produtos. Por exemplo, pirólise catalítica de pneu usado, tem sido conduzida para a produção de compostos aromáticos de anel simples na fração líquida, tais como o benzeno, o tolueno e o *m*-, *p*- e *o*-xileno, usando catalisadores de zeólito⁶ do tipo Y (e ZSM-5) (MARTÍNEZ, PUY, *et al.*, 2013)

Nas pesquisas de pirólise de pneus são utilizados vários catalisadores; os catalisadores mais usados são do tipo zeólito Y, ZSM-5 e Al₂O₃. (ANTONIOU e ZABANIOTOU, 2013)

Uma gama de diferentes reatores, tais como de leito fixo (por lotes), o parafuso de forno, forno rotativo, vácuo e leito fluidizado têm sido usados para a pirólise de resíduos de pneus.

⁶ Zeólito, são um tipo de catalizador aluminossilicato cristalino microporoso, utilizado nos processos de quebra (cracking) de hidrocarbonetos, e como qualquer catalizador, tem um papel determinante na forma como acontece o processo de quebra (cracking), assim como a composição final dos produtos.

2.3.2 Tipos de reatores na pirólise dos pneus usados.

a) Reatores de leito fixo

O reator de leito fixo é caracterizado por uma baixa taxa de aquecimento, como resultado do seu baixo coeficiente de transferência de calor. Portanto, quando uma maior massa de amostra é testada, a temperatura não é uniforme no interior da amostra e a matéria-prima decompõe-se a temperaturas diferentes ao mesmo tempo. Reatores de leito fixo foram principalmente usados para identificar os parâmetros que afetam os produtos da pirólise. Devido à sua ineficiência este reator raramente é adotado em instalações de maior tamanho. (CHEN, YIN, *et al.*, 2014)

Em escala laboratorial, a pirólise é geralmente levada a cabo num sistema reacional de leito fixo para fins de investigação. Um sistema de reação típica pode ser visto na Figura 2. 3. Tipicamente, algumas gramas de matérias-primas são colocadas dentro do tubo de reação, que é aquecida externamente por um forno elétrico. O forno controla a temperatura de pirólise, que é medida por um termopar ligado a um controlador de temperatura. Nitrogênio ou outro gás inerte é utilizado como um gás de arraste quando pirólise é investigada na escala de laboratório. Os produtos decompostos são transportados pelo gás de transporte a jusante e são processados, utilizando sistemas tais como um processo de reformação secundária ou condensação direta. (HESTER e HARRISON, 2013)

b) Reatores de parafuso sem fim e forno rotativo

Os reatores de funcionamento contínuo têm sido desenvolvidos para a pirólise dos resíduos de pneus. (WILLIAMS, 2013)

Um reator de parafuso sem fim, consiste num funil de carga, hermeticamente fechado para que seja mantida uma atmosfera inerte e devido ao parafuso sem fim, não apresenta problemas causados pela elevada viscosidade, já que não depende da gravidade.

Os reatores de parafuso sem fim, têm sido utilizados para o processamento contínuo, processamento que é considerado como um sistema de reação preferencial para a comercialização industrial. O reator helicoidal do forno têm o potencial de ser utilizado para o processamento de resíduos de plástico, os quais possuem características físicas e químicas e complexas. Além disso, o sistema de reação do reator de parafuso sem fim pode reduzir o excesso de craqueamento de matérias-primas e gera, comparativamente, uma gama estreita de produtos de petróleo que poderia facilmente ser reformada numa etapa a jusante para produzir

hidrogênio. Um diagrama esquemático do sistema helicoidal do forno de reação é mostrado na Figura 2. 4 (HESTER e HARRISON, 2013).

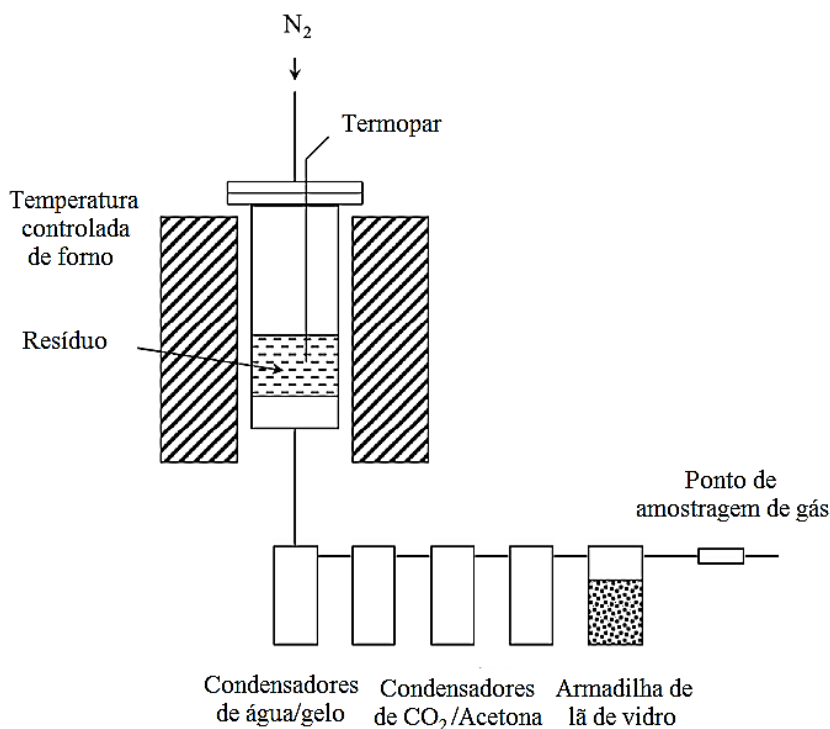


Figura 2. 3 Diagrama esquemático do sistema de reação de leito fixo (HESTER e HARRISON, 2013)

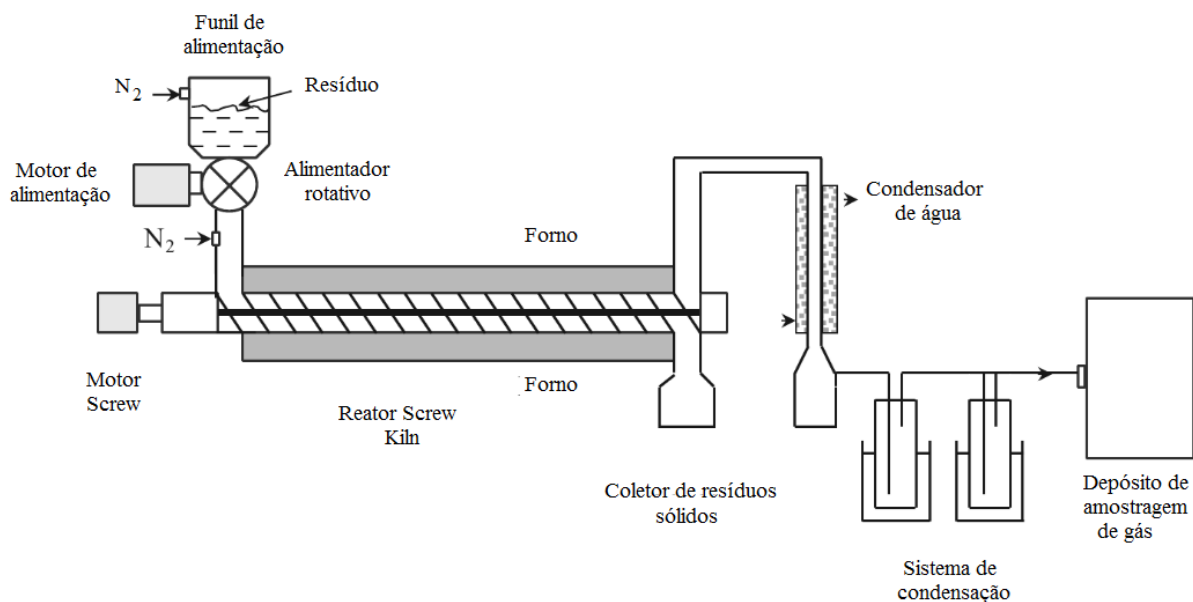


Figura 2. 4 Diagrama esquemático de um sistema de pirólise de parafuso sem fim (HESTER e HARRISON, 2013)

Na Figura 2. 4, as matérias primas são carregadas e continuamente alimentadas para dentro do reator de parafuso sem fim que é aquecida externamente. A pirólise ocorre no interior do reator e os resíduos são coletados por um sistema de recolha de char. Produtos gasosos derivados serão alimentados para processos a jusante tal como um sistema de condensação de óleo ou de um sistema de gaseificação de alta temperatura. O nitrogênio é normalmente utilizado como um gás de arraste no sistema de redução à escala de laboratório. O sistema de reação do reator de parafuso reportou-se como fácil de operar e de controlar; a temperatura de reação e o tempo de residência da amostra foram encontrados como os principais fatores que influenciaram a distribuição dos produtos (óleo e gás). (HESTER e HARRISON, 2013)

Os reatores de forno rotativo (*Rotary kiln*) foram usados principalmente para a eliminação dos resíduos de origem industrial, e só recentemente para a conversão de energia. Um forno rotativo é basicamente um cilindro feito de chapa de aço, geralmente com uma pequena inclinação (geralmente 1-10 °C) para promover o avanço do material, coberta internamente com um material refratário para proteger o revestimento de metal de temperaturas elevadas, um esquema deste reator é mostrado na Figura 2. 5. Quando o material é carregado, amortecedores especialmente preparados impedem a entrada e saída do gás durante a alimentação. No lado a jusante do reator, é uma câmara de combustão de produtos gasosos. (ZAJEC, 2009)

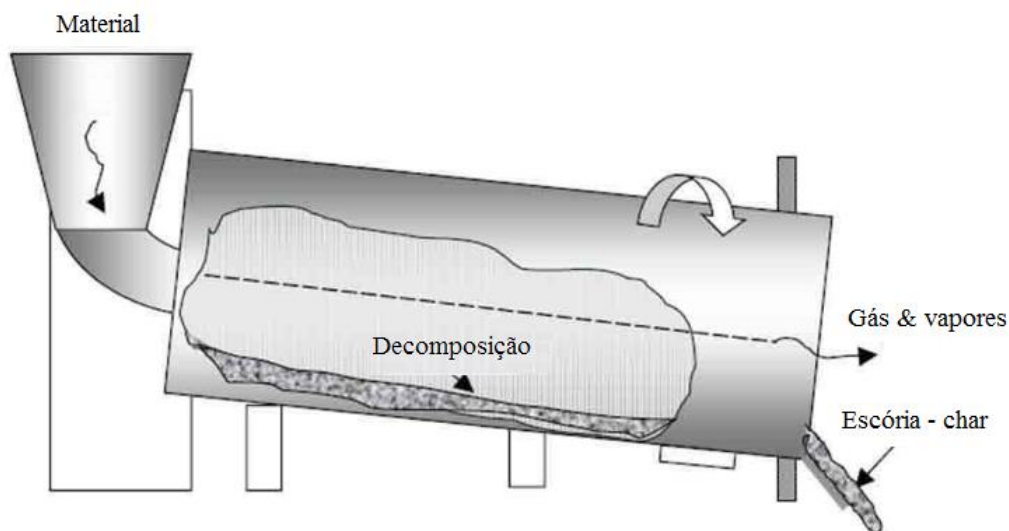


Figura 2. 5 Esquema de um Reator de forno rotativo (ZAJEC, 2009).

A troca de calor é mais rápida quando o material é situado diretamente em contato com a parede do forno aquecido. (ZAJEC, 2009)

c) Reatores leito fluidizado

A fluidização ocorre em meios compostos por partículas submetidas a um fluxo ascendente de fluido, quando o arrasto iguala ou ultrapassa o valor do peso das partículas. Antes dessa ocorrência, o meio passa pelos estágios de leito fixo, leito expandido e de fluidização incipiente, ou mínima (GEBARA, 2006). Estes tipos de reatores utilizam vasos contendo uma massa de partículas aquecidas, tais como areia inerte ou partículas catalisadoras. Estes tipos de reatores utilizam vasos contendo uma massa de partículas aquecidas, tais como areia inerte ou partículas catalisadoras, que são "fluidificadas" pela passagem de gás inerte ou gás de produto reciclado através do leito de partículas. Partículas de resíduos são injetadas em ou acima do leito de areia quente, por um alimentador de sólidos, tal como por um alimentador de parafuso ou alimentador sólido intermitente de *slug*⁷. (MARSHALL, 2013)

Os reatores de leito fluidizado (fluidized bed) Figura 2. 6, são mais difíceis de operar e, assim, os estudos em que foi utilizado um aparelho de pirólise de leito fluidizado são poucos. No entanto, os reatores de leito fluidizado têm as seguintes vantagens: tempo de residência longo que contribui para as reações secundárias e uma mais baixa taxa de aquecimento e temperatura que favoreçam a carbonização, que reduz o rendimento do óleo. A pirólise num leito fluidizado, como a pirólise rápida, é caracterizada por produzir diretamente um combustível líquido, o que é benéfico quando os recursos (pneus) são distantes de onde é necessária a energia, uma vez que o líquido pode ser facilmente armazenado e transportado. (ANTONIOU e ZABANIOTOU, 2013)

d) Outros tipos de reatores

Outros novos tipos de reatores de pirólise foram investigados para a pirólise de pneus, incluindo *spouted beds*, pirólise a vácuo, tubo de queda (*drop tube*) e malha de arame (*wire mesh*) e outros reatores de aquecimento rápido. (WILLIAMS, 2013)

O *spouted beds* é um tipo de reator de leito fluidizado com as vantagens de uma operação isotérmica, taxa de transferência de calor elevado, tempo de residência do gás reduzida, que minimiza reações secundárias e melhor interação de areia e sólido. Tem uma forte movimentação do leito, o que minimiza a aglomeração. (WILLIAMS, 2013)

Tal como o nome sugere, pirólise a vácuo é realizada a uma pressão total de cerca de 15 kPa, com o material em movimento num dispositivo quente de agitação (~ 450 °C). As partículas do material estão expostas a um tempo de residência longo para reagir completamente

⁷ Slug: O fluxo de uma bolsa de fluido em forma de bala numa massa não misturada. (SMITH e SCOTT, 2005)

(devido à baixa taxa de transferência de calor); enquanto que o tempo de residência do vapor (formado de material orgânico) é muito curta, devido a estar sob vácuo, as reações secundárias são reduzidas. A lenta taxa de aquecimento em menores quantidades de óleo, de 30 – 45 %m/m, em comparação com os valores reportados da tecnologia de leito fixo, com 70 %m/m (MARSHALL, 2013; RINGER, PUTSCHE e SCAHILL, 2006). A Figura 2. 7 ilustra a tecnologia de pirólise a vácuo.

A partir de resíduos de pneus granulados foram obtidos utilizando o seu sistema de pirólise a vácuo contínua ou semi-contínua em escala piloto, uma fração líquida de até 56,5 %m/m. A influência das condições de vácuo aumenta a difusão dos produtos voláteis formados no interior do pneu, devido ao gradiente de pressão no interior e no exterior da partícula; a difusão mais rápida dos gases voláteis reduz o tempo para reações secundárias (WILLIAMS, 2013).

Num reator de tipo tubo de queda (*Drop tube*), um pequeno e contínuo de fluxo de massa de partículas de combustível é alimentada ao longo de um fluxo de gás inerte de arraste, a um reator de tubo cilíndrico que está rodeado por várias unidades de resistência elétrica controláveis para produzir e manter condições isotérmicas ao longo do comprimento da zona de reação (LEHTO, 2007).

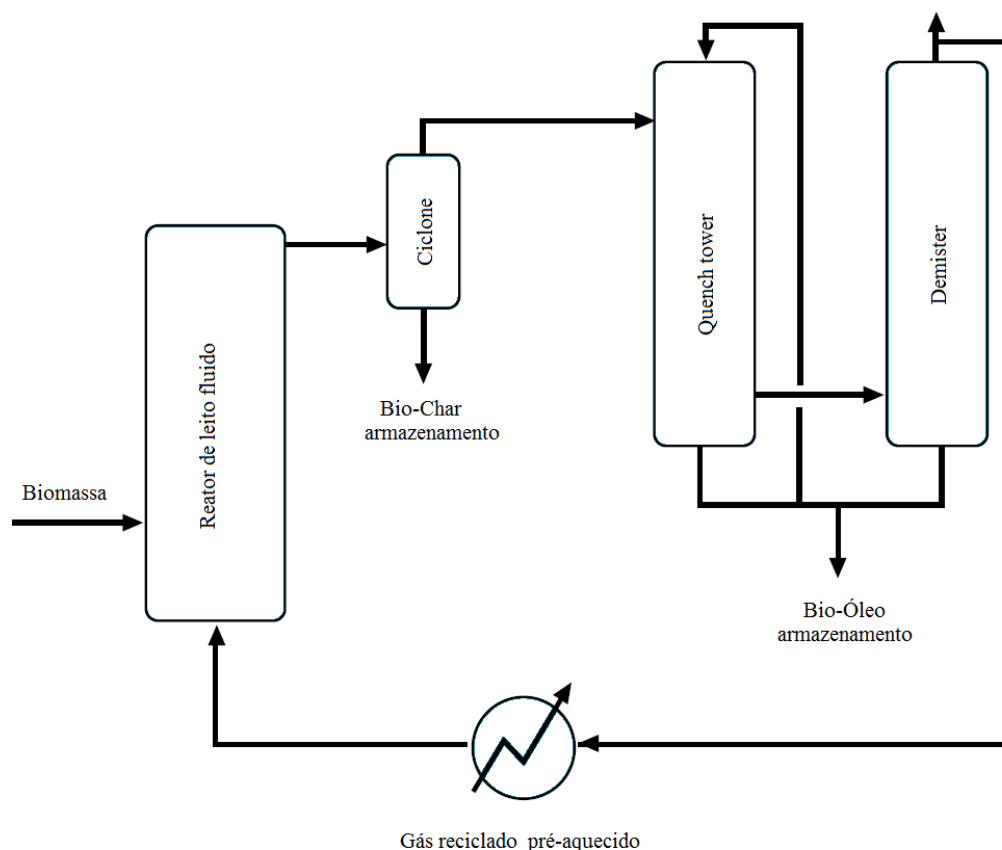


Figura 2. 6 Reator de Leito fluidizado de tecnologia (MARSHALL, 2013).

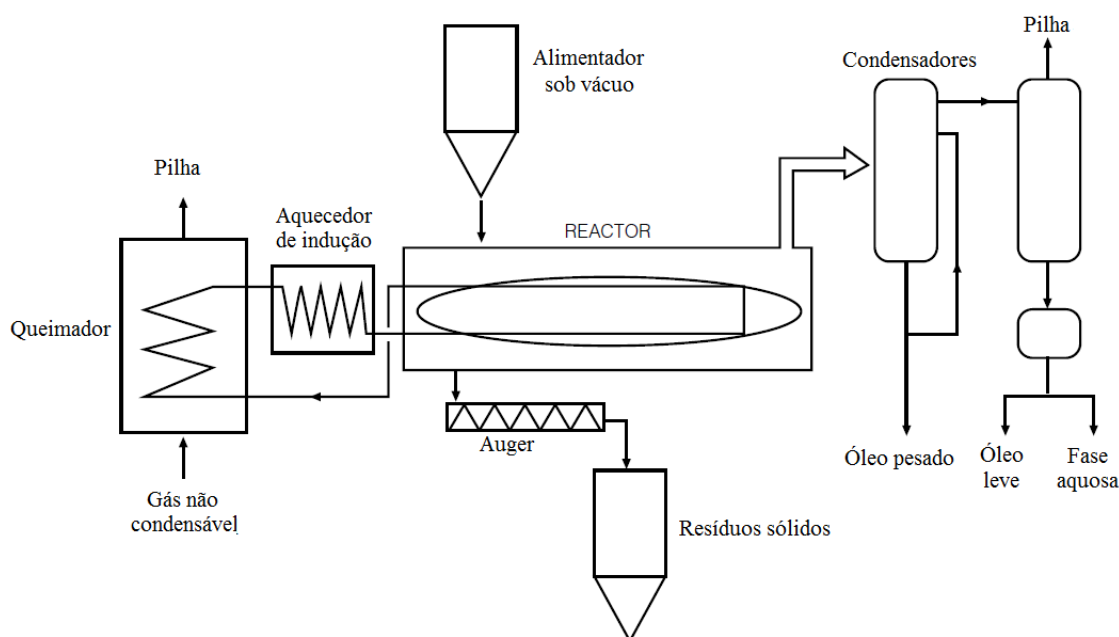


Figura 2. 7 Tecnologia do Reator a Vácuo (MARSHALL, 2013).

Em um reator de pirólise de tipo tubo de queda (*Drop tube*), as partículas de pneus foram alimentadas em lotes de 5 g num reator quente (450, 750 ou 1000 ° C de temperatura do reator) de 65,4 centímetros de altura. Um condensador sólido resfriado de CO₂ aprisiona os óleos. O aumento da temperatura de pirólise mostrou uma redução acentuada no rendimento do óleo de 37,8 %m/m a 450 °C, decrescendo para 10,9 %m/m a 750 °C e a menos de 0,01%_{m/m} a 1000 °C. O rendimento do Char sólido residual foi semelhante em cada temperatura (~ 37 %_{m/m}), resultando numa elevada conversão do pneu para gás de cerca de 63 %_{m/m} a 1000 ° C. (WILLIAMS, 2013).

Uma alta taxa de aquecimento na pirólise de pneu usando um sistema de micro reator de malha de arame (*wire mesh*) eletricamente aquecido, com uma corrente eléctrica sendo feita passar através da malha, o que rapidamente fez subir a temperatura (70 - 90 °Cs⁻¹) da malha até temperaturas de entre 390 e 890 °C. Com tal aquecimento rápido de partículas pequenas, houve um baixo rendimento de óleo de menos de cerca de 5 %_{m/m} e um rendimento elevado de gás, que aumentou de ~ 22 %_{m/m}, A 450 ° C até ~ 73 %_{m/m} em 860 °C. (WILLIAMS, 2013).

2.4 Combustão

Quando uma reação química ocorre, as ligações no interior das moléculas dos reagentes são quebradas, e os átomos e os elétrons são reorganizados para formar produtos. Nas reações de combustão, a rápida oxidação dos elementos combustível resulta na liberação de energia a

medida que os produtos de combustão são formados. Os três principais elementos químicos combustíveis presentes em combustíveis usuais são o carbono, o hidrogênio e o enxofre. (MORAN, SHAPIRO, *et al.*, 2013)

A combustão é uma oxidação rápida que gera calor, ou ambos, tanto calor como luz; ou também, uma oxidação lenta acompanhada por pequena liberação de calor e sem emissão de luz, podendo ser com chama ou sem chama (TURNS, 2013)

2.4.1 Principais compostos poluentes produtos da combustão.

O aumento da demanda de energia causado pelo incremento da industrialização global e a rápida taxa de esgotamento dos combustíveis fósseis, assim como os problemas meio ambientais relacionados com as emissões dos gases de efeito estufa, incentivaram a procura de fontes de energia alternativas, principalmente de recursos renováveis. (NSAFUL, GÖRGENS e KNOETZE, 2013)

Um dos principais problemas associados com a combustão é a produção de poluentes. Emissão de poluentes em uma combustão de um combustível orgânico em condições de mistura pobre, o hidrogênio é convertido completamente em vapor, é o carvão convertido predominantemente em dióxido de carbono com pequenas concentrações de monóxido de carbono. No entanto, dado o grau de dependência da natureza e a complexidade do fenômeno físico-químico das chamas, outros produtos da reação são formados, que podem contribuir para a ineficiência da combustão e/ou geração de poluição. Os mais significantes poluentes, produto da combustão são monóxido de carbono (CO), Hidrocarbonetos não queimados (UHC), óxidos de nitrogênio (NOx) óxidos de enxofre (SOx) e material particulado (PM). (WISSMILLER, 2009)

CO é um gás inodoro, incolor e sem gosto produzido pela combustão incompleta de hidrocarbonetos. Fontes internas comuns de CO incluem fogão a gás, lanternas de querosene e aquecedores, fumaça de tabaco, fogões a lenha e fontes de combustão sem ventilação ou mal ventilados. CO é um asfixiante químico. A inalação de CO provoca uma dor de cabeça latejante provocada porque CO tem uma preferência competitiva para a hemoglobina. O CO inibe o transporte de oxigênio no sangue através da formação de carboxiemoglobina, que torna a hemoglobina incapaz de capturar oxigênio e realizar assim a troca gasosa oxigênio × gás carbônico nos pulmões (GURJAR, MOLINA e OJHA, 2010; GARCIA, 2013).

O dióxido de carbono (CO₂) é o principal gás de efeito estufa emitido por meio de atividades humanas, com um GWP (Global Warming Potential) de 1. Em 2013, o CO₂ representou cerca de 82% de todas as emissões de gases com efeito de estufa dos Estados

Unidos por atividades humanas. O dióxido de carbono está naturalmente presente na atmosfera como parte do ciclo do carbono da Terra (a circulação natural do carbono entre os oceanos, atmosfera, solo, plantas e animais). As atividades humanas estão alterando o ciclo de carbono tanto pela adição de mais CO₂ na atmosfera como influenciando a capacidade de sumidouros naturais, tais como florestas, de remover o CO₂ da atmosfera. As emissões humanas são responsáveis pelo aumento que ocorreu na atmosfera desde a revolução industrial. (EPA, 2015)

Em concentrações entre 2500 a 5000 ppm, CO₂ pode causar dor de cabeça. Em níveis extremamente elevados de 100.000 ppm, as pessoas perdem a consciência em 10 min, e em 200.000 ppm, o CO₂ provoca fechamento parcial ou total da glote. (GURJAR, MOLINA e OJHA, 2010)

Os compostos, que contem nitrogênio, gerados pela combustão de maior preocupação são o óxido nítrico (NO), dióxido de nitrogênio (NO₂) e óxido nitroso (N₂O). O termo NO_x, geralmente refere-se aos dois primeiros compostos, ou quando são usados de forma mais ampla, refere-se aos três. NO é o mais estudado e, na maioria dos casos, o mais significativo dos três compostos. As concentrações de equilíbrio de NO dependem da temperatura e da estequiometria, (BAXTER, JENKINS e WINTER, 1995).

Capítulo 3

REVISÃO DO TRATAMENTO DOS PNEUS USADOS

3.1 Introdução.

O grande volume de pneus vendidos anualmente no mundo gera uma grande quantidade de pneus que são descartados após o uso. Por esta razão, algumas normas legais oferecendo o tratamento correto e responsável dos resíduos gerados em empresas de produção de pneus foram implementados.

Isso ocorreu devido ao difícil tratamento final destes resíduos, e por esta razão, existem algumas maneiras de descartar corretamente os pneus, dentre eles tem-se: utilização na fabricação de elementos de borracha, utilização na indústria de cimento, produção de asfalto e como fonte de energia mediante a queima direta ou através de um tratamento termoquímico para gerar um novo biocombustível (óleo pirolítico de pneus usados - OPPU).

A combustão é um processo de muita importância em nossa vida diária, trocando a energia contida na composição química de um combustível em calor, o qual pode ser transformada em outras formas de energia. É por isso a importância da queima do OPPU, como forma de dar uma destinação final aos pneus utilizados.

3.2 Processo de fabricação de pneus no Brasil e no mundo

3.2.1 Processo de fabricação de pneus

A fabricação dos pneus envolve muitas camadas de borracha, cordas têxteis e fitas de aço. Os pneus inservíveis são considerados combustíveis de alta qualidade, comparado ao carvão de melhor qualidade. Na Tabela 3. 1, se apresenta uma composição típica dos pneus.

Tabela 3. 1. Composição típica de pneus de passageiros e caminhões, (WILLIAMS, 2013)

Componente	Pneus de passageiros (%m/m)	Pneus de caminhões (%m/m)	Comentários
Borracha	47	45	São usadas muitas borrachas naturais e sintéticas, Exem. Borracha de estireno-butadieno, borracha natural (poliisopreno), borracha nitrílica, borracha de cloropreno, borracha de polibutadieno.
Negro de fumo	21,5	22	Serve para reforçar a borracha e ajudar com a resistência à abrasão.
Metal	16,5	21,5	Correias e cordões de aço para a força.
Têxtil	5,5	-	Usado como reforço.
Óxido de zinco	1	2	Utilizado (com ácido esteárico) para controlar o processo de vulcanização e para melhorar as propriedades físicas da borracha.
Enxofre	1	1	É utilizado para reticulado as cadeias poliméricas da borracha e também para prevenir o endurecimento excessivo e a deformação a temperaturas elevadas.
Aditivos	7,5	5	Por exemplo, argila ou sílica utilizada para substituir parcialmente o negro de fumo.

A quantidade de enxofre encontrada nos pneus está entre 0,5 e 2,0 %, ou seja, menor ou igual à maioria dos carvões e coque de petróleo. O mesmo ocorre com os hidrocarbonetos que compõem a borracha dos pneus, não são mais complexos ou difíceis de destruir que os

apresentados no carvão. Um dos empecilhos da utilização dos pneus são os níveis de metais pesados (principalmente enxofre, chumbo, cádmio e zinco) situam-se em faixas de concentração que permite que eles sejam incorporados ao clínquer⁸ (ARAÚJO COSTA e DA SILVA, 2005; WILLIAMS, 2013).

Resíduos de pneus têm uma composição complexa, o que os torna elementos difíceis de reciclar. Na Figura 3. 1 se apresenta a composição média típica de um pneu.

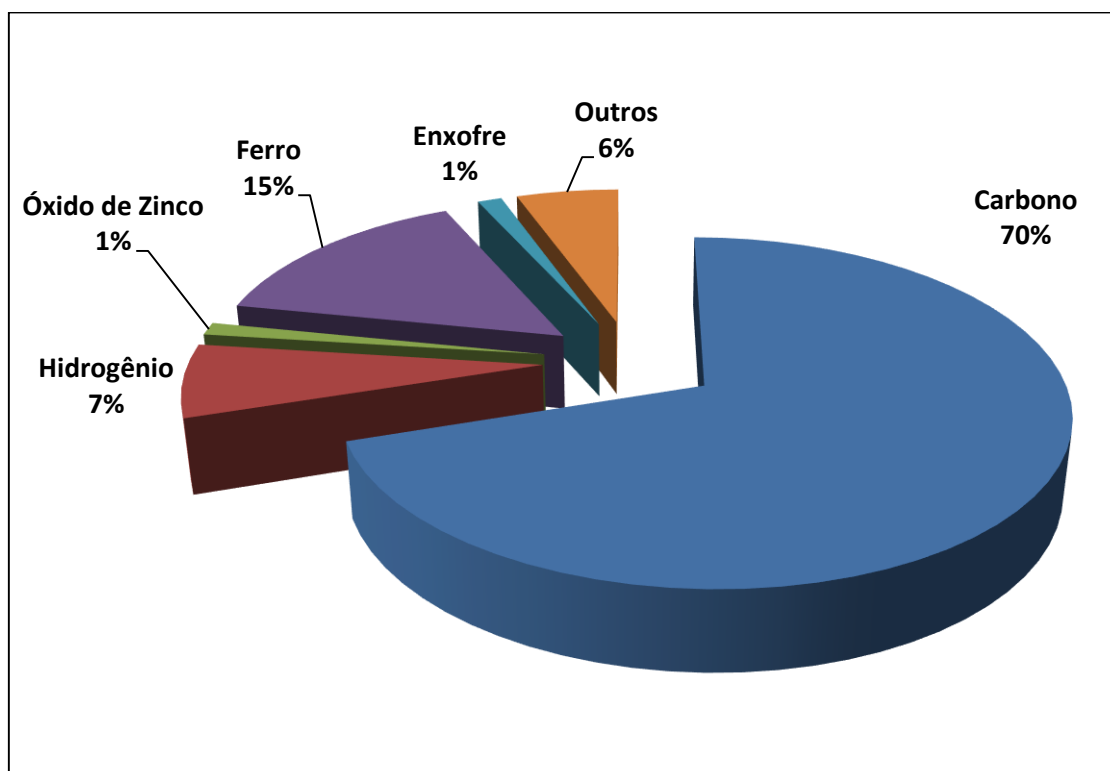


Figura 3. 1 Composição química elementar de um pneu (ANDRIETTA, 2002).

Fisicamente os pneus possuem os seguintes elementos: 1) **a banda de rodagem**, que dá ao pneu tração, frenagem, dirigibilidade, capacidade de dispersão de água e quilometragem satisfatória; 2) **lateral**, amortece parcialmente os impactos sofridos pela banda de rodagem e carcaça lateralmente contra impactos e fricções; 3) **talões**, ancora o pneu ao aro e evita seu deslizamento longitudinal; 4) **A carcaça**, de poliéster, suporta a carga e a pressão interna do pneu, além de receber e transmitir a força propulsora do motor do veículo ao solo; 5) **as faixas estabilizadoras de aço**, estabilizam a configuração ou forma do pneu, permitindo um melhor contato do pneu com o solo. Também protegem a carcaça contra

⁸ Clínquer triturado é o componente principal do Cimento Portland ordinário, e é produzido por sinterização de um conjunto de pedra calcária com sílica, alumina e materiais contendo óxido de ferro. Este processo resulta em uma multi-fase sólida que consiste de partículas (round micron-sized) em torno do tamanho do micrometro, de silicato de cálcio de duas composições químicas diferentes ((CaO)₃ (SiO₂) e (CaO)₂ (SiO₂)), imerso em uma matriz intersticial de aluminato e ferrite ((CaO)₃ (Al₂O₃) e (CaO)₄ (Al₂O₃) (Fe₂O₃)). (Ferrari, *et al*, 2012).

impactos, cortes e perfurações; **6) overlay**, limita e estabiliza o trabalho das faixas. Também minimiza o efeito de deformação no pneu causado pelas altas velocidades, fazendo com que a banda de rodagem se mantenha em contato com o solo. (THE GOODYEAR TIRE & RUBBER COMPANY, 2014). Tudo isto é mostrado na Figura 3. 2

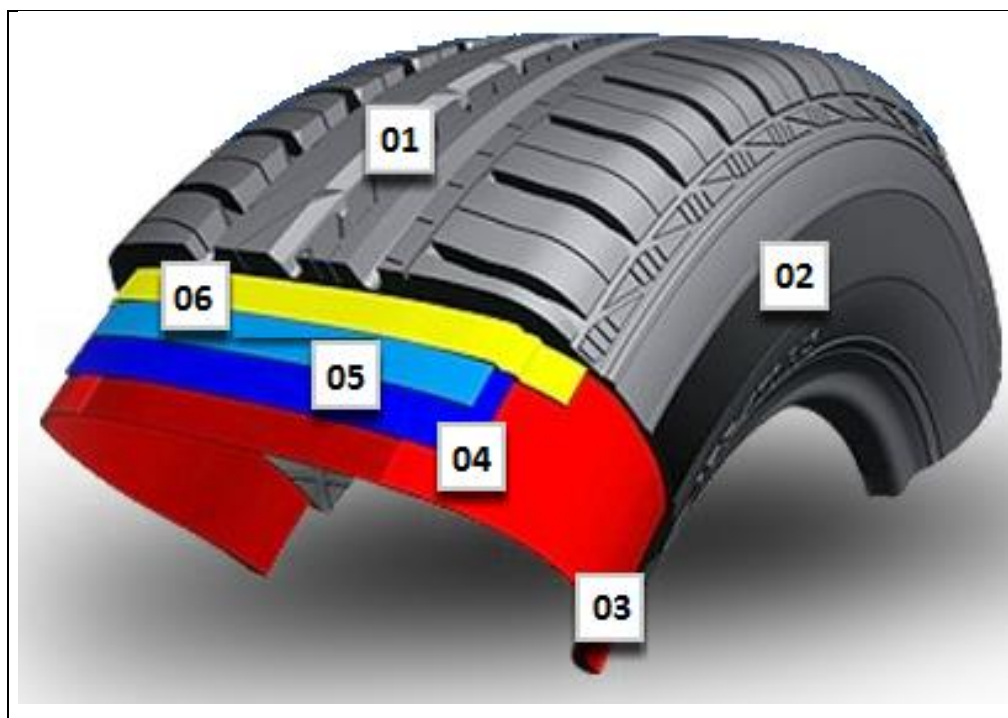


Figura 3. 2 Partes de um pneu (THE GOODYEAR TIRE & RUBBER COMPANY, 2014).

3.2.2 Produção de pneus

Anualmente 1,5 bilhões de pneus são vendidos no mundo, representando em torno de 20 milhões de toneladas. A principal opção utilizada para o tratamento de pneus descartados é através do uso destes como combustível em fornos de cimento, que respondem por mais de 1,5 milhões de toneladas do total de 3,3 milhões de toneladas de pneus inservíveis gerados a cada ano nos Estados Unidos (ETRMA, 2011). Outra opção de recuperação de energia para uso dos pneus inclui geração e co-incineração com outros resíduos que usam cerca de 0,1 milhões de toneladas de pneus por ano (WILLIAMS, 2013).

Em 2015, o Brasil teve um volume de vendas de 71,9 milhões de pneus de acordo com ANIP (Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos), como se mostra na Figura 3. 3 (ANIP, 2013).

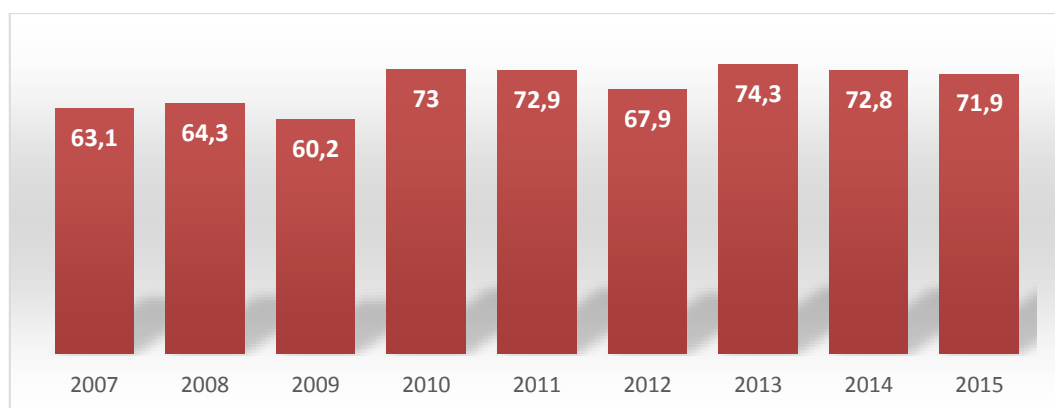


Figura 3. 3 Volume de Vendas em milhões de unidades (ANIP, 2013).

Os pneus produzidos mostrados na Figura 3. 3 no final da sua vida útil precisaram de uma correta destinação final, segundo a legislação atual ditada pelos organismos governamentais brasileiros. O número de pneus produzidos no Brasil por categoria é mostrado na Figura 3. 4.

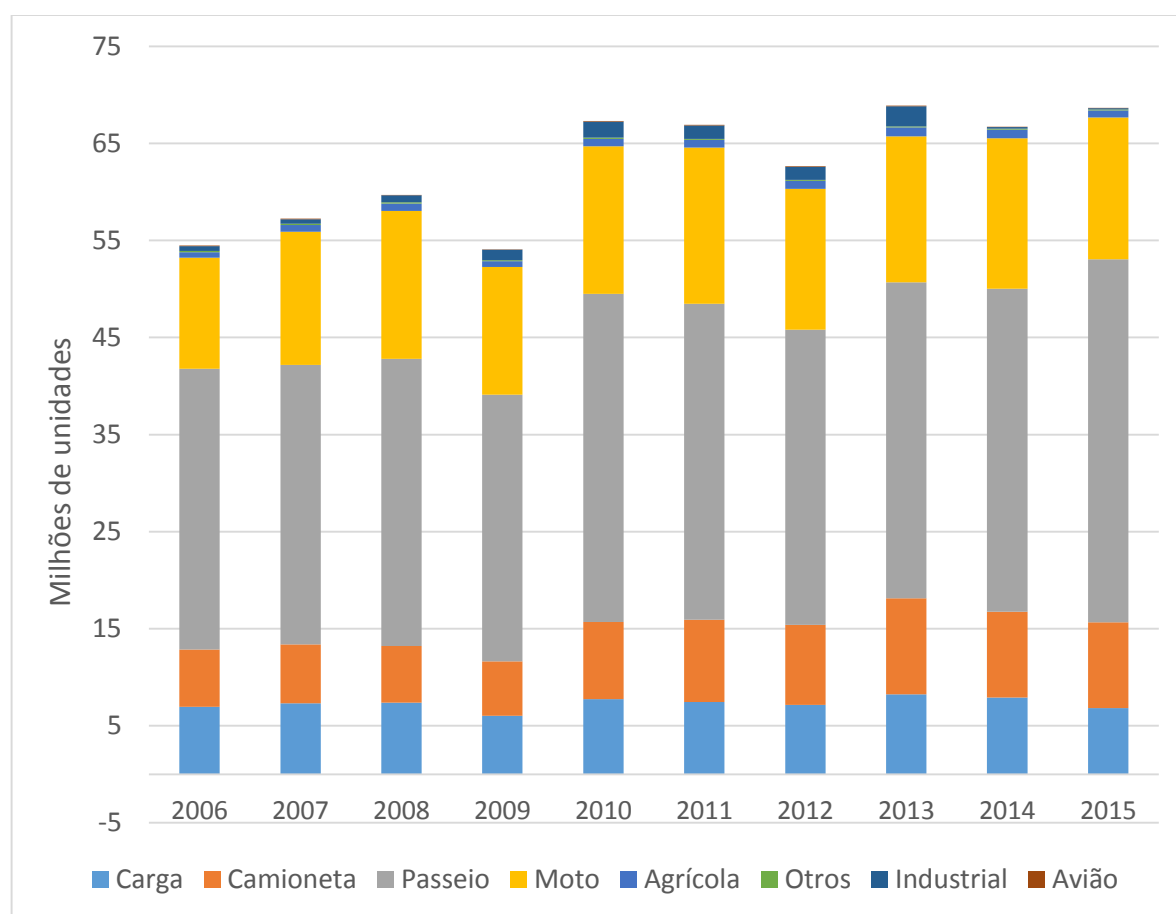


Figura 3. 4 Produção de pneus no Brasil por categoria, em milhões de unidades, (ANIP, 2013).

3.3 Descarte dos pneus usados

Na Europa, cerca de 3,3 milhões de pneus usados são gerados anualmente, dos quais cerca de 2,7 milhões de toneladas são levados para serem tratados e utilizados em outras aplicações, normalmente fora da indústria de pneus, devido a fatores de segurança e perda de propriedades dos mesmos (ETRMA, 2011).

Dentro da legislação da União Europeia (UE) foram definidas algumas metas para o tratamento dos resíduos. Entre eles, esteve previsto que até 2006 a quantidade de resíduos de pneus seria de 0% nos aterros sanitários (ETRMA, 2013). Para o efeito, as empresas agrupadas dedicadas à produção de pneus, a fim de realizar estes objetivos, fizeram gradualmente a aplicação progressiva destas metas nos países membros UE. A Figura 3. 5 mostra o progresso da implementação dessas políticas nos países membros da UE.

Cerca de 1,1 milhões de toneladas de pneus na União Europeia são usados como opções de recuperação de materiais através da produção de tapetes de borracha sobre os campos esportivos e parques infantis, blocos de pavimentação, coberturas, veículos, etc. Uma proporção significativa de resíduos de pneus são usados em aplicações de engenharia civil, como fundações e terraplanagem de estradas e ferrovias (0,24 milhões de toneladas) transformação subsequente (0,26 milhões de toneladas) ou exportação (0,33 milhões de toneladas) anualmente (WILLIAMS, 2013).

A taxa de recuperação de resíduos de pneus no mundo aumentou significativamente, mas as taxas de recuperação são mais elevadas na UE do que nos Estados Unidos da América, Japão e Coreia do Sul, como é mostrado na Figura 3. 6. (ETRMA, 2013)

Em 2012, a produção de pneus na Europa e na Turquia atingiu o montante de 4,6 milhões de toneladas, o que representa um decréscimo de 5% em relação a 2011. Estima-se que este valor representa 21% da produção mundial de pneus. (ETRMA, 2013)

Na constituição Federal Brasileira de 1988, no Art. 225, as questões ambientais são consideradas como patrimônio nacional e das futuras gerações. Além de garantir a proteção e recuperação de espécies e ecossistemas, também controlar as substâncias que constituem risco para a qualidade de vida e o meio ambiente. (SENADO FEDERAL, 2014). Estas obrigações são de competência conjunta do Governo Federal, dos Estados e dos Municípios. (DE OLIVEIRA e DE CASTRO, 2007)

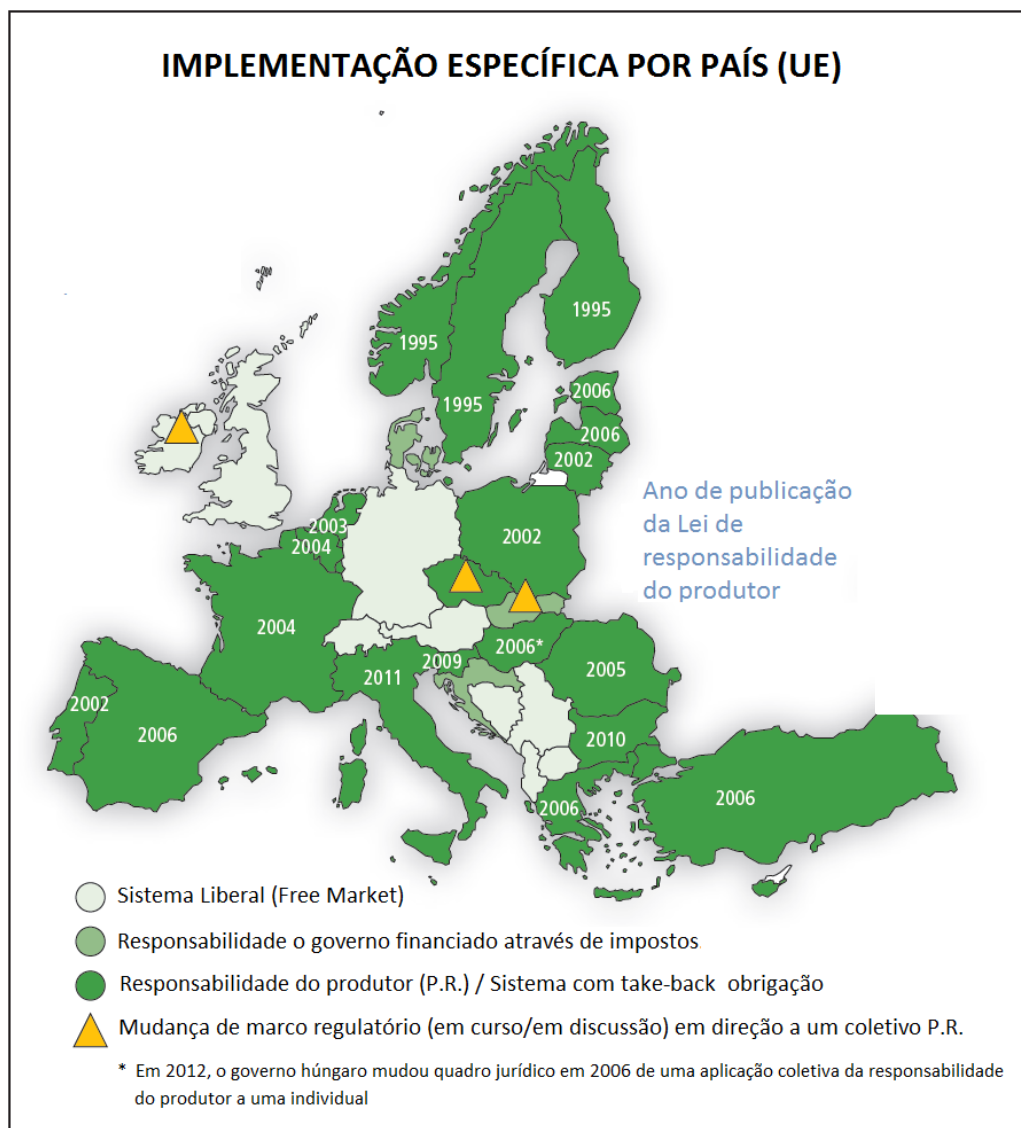


Figura 3. 5 Implementação específica por país (EU), (ETRMA, 2013).

A resolução N° 416, de 30 de setembro de 2009 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), regula o destino de pneus usados, para o qual estabelece que para cada pneu novo comercializado para o mercado de reposição, as empresas fabricantes ou importadoras deverão dar destinação adequada ao pneu inservível.

Também os fabricantes e os importadores de pneus novos deverão implantar, nos municípios acima de cem mil habitantes, pelo menos um ponto de coleta.

Além disso, os estabelecimentos de comercialização de pneus são obrigados, no ato da troca de um pneu usado por um pneu novo ou reformado, a receber e armazenar temporariamente os pneus usados entregues pelo consumidor e deve cumprir com a disseminação de pontos de coleta de pneus, que é responsável pelo RECICLANIP, uma

entidade voltada exclusivamente para a coleta e destinação de pneus no Brasil (RECICLANIP, 2013).

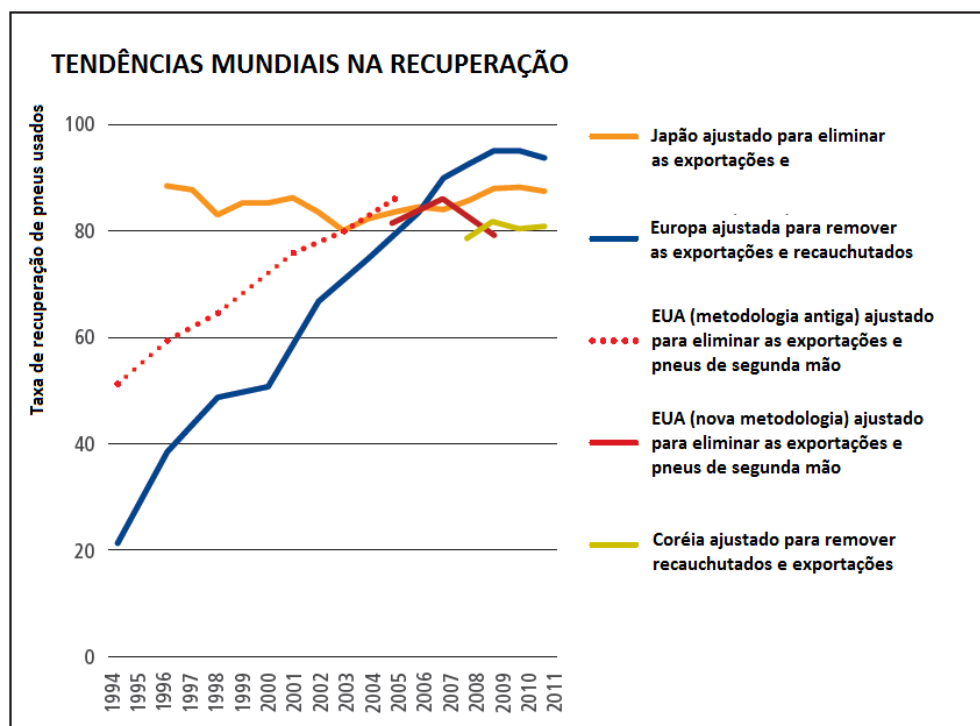


Figura 3. 6 Tendências mundiais na recuperação, (ETRMA, 2013).

3.4 Alternativas energéticas para uso de pneus inservíveis

Atualmente, os pneus inservíveis coletados são alocados para um processo de trituração e podem ser reutilizados de várias formas, inclusive como combustível alternativo na indústria de cimento ou caldeiras na fabricação de asfalto, solas de sapato, carimbos de borracha, tubulações de águas de chuva, pisos de quadras esportivas, pisos industriais e tapetes dos carros, etc. (SCAGLIUSI, 2011).

As tecnologias de destinação ambientalmente praticadas pelas empresas destinadoras no Brasil são:

a) Co-processamento

Utilização dos pneus inservíveis em fornos de clínquer como substituto parcial de combustíveis e como fonte de elementos metálicos.

b) Laminação

Processo de fabricação de artefatos de borracha.

c) Granulação

Processo industrial de fabricação de borracha moída, em diferente granulometria, com separação e aproveitamento do aço.

d) Industrialização do Xisto

Processo industrial de co-processamento do pneumático inservível juntamente com o xisto betuminoso, como substituto parcial de combustíveis.

d) Pirólise

Processo de decomposição térmica da borracha conduzido na ausência de oxigênio ou em condições em que a concentração de oxigênio é suficientemente baixa para não causar combustão, com geração de óleos, aço e negro de fumo. (IBAMA, 2016)

No Brasil, o destino final das tecnologias de pneus usados e sua porcentagem, para os anos 2012, 2013 e 2014 foram tomados dos relatórios de pneumáticos anuais elaborado pela IBAMA e mostrados na Tabela 3. 2.

Tabela 3. 2. Tecnologia destino final e quantidade total de pneus inservíveis destinados, (IBAMA, 2016)

Tecnologia	Destinação (t)			Percentual pais		
	2012	2013	2014	2012	2013	2014
Coprocessamento	219269,09	267448,35	300510,7	47,77%	54,40%	55,17%
Granulação	168499,14	165574,82	189699,79	36,71%	33,68%	34,83%
Laminação	61115,93	43839,44	54168,63	13,31%	8,92%	9,94%
Industrialização do Xisto	9810,00	14700,00	-	2,14%	2,99%	0,00%
Pirólise	336,03	72,94	-	0,07%	0,01%	0,00%
Regeneração de borracha	-	17,47	316,28	0,00%	0,00%	0,06%
Total	459030,19	491653,02	544695,39	100%	100%	100%

A seguir se apresentam uma breve descrição das duas principais alternativas:

3.4.1 Utilização dos resíduos de pneus na indústria de cimento (co-processamento).

A prática mais comumente utilizada, não somente no Brasil, mas no mundo todo é a opção de utilização de resíduos de pneus como um substituto do coque de petróleo em fábricas de cimento. A principal desvantagem é a compra de pneus para fazer uso dos resíduos.

Considerando-se a situação da indústria de cimento em constante expansão e a necessidade de utilizar combustíveis mais baratos, o co-processamento surgiu como uma grande oportunidade alternativa de negócio para o setor. O preço é ainda cinco a dez vezes mais barato do que as formas convencionais de incineração. O preço para incineração varia entre US\$ 1.000,00 e US\$ 3.000,00 por tonelada, dependendo do tipo de eliminação do resíduo disposição em aterros sanitários pode custar US\$ 150,00 por tonelada. A queima em fornos de cimento varia entre US\$ 100,00 e US\$ 700,00 (LAMAS DE QUEIROZ, PALAU FORTES e DE CAMARGO, 2013).

A produção de cimento Portland começa com a extração de matérias-primas, sendo calcário o principal componente. Depois disso, a cal é misturada com outros elementos, tais como a argila, o ferro, silício e o alumínio. Esta mistura é enviada para o forno onde é aquecida a uma temperatura entre 1200 e 1500 °C para se obter um material parcialmente fundido e a formação de grânulos de clínquer. Este material é resfriado e misturado com pequenas quantidades de outros ingredientes, tais como o gesso e a escória de alto-forno, e depois moído para produzir cimento Portland.

Esta indústria é considerada de alto consumo de energia, uma vez que é necessário atingir elevadas temperaturas durante o processamento. Combustíveis tradicionais, como o carvão, o óleo combustível e o coque de petróleo (pneus inservíveis) são usados para neste fim (LAMAS DE QUEIROZ, PALAU FORTES e DE CAMARGO, 2013).

O co-processamento nas fábricas de cimento é uma técnica que permite a queima de resíduos em fornos de cimento, fazendo uso deles para a queima em duas formas: reaproveitamento da energia, utilizando o material como substituto de combustível, ou reutilização como substituto da matéria-prima, de modo que o resíduo de pneu tenha características desejáveis ou semelhantes com os compostos utilizados na produção de clínquer (PARRA V., DO NASCIMENTO B. e FERREIRA L., 2010)

Um dos principais resíduos aproveitados no co-processamento são os pneus inservíveis. O destino final em fornos de cimento é uma opção para descartar uma grande quantidade de pneus inservíveis, tanto inteiro e triturado. Um único forno com capacidade de produção de 1.000 toneladas /dia pode consumir até cinco mil pneus por dia, de forma segura e eficiente. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2014)

A indústria brasileira de cimento é composta por 14 grupos industriais, que atendem 80 unidades de produção espalhadas por todo o país, destes, 36 são licenciadas para co-processamento de resíduos, nestas unidades podem ser queimadas de forma adequada diversos resíduos, entre eles os pneus usados. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2014)

Neste cenário, o Sudeste (São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Espírito Santo) é o que possui o maior número de instalações licenciadas para co-processamento (17 no total), que representa 33% das fábricas licenciadas para esta atividade que, por sua vez, é regulada nos níveis federal e estadual. Os estados que têm os seus próprios regulamentos são os estados de Minas Gerais, Paraná, Rio Grande do Sul e São Paulo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2014)

Um exemplo disso é a planta localizada no Estado do Paraná em Balsa Nova com uma capacidade de produção instalada de 1,5 milhões de toneladas de cimento por ano e usando o co-processamento a partir de 1993. (LAMAS DE QUEIROZ, PALAU FORTES e DE CAMARGO, 2013)

3.4.2 Uso da pirolise utilizando resíduos de pneus

Desde 1998, a Petrobras instalou uma usina de reprocessamento conjunto de xisto e de resíduos de pneus para produzir petróleo e gás como combustível, através do processo PETROSIX, tecnologia desenvolvida pela própria empresa e reconhecida no mundo inteiro. Esta unidade está localizada sobre a maior reserva de xisto do Brasil, a Formação Irati, que abrange os estados de Mato Grosso do Sul, Goiás, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul indo além da fronteira com o Uruguai. A partir da Unidade de Industrialização do Xisto de São Mateus do Sul são extraídos, diariamente 7 800 toneladas de xisto. Consequentemente há geração do subproduto sólido (chamado de xisto retornado) que representa de 80 a 90 % de todo o xisto bruto do processo de extração de petróleo (NICOLINI, 2011; ANDRIETTA, 2002; DE LACERDA P., 2001).

A Petrobras resolveu transformar esta planta industrial também num centro avançado de pesquisa. O co-processamento de pneus usados com xisto segue os mesmos estágios que o processamento do xisto pirobetuminoso⁹. O pneu é cortado em pedaços de aproximadamente 100 x 100 mm e misturados com xisto, para depois serem alimentados pelo topo de um reator pirolítico cilíndrico vertical, onde a mistura é aquecida até cerca de 500 °C. Em condições de elevada temperatura, o mineral libera a matéria orgânica na forma de óleo e gás. Em seguida, o xisto e a borracha são resfriados e em consequência acontece a condensação dos vapores do óleo na forma de gotículas, que então constitui o óleo pesado.

Após a remoção do óleo pesado, os gases e xisto passam por outro processo de limpeza para a produção de óleo leve. O restante é levado para outra unidade onde o gás combustível é obtido (gás combustível) e gás liquefeito de petróleo (GLP), além da recuperação de enxofre. A mistura remanescente dos pneus e xisto é trazido para os poços de minas e coberto com uma camada da argila e do solo, permitindo a recuperação do meio ambiente. O fio de aço é reciclado para a indústria siderúrgica. Esta planta tem uma capacidade instalada de processamento de 27 milhões de unidades de pneus por ano. (DE LACERDA P., 2001; ANDRIETTA, 2002; LABORNE M., MONTEIRO, et al., 2009; NICOLINI, 2011). Este processo é mostrado na Figura 3. 7.

A Unidade de Negócio de Industrialização do Xisto (SIX) é responsável pela exploração e processamento do xisto betuminoso, minério que, ao ser aquecido, libera matéria orgânica em forma de óleo e gás. Uma importante característica desse processo, denominado Petrosix, é a possibilidade de adição de pneus inservíveis, junto à carga de xisto a ser processada, em volume de até 5% da carga total. Desde que a tecnologia foi implementada em 2001, na Unidade de Negócio de Industrialização do Xisto, até 2009, mais de 11 milhões de pneus foram reciclados. (PETROBRAS, 2009)

O processo PETROBRAS/SIX (PETROSIX), garante que esta forma de destinação final de pneus é o mais vantajoso, pois tem um custo menor, porque PETROSIX cobra US\$ 28,2

⁹ Xisto pirobetuminoso é uma rocha que contém certa quantidade de material orgânico que, quando aquecida, na ausência de oxigênio, libera óleo, água e gás. O material orgânico dos xistos pirobetuminosos é uma mistura de hidrocarbonetos de pesos moleculares muito elevados, denominada de querogênio, que a temperaturas ambiente encontra-se no estado sólido.

Nos xistos pirobetuminosos o querogênio é predominante, contudo pequenas quantidades de betume são, também, encontradas. Na natureza os xistos do tipo betuminoso são encontrados em menores proporções, cerca de 10 % do total de depósitos de xisto são de tipo betuminoso, os demais são do tipo pirobetuminoso. (ARAÚJO COSTA e DA SILVA, 2005)

(taxa de cambio 2002) pela destruição de uma tonelada de pneus, a indústria do cimento cobra cerca de US\$ 100,00 (SCAGLIUSI, 2011).

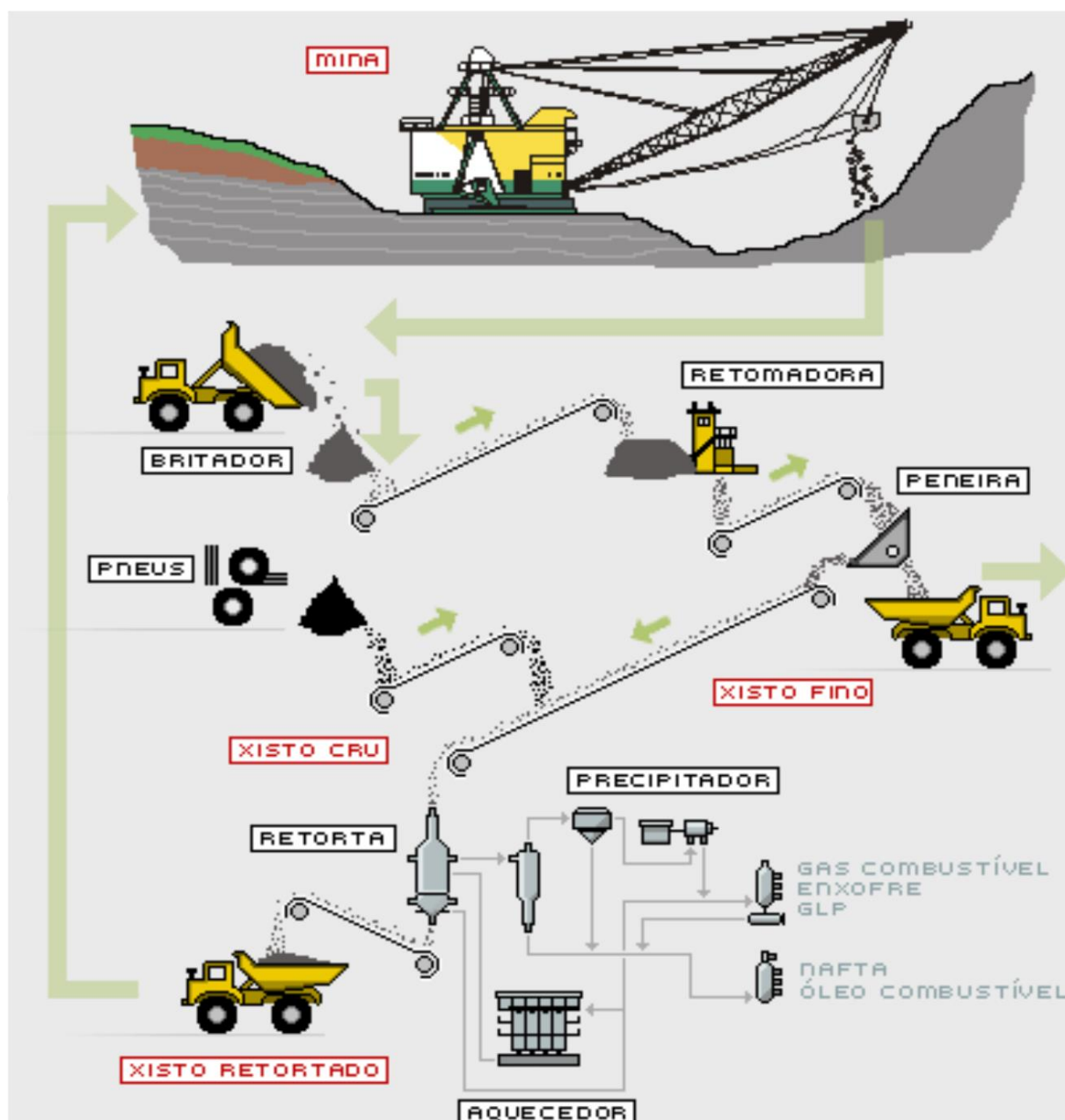


Figura 3. 7 Processo PETROSIX de reciclagem do pneus (RESENDE LIMA , 2004).

Outra maneira de aplicar a pirólise de pneus usados no Brasil, é por meio da conversão a baixa temperatura (LTC, por sua sigla em Inglês), com a qual é obtido predominantemente uma fração líquida (PARRA V., DO NASCIMENTO B. e FERREIRA L., 2010) A empresa que faz este processo é a Senergen Energia Renovável, localizado na cidade de Lorena, SP usando um reator com capacidade de 12 m³ por dia (SENERGEM, 2011).

3.5 Caracterização físico – química do óleo pirolítico de pneu usado

A pirólise é uma decomposição termoquímica de biomassa em uma gama de produtos úteis, com uma total ausência de agentes de oxidação ou com uma quantidade limitada que não permite algum grau apreciável de gaseificação. Durante a pirólise, as moléculas longas e complexas de hidrocarbonetos da biomassa se quebram em moléculas relativamente pequenas de gás, líquido e de char (BASU, 2010).

3.5.1 Processo de pirólise de pneus

As maiorias dos processos de pirólise operam entre uma faixa de temperatura de 250-500 °C, embora alguns processos foram reportados até 900 °C. A temperaturas acima dos 250 °C, pneus fragmentados em pequenos pedaços geram grandes quantidades de líquidos e gases, acima de 400 °C a quantidade de sólidos e líquidos diminui em comparação com a produção de gás (ANTONIOU e ZABANIOTOU, 2013).

A fim de se obter uma maior quantidade do produto líquido, a pirólise rápida ou catalítica é usada.

3.5.2 Parâmetros de operação da pirólise de pneus

A composição do produto final a partir da pirólise depende de muitos fatores, tais como visto na Tabela 3. 3.

a) Temperatura

A quantidade de gás presente derivado da pirólise aumenta com a temperatura, provocando assim um aumento da fração com cadeias C₄-C₁. Quando a temperatura aumenta de 425 °C a 600 °C, a fração acima de C₁₀+ aumenta significativamente a partir de 13,1 %m/m até 22,9 %m/m, isto é causado pela reação de Diels-Alder, que favorece a formação de compostos aromáticos a partir de olefinas.

A fração líquida é mais estável a 500 °C, diminuindo a temperaturas mais elevadas. A fim de se obter uma maior quantidade de produto líquido, a pirólise rápida ou catalítica é usada. (ANTONIOU e ZABANIOTOU, 2013).

b) Taxa de aquecimento

A matéria-prima é aquecida a uma determinada taxa de aquecimento a uma temperatura na qual a quantidade máxima de óleo, gás e carvão são produzidos. A taxa aquecimento tem pouca influência sobre os produtos finais da pirólise.

A certas temperaturas a produção das frações de benzeno, pentano-2 e metanol aumenta, conseqüentemente, a produção das frações de 1-pentano e de etanol diminui. A uma temperatura específica o conteúdo do poder calorífico do gás aumenta com a taxa aquecimento.

Altas taxas de aquecimento geram gás como o principal produto, enquanto que a baixas taxas de aquecimento se produz grande quantidade de carvão e gás. Para altas taxas de aquecimento, o produto líquido diminui (*flash-rotary, kiln-fluidized bed*), enquanto isso não ocorre em moderada taxa de aquecimento. (ANTONIOU e ZABANIOTOU, 2013)

c) Tamanho da partícula

O tamanho de partícula não influencia em grande medida os produtos da pirólise, no entanto, as partículas muito grandes produzem uma maior quantidade de óleo, a uma temperatura mais elevada, enquanto que a quantidade de negro de fumo é constante para as mesmas condições. (ANTONIOU e ZABANIOTOU, 2013).

d) Composição do OPPU

Sabe-se que os pneus descartados têm alto teor de voláteis, alto teor de cinzas e poder calorífico superior ao do carvão e da biomassa tradicional. E por isso ideal para a pirólise e combustão, bem como para gaseificação (LEUNG, YIN, *et al.*, 2002).

Como pode ser visto na Tabela 3. 3, o óleo pirolítico de pneus usados (OPPU) tem um poder calorífico comparável os dos combustíveis fósseis, em comparação ao querosene, diesel e óleo combustível leve, fazendo interessante o seu uso em motores de combustão interna. (MARTÍNEZ, PUY, *et al.*, 2013)

È também observado um alto teor de enxofre na composição do OPPU, em comparação com os outros combustíveis apresentados na Tabela 3. 4. A presença de enxofre, tem repercussão na geração de poluentes relacionados aos óxidos de enxofre.

Tabela 3. 3. Composição dos produtos a diferentes condições, (ANTONIOU e ZABANIOTOU, 2013)

Tipo de reator	T °C	Tempo de residência	Gás (%m/m)	Óleo (%m/m)	Negro de fumo (%m/m)
Forno rotativo	550	30 min	67	-	33
Leito fixo	400-460	-	2,8-17	36-62	31,6-51
Leito fixo	700	5 min	-	-	36
Leito fixo	1000	120 min	-	-	-
Leito fixo	300-700	30 min	7,6-19	4,8-38,5	44-84
Leito fixo	1000	1 min	-	-	-
Leito fixo	550-800	60 min	7,4-7,8	47,2-48,4	41,5-42
Leito fixo	550-800	60 min	7,6-8,8	55,1-56	33,2-33,8
Leito fixo	500	30 min	16-25	35-44	39-40
Leito fixo	425-610	-	1-3,5	25-31	32-33
Leito fixo	500	150 min	-	-	-
Leito fixo	350-550	15 min	20-29	30-38	33-50
Leito fixo	350-450	5-30 min	4	54	42
Leito fixo	720	120 min	-	-	-
Leito fixo	570	60 min	4,3	57,1	38,7
Leito fixo	300-720	120 min	2,4-14,8	3,6-58,8	26,4-94
Leito fixo	390-890	-	5-73	01/mar	20-92
Leito fixo	400-700	120 min	2,4-4,4	30-42,8	51,3-64
Leito fluidizado	400-500	-	-	-	-
Leito fluidizado	360-810	1,5 seg.	8 - 40	30-52	27-40
Ablativo contínuo ¹⁰	550	0,6 seg.	-	-	-
Ablativo contínuo	550	0,6 seg.	-	-	-
Flash	500-700	-	-	-	-
Catalítico	430	-	16	33,6	50,4
Catalítico	500	30 min	16-47	10 -46	37
Catalítico	300-400	-	0,4-16,6	1,8-28,2	55,6-96
Catalítico	700	-	-	-	-
Plasma	1500	10 min	-	-	40-76,8

¹⁰ Ablação caracteriza os fenômenos que ocorrem quando um sólido, submetida a uma alta densidade de fluxo de calor externo, dá origem a sólidos, líquidos e / ou gases que possam ser rápida e continuamente gerados. A ablação pode ser explorada para a realização da pirólise rápida de materiais, tais como pneus. Pneus são pressionados contra uma superfície quente (pirólise ablativo de contato) ou interceptar uma radiação concentrada (pirólise ablativa radiante).

Tabela 3. 4 Propriedades físico-químicas do OPPU em comparação com combustíveis tradicionais.

Propriedades	OPPU ^a	Querosene ^b	Diesel ^b	Óleo combustível leve ^b
Ponto de ignição (°C)	20	40	75	79
Resíduos do carbono (%)	2,2	--	<0,35	--
Massa específica (kg.l ⁻¹)	0,91	0,84	0,78	0,89
Viscosidade (cSt) a 40°C	6,3	1,2	3,3	21
Carbono (%m/m)	88	--	87,1	85,5
Hidrogênio (%m/m)	9,4	13,6	12,8	12,4
Nitrogênio (%m/m)	0,45	--	0,05	0,15
Enxofre (%m/m)	1,5	0,1	0,9	1,4
Oxigênio (%m/m)	0,5	--		--
Poder calorífico (MJ.kg ⁻¹)	42	46,6	46	44,8
Cinzas (%m/m)	0,002	--	0,01	0,02
Umidade (vol %)	4,6	--	0,05	0,1

^a Williams, 2013 (WILLIAMS, 2013); ^b Harker, J.H., Backhurst, 1981 (HARKER e BACKHURST, 1981)

Capítulo 4

TERMODINÂMICA DA COMBUSTÃO DO OPPU E ATOMIZAÇÃO DE LÍQUIDOS COMBUSTÍVEIS

4.1 Introdução

No presente capítulo mostram-se os princípios e cálculos referidos ao processo da atomização, antes se definem os conceitos acerca da termodinâmica da combustão e o cálculo destes principais parâmetros e depois se continua com o estudo dos principais conceitos de atomização e o projeto dos injetores.

4.2 Termodinâmica da Combustão

A combustão é uma reação de oxidação de substâncias combustíveis que consiste na troca e/ou rearranjo de átomos entre as moléculas dos reagentes, que colidem de forma rápida ou lenta no decurso da reação química sendo reorganizadas para tornar-se em moléculas dos produtos, ao mesmo tempo que acontece uma liberação de calor. Os átomos e as moléculas são convenientemente contados em termos de quantidade de substância (TURNS, 2013; WARNATZ, MAAS e DIBBLE, 2006).

Os três principais elementos químicos na maioria dos combustíveis comuns são o carbono, hidrogênio e enxofre. O enxofre é normalmente um contribuinte relativamente pouco importante para a energia liberada, mas pode ser uma significativa causa de poluição e problemas de corrosão (MORAN, SHAPIRO, *et al.*, 2013)

4.2.1 Combustão completa

Um processo de combustão é completa se todo o carbono do combustível é convertido em CO_2 , todo o hidrogênio é convertido em H_2O e todo o enxofre (se houver) é transformado em SO_2 . Isto é, todos os componentes de um combustível são queimados completamente durante um processo de combustão completa. (ÇENGEL e BOLES, 2009)

Para uma combustão completa as quantidades respectivas dos produtos pode ser determinada pela aplicação do princípio da conservação de massa com a equação química. O procedimento para obtenção da equação de reação equilibrada de uma reação real onde a combustão é incompleta não é sempre simples. (MORAN, SHAPIRO, *et al.*, 2013)

A combustão é o resultado de uma série de reações químicas complicadas e rápidas, e os produtos formados dependem de muitos fatores. Por exemplo, quando o combustível é queimado no cilindro de um motor de combustão interna, os produtos da reação variam com a temperatura e a pressão no cilindro. Em equipamentos de combustão de todos os tipos, o grau de mistura, do combustível e do ar é um fator de controle nas reações que ocorrem quando a mistura de combustível e ar é queimada. Embora a quantidade de ar fornecido em um processo de combustão real possa exceder a quantidade teórica, não é incomum, que algumas quantidades de monóxido de carbono e oxigênio não queimado apareçam nos produtos. Isto pode ser devido a uma mistura incompleta, tempo insuficiente para a combustão completa, e outros fatores. (MORAN, SHAPIRO, *et al.*, 2013)

Quando a quantidade de ar fornecido é menor do que a quantidade teórica de ar, os produtos podem incluir tanto de CO_2 e CO , e pode também haver combustível não queimado nos produtos.

4.2.2 Quantidade estequiométrica de oxidante

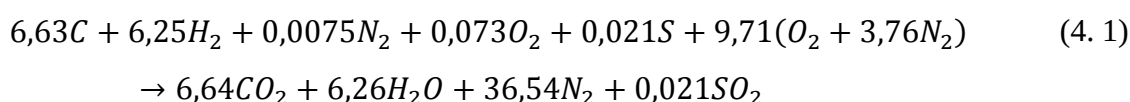
Também chamado quantidade teórica do ar, é a quantidade mínima de ar que fornece oxigênio suficiente para a combustão completa de todo o carbono, hidrogênio, e de enxofre presente no combustível. (MORAN, SHAPIRO, *et al.*, 2013)

Para uma combustão completa com a quantidade teórica de ar, os produtos consistem de dióxido de carbono, água, dióxido de enxofre, e o nitrogênio que acompanha o oxigênio do ar mais qualquer nitrogênio contido no combustível. Oxigênio livre não aparece nos produtos. (MORAN, SHAPIRO, *et al.*, 2013)

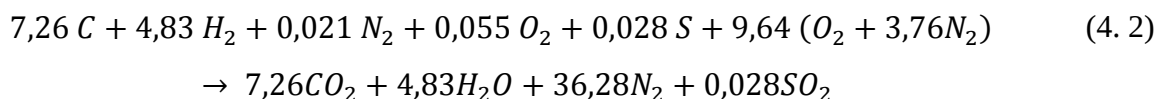
A título de exemplo, se calculará a reação estequiométrica para o caso do óleo pirolítico de pneus usados (OPPU). A Tabela 4. 1 mostra a composição química deste combustível segundo diferentes pesquisadores em percentagem mássica (%m/m). Nos cálculos termodinâmicos se utilizará a composição proposta por Murugan, Ramaswamy e Nagarajan (2008), e os dados da amostra de OPPU utilizada neste trabalho (OPPU-UNIFEI). As quantidades mostradas na Tabela 4. 1 mostra diversos valores devido à variedade de processos utilizados para a obtenção das frações líquidas, onde cada um de eles têm diferentes taxas de aquecimento, temperatura, tempo e tipo de pneu utilizado.

A quantidade estequiométrica de oxidante, é expresso mediante o coeficiente estequiométrico, que mensura o ar presente na reação, neste caso, para Murugan, Ramaswamy e Nagarajan (2008) e OPPU-UNIFEI são 9,71493 e 9,64356 respectivamente, segundo as reações seguintes:

Murugan, Ramaswamy e Nagarajan (2008)



OPPU- UNIFEI



No caso das equações (4. 1) e (4. 2), os valores dos números de moles, são baseados em 100 g de combustível, é por isso que é feita uma correção, e logo são achadas as quantidades de matéria em quilomoles, para cada elemento dos reagentes, como é mostrado na Tabela 4. 2 e

Tabela 4. 3.

Tabela 4. 1 Comparação das propriedades do OPPU, com os valores da bibliografia pesquisada.

Característica	[A]	[B]	[C]	[D]	[E]	[F]	[G]	[H]	[I]	[J]	[K]	[L]	[M]
C	88	86,5	87,82	84,26	85,86	83,48	81,18	86,87	68,91	86,19	81,04	87,72	87,1
H	9,4	10,8	9,42	10,39	9,15	13,12	10,92	10,07	9,6	10,33	11,11	11,31	9,65
N	0,45	0,50	0,55	0,42	0,65	0,22	1,85	1,18	2,05	0,79	0,50	0,23	0,6
O	0,50	2,20	0	3,39	2,87	2,46	4,62	1,17	18,37	0	6,76	-	1,76
S	1,45	-	2,21	1,54	1,25	0,72	0,031	0,91	1,07	0,83	0,59	0,7	0,89
Cinzas	0,002	-	-	-	0,22	4,81	0,31	-	-	-	-	-	<0,01
Poder calorífico (MJ/kg)	42	-	-	-	-	-	38	43,34	-	-	-	-	-
Poder calorífico superior (MJ/kg)	-	43,7	42,4876	-	42	-	-	-	42,61	42,7	43,8	47±5	42,015
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	-	-	-	41,7	-	38	-	-	-	40,49	-	45±0,4	39,891
Massa específica (kg/m³)	910	-	-	941	957	-	-	-	820	-	875	900	-
Massa específica a 20°C (kg/m³)	-	950	-	-	-	-	-	945	-	-	-	-	920,7
Massa específica a 15°C (kg/m³)	-	-	-	-	-	923,9	935	-	-	917	-	-	-
Viscosidade (cSt)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,87	5,15
Viscosidade a 30 °C (cSt)	-	-	-	-	4,75	-	-	-	-	-	-	-	-
Viscosidade a 40 °C (cSt)	6,3	-	-	-	-	3,77	3,2	3,8	-	2,39	1,70	-	-
Viscosidade a 50 °C (cSt)	-	9,7	-	2,44	-	-	-	-	0,95	-	-	-	-
Viscosidade a 60 °C (cSt)	2,38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Viscosidade a 100 °C (cSt)	-	3,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

[A] : Williams, Bottrill e Cunliffe (1998).

[B] : Roy, Chaala e Darmstadt (1999).

[C] : Galvagno, Casu et al. (2002).

[D] : Li et al. (2004).

[E] : Islam, Haniu e Beg (2008).

[F] : Murugan, Ramaswamy e Nagarajan (2008).

[G] : Murugan, Ramaswamy e Nagarajan (2009).

[H] : Aydin e Ilkiliç (2012).

[I] : Banar et al. (2012).

[J] : Martínez, Lapuerta et al. (2013).

[K] : Siva et al. (2013).

[L] : Undri et al. (2013).

[M] : OPPU - UNIFEI

Tabela 4. 2 Composição dos OPPU.

Elemento	Murugan, Ramaswamy e Nagarajan, 2008		OPPU-UNIFEI	
	%m/m	Correção	%m/m	Correção
C	83,48	79,65	87,10	87,10
H	13,12	12,52	9,65	9,65
N	0,22	0,21	0,60	0,60
O	2,46	2,35	1,76	1,76
S	0,72	0,69	0,89	0,89
Cinzas	4,81	4,58	<0,01	0

Tabela 4. 3 Determinação dos numeros de moles dos elementos nos reagentes

Elemento	Murugan, Ramaswamy e Nagarajan, 2008	OPPU-UNIFEI
	Moles	Moles
C	6,64	7,26
H ₂	6,26	4,83
N ₂	74×10 ⁻⁴	21,43×10 ⁻³
O ₂	7,33×10 ⁻²	5,50×10 ⁻²
S	2,14×10 ⁻²	27,73×10 ⁻³

4.2.3 Razão ar / combustível (A/C)

A relação ar/combustível é simplesmente a razão entre a quantidade de ar em uma reação com a quantidade de combustível. A proporção pode ser escrita numa base molar (moles de ar dividido por moles de combustível) ou sobre uma base mássica (massa de ar dividida por massa de combustível). A conversão entre esses valores é executada usando as massas molares do ar, M_{ar} e combustível M_{comb} . (MORAN, SHAPIRO, *et al.*, 2013)

$$A/C = \frac{\text{massa do ar}}{\text{massa do combustível}} = \frac{\text{número de mols do ar} \times M_{ar}}{\text{número de mols do combustível} \times M_{comb}} \quad (4.3)$$

Para os OPPUs cujas composições são mostradas na Tabela 4. 2 segue a relação A/C conforme equação (4. 4) e (4. 5) para 100 g de combustível:

Murugan, Ramaswamy e Nagarajan, 2008

$$A/C = \frac{9,71(32 + 28 \times 3,76)}{100} = 13,34 \text{ kg}_{ar}/\text{kg}_{comb} \quad (4. 4)$$

OPPU- UNIFEI

$$A/C = \frac{9,64(32 + 28 \times 3,76)}{100} = 13,24 \text{ kg}_{ar}/\text{kg}_{comb} \quad (4. 5)$$

Nos cálculos dos injetores apresentaremos um conceito mais geral deste parâmetro, este é a GLR, que é a relação entre as quantidades mássicas de gás e líquido.

4.2.4 Razão de equivalência

É usada comumente para indicar quantitativamente quando uma mistura de oxidante e combustível é rica, pobre ou estequiométrica. A razão de equivalência é definida como:

$$\phi = \frac{(A/C)_{esteq}}{(A/C)} = \frac{(C/A)}{(C/A)_{esteq}} \quad (4. 6)$$

- ϕ : Razão de equivalência
- $(A/C)_{esteq}$: Relação ar/combustível estequiométrica
- (A/C) : Relação ar/combustível
- $(C/A)_{esteq}$: Relação combustível /ar estequiométrica
- (C/A) : Relação combustível /ar

A partir dessa definição, para misturas ricas, $\phi > 1$ e para misturas pobres em combustível, $\phi < 1$. Para uma mistura estequiométrica, $\phi = 1$. Em muitas aplicações em combustão, a razão de equivalência é o fator mais importante na determinação do desempenho do sistema (TURNS, 2013). Onde, a reação estequiométrica pode ser considerada como uma reação ideal, na qual o oxidante é apenas a quantidade necessária para queimar completamente a quantidade de combustível no sistema. Esta reação pode ser considerada como a reação mais econômica, porque é obtida a reação completa do carbono em CO₂ com a menor quantidade de

ar. (KUO, 2005). Esta reação não tem presença de CO ou O₂ e outros produtos não queimados produzidos pelo defeito ou excesso de ar.

4.2.5 Formação de CO₂ do OPPU

Na combustão, se espécies carbonosas estão envolvidas, o CO₂ é obtido, o qual se tornou uma preocupação na discussão sobre aquecimento global. Dado que as emissões de CO₂ são parâmetros importantes que servem para avaliar os efeitos da combustão sobre o meio ambiente, é de particular interesse calcular as taxas de produção por unidade de energia liberada na combustão dada.

$$P_{CO_2} = \frac{n_{CO_2} \cdot M_{CO_2}}{n_{comb} \cdot M_{comb} \cdot PCI} = \frac{m_{CO_2}}{m_{comb} \cdot PCI} \quad (4.7)$$

P_{CO_2}	:	Taxa de formação de CO ₂ [kg/kJ]
n_{CO_2}	:	Número de moles de CO ₂ nos produtos da combustão [kmol]
M_{CO_2}	:	Massa molecular do CO ₂ [kg/kmol]
PCI	:	Poder calorífico inferior do combustível [kJ/kg]
n_{comb}	:	Número de moles do combustível [kmol]
M_{comb}	:	Massa molecular do combustível [kg/kmol]
m_{comb}	:	Massa de combustível [kg]

Para os exemplos dos OPPUs queimados sem excesso de ar:

Murugan, Ramaswamy e Nagarajan (2008)

$$P_{CO_2} = \frac{n_{CO_2} \cdot M_{CO_2}}{m_{comb} \cdot PCI} = \frac{6,64 \times 44,01}{100 \times 38000} = 7,69 \times 10^{-4} kg \ CO_2 / kJ \quad (4.8)$$

OPPU- UNIFEI

$$P_{CO_2} = \frac{n_{CO_2} \cdot M_{CO_2}}{m_{comb} \cdot PCI} = \frac{7,26 \times 44,01}{100 \times 39891} = 8 \times 10^{-5} kg \ CO_2 / kJ \quad (4.9)$$

4.2.6 Formação de SO₂ do OPPU

O enxofre nos combustíveis é um dos piores poluentes existentes, devido à corrosão, a formação de chuva ácida e aos problemas respiratórios que causa na população. (GARCIA, 2013)

SO₂ é produzido a partir de enxofre contido no combustível, com a combustão o enxofre é rapidamente convertido a SO₂, que pode ser lançado desta forma na atmosfera ou ser transformado em SO₃ através da ação catalítica do pentóxido de vanádio, normalmente presente nas cinzas resultantes da combustão dos óleos minerais pesados. O SO₃, por sua vez, ao encontrar água, resultante da combustão de hidrogênio ou a água contida na atmosfera, reage formando ácido sulfúrico, da seguinte forma (GARCIA, 2013; LACKNER, PALOTÁS e WINTER, 2013)



Outra espécie de enxofre pode ser emitido quando o combustível contém H₂S. Em combustão, ele é convertido para SO₂. (LACKNER, PALOTÁS e WINTER, 2013)

Na mesma linha de raciocínio para o CO₂ temos que para o SO₂.

$$P_{SO_2} = \frac{n_{SO_2} \cdot M_{SO_2}}{n_{comb} \cdot M_{comb} \cdot PCI} = \frac{n_{SO_2} \cdot M_{SO_2}}{m_{comb} \cdot PCI} \quad (4.12)$$

Murugan, Ramaswamy e Nagarajan (2008)

$$P_{SO_2} = \frac{0,021 \times 64,06}{100 \times 38000} = 3,61 \times 10^{-7} \text{ kgSO}_2/\text{kJ} \quad (4.13)$$

OPPU- UNIFEI

$$P_{SO_2} = \frac{0,028 \times 64,06}{100 \times 39891} = 4,45 \times 10^{-7} \text{ kgSO}_2/\text{kJ} \quad (4.14)$$

4.2.7 Entalpia de combustão ou poder calorífico do OPPU

De forma geral segundo Moran, Shapiro, *et al.*, (2013), a entalpia de combustão é diferença entre as entalpias dos produtos e dos reagentes, quando acontece uma combustão completa numa temperatura e pressão dada, sendo:

$$\Delta H_c = \sum_{reag} n_i \bar{h}_i - \sum_{prod} n_i \bar{h}_i \quad (4.15)$$

ΔH_c	:	Entalpia de combustão [kJ/kmol comb.]
$\bar{h}_i$	:	Entalpia do composto i [kJ/kmol]
n_i	:	Número quilomoles do composto i [kmol]

A entalpia de combustão padrão ou calor de combustão padrão; a uma temperatura de referência de 25 °C e P= 1 atm, é a diferença entre as entalpias de formação dos reagentes e dos produtos, como é mostrada na Figura 4. 1 Algumas das entalpias de combustão são mostradas na Tabela 4. 4 (CARVALHO e MCQUAY, 2007).

$$\Delta H_c^0 = \sum_{prod} n_i \bar{h}_{f,i}^0 - \sum_{reag} n_i \bar{h}_{f,i}^0 \quad (4.16)$$

ΔH_c	:	Entalpia de combustão padrão [kJ/kmol de combustível]
$\bar{h}_{f,i}^0$	:	Entalpia de formação do composto i [kJ/kmol]
n_i	:	Número de quilomoles do composto i , [kmol]

Se na temperatura de referência, 25°C, a água estiver no estado vapor nos produtos, aplica-se o termo poder calorífico inferior (PCI), enquanto que se a água estiver no estado líquido nos produtos, aplica-se o termo poder calorífico superior (PCS). A diferença entre o PCS e o PCI é o calor de vaporização da água. Em problemas de combustão, em geral a água encontra-se no estado gasoso nos produtos e, por conseguinte, deve-se usar o PCI em cálculos envolvendo balanço de energia. (CARVALHO e MCQUAY, 2007). O uso do PCI ou PCS depende do equipo de análise dos combustíveis.

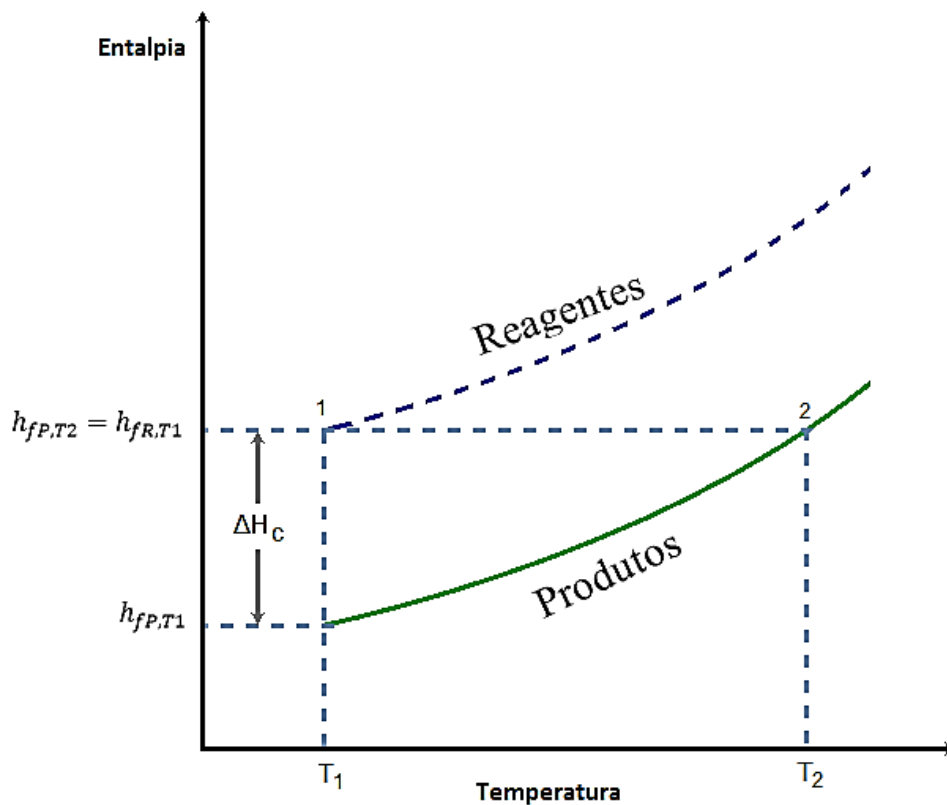


Figura 4. 1 Variação da entalpia com a temperatura

$$PCI = \frac{\Delta H_c^0}{M_{comb}} \quad (4. 17)$$

ΔH_c : Entalpia de combustão [kJ/kmol]
 PCI : Poder Calorífico inferior [kJ/kg]

Segundo Çengel e Boles (2009) em termos práticos, o poder calorífico do combustível, é definido como a quantidade de calor libertado quando um combustível é queimado completamente num processo de fluxo permanente (estacionário) e os produtos regressam ao estado dos reagentes (PCS). Em outras palavras, o valor calorífico de um combustível é igual ao valor absoluto da entalpia de combustão do combustível. O Poder calorífico ou entalpia de combustão de um combustível pode ser determinada a partir do conhecimento das entalpias de formação de todos os compostos envolvidos (ÇENGEL e BOLES, 2009).

Para o caso de estudo, nós temos o valor do PCI (base mássica), segundo Murugan, Ramaswamy e Nagarajan (2008) de 38000 kJ/kg, e para o OPPU – UNFEI de 39891 kJ/kg.

Tabela 4. 4 Poderes caloríficos de algumas substâncias, (GREEN e PERRY, 2008).

Substância	PCS(MJ/kmol)	PCS(MJ/kg)	PCI(MJ/kmol)	PCI(MJ/kg)
Hidrogênio, H ₂ (g)	286,03	141,88	241,99	120,04
Carbono, C (s)	393,78	32,79	393,78	32,79
Monóx. Carbono, CO (g)	283,18	10,11	283,18	10,11
Metano, CH ₄ (g)	890,94	55,54	802,86	50,05
Etano, C ₂ H ₆ (g)	1560,92	51,91	1428,79	47,52
Propano, C ₃ H ₈ (g)	2221,54	50,38	2045,36	46,39
Propano, C ₃ H ₈ (l)	2205,53	50,02	2029,36	46,03
n-Butano, C ₄ H ₁₀ (g)	2880,44	49,56	2660,23	45,77
n-Butano, C ₄ H ₁₀ (l)	2858,93	49,19	2638,71	45,40
n-Pentano, C ₅ H ₁₂ (g)	3538,52	49,05	3274,25	45,38
n-Pentano, C ₅ H ₁₂ (l)	3511,89	48,68	3247,62	45,02
n-Hexano, C ₆ H ₁₄ (g)	4197,56	48,71	3889,24	45,13
n-Hexano, C ₆ H ₁₄ (l)	4165,91	48,34	3857,59	44,77
n-Heptano, C ₇ H ₁₆ (g)	4856,73	48,47	4504,37	44,95
n-Heptano, C ₇ H ₁₆ (l)	4820,14	48,11	4467,78	44,59
n-Octano, C ₈ H ₁₈ (g)	5515,90	48,29	5119,49	44,82
n-Octano, C ₈ H ₁₈ (l)	5474,37	48,05	5077,96	44,46
Benzeno, C ₆ H ₆ (g)	3303,72	42,30	3171,58	40,60
Benzeno, C ₆ H ₆ (l)	3269,81	41,86	3137,67	40,17

4.2.8 Entalpia de formação do OPPU

Os valores da entalpia podem ser atribuídos a compostos para utilização no estudo de sistemas que reagem. A entalpia de um composto no estado padrão é igual a sua entalpia de formação, simbolizada h_f° . A entalpia de formação é a energia liberada ou absorvida quando o composto é formado a partir de seus elementos, o composto e elementos de todos estão a T_{ref} e p_{ref} . A entalpia de formação é determinada geralmente por aplicação de procedimentos da termodinâmica estatística utilizando dados observados da espectroscopia. A entalpia de formação também pode ser encontrada em princípio, através da medição da transferência de calor em uma reação na qual o composto é formado a partir dos elementos. (MORAN, SHAPIRO, *et al.*, 2013)

A entalpia de um composto é a soma da entalpia de formação e a entalpia sensível que é associada somente com a temperatura.

$$\bar{h}_i = \bar{h}_{f,i}^\circ + \Delta\bar{h}_i \quad (4.18)$$

$\bar{h}_i$: Entalpia do composto i na temperatura T [kJ/kmol]
 $\bar{h}_{f,i}^\circ$: Entalpia de formação do composto i [kJ/kmol]
 $\Delta\bar{h}_i$: Entalpia sensível do composto i [kJ/kmol]

Da equação (4. 16) e (4. 17):

$$h_{fR} - h_{fP} = \sum_{reag} n_i \bar{h}_{f,i}^\circ - \sum_{prod} n_i \bar{h}_{f,i}^\circ = \Delta H_c^0 \quad (4.19)$$

Onde:

$$h_{fR} = n_{comb} \bar{h}_{f,comb}^\circ + n_{O_2} \bar{h}_{f,O_2}^\circ + n_{N_2} \bar{h}_{f,N_2}^\circ \quad (4.20)$$

$$h_{fP} = n_{CO_2} \bar{h}_{f,CO_2}^\circ + n_{H_2O} \bar{h}_{f,H_2O}^\circ + n_{SO_2} \bar{h}_{f,SO_2}^\circ + n_{O_2} \bar{h}_{f,O_2}^\circ + n_{N_2} \bar{h}_{f,N_2}^\circ \quad (4.21)$$

Nas equações (4. 20) e (4. 21) h_{fR} e h_{fP} são as entalpias de formação dos reagentes e produtos respectivamente numa reação com excesso do ar (pobre), no caso de uma reação estequiométrica não temos o termo correspondente ao O_2 , e, no caso de uma reação com defeito do ar (rica) aquele termo é substituído por o termo correspondente ao CO . Para nosso estudo, $n_{comb} \bar{h}_{f,comb}^\circ$ é a entalpia de formação do OPPU.

De acordo com a Figura 4. 1, se leva em consideração uma temperatura de referência, T_1 de 25°C (298 K). Com esta temperatura dos reagentes e produtos, $h_{fR} = h_{fOPPU}$.

$$\begin{aligned} h_{fR} &= h_{fOPPU} = \Delta H_c^0 + h_{fP} \\ &= PCI \times M_{comb} \\ &\quad + (n_{CO_2} \bar{h}_{f,CO_2}^\circ + n_{H_2O} \bar{h}_{f,H_2O(g)}^\circ + n_{SO_2} \bar{h}_{f,SO_2}^\circ + n_{O_2} \bar{h}_{f,O_2}^\circ \\ &\quad + n_{N_2} \bar{h}_{f,N_2}^\circ) \end{aligned} \quad (4.22)$$

No caso do PCS, a equação fica:

$$\begin{aligned}
 h_{fR} &= h_{fOPPU} = PCS \times M_{comb} + h_{fP} \\
 &= PCS \times M_{comb} \\
 &\quad + (n_{CO_2} \bar{h}_{f,CO_2}^o + n_{H_2O} \bar{h}_{f,H_2O(l)}^o + n_{SO_2} \bar{h}_{f,SO_2}^o + n_{O_2} \bar{h}_{f,O_2}^o \\
 &\quad + n_{N_2} \bar{h}_{f,N_2}^o)
 \end{aligned} \tag{4.23}$$

Para a composição, segundo Murugan, Ramaswamy e Nagarajan (2008), mostrada na Tabela 4. 2 com quantidade estequiométrica de ar. Substituindo os valores da equação (4. 22), pegados das tabelas de Green e Perry (2008), é baseada numa quantidade de 100 g de combustível, e a água na fase líquida, a entalpia de formação é obtida:

Murugan, Ramaswamy e Nagarajan (2008)

$$\begin{aligned}
 h_{fOPPU} &= 38000 \times 10^2 \\
 &\quad + (6,64 \times -393510 + 6,26 \times -241814 + 36,54 \times 0 + 0,021 \\
 &\quad \times -296840)
 \end{aligned} \tag{4.24}$$

OPPU- UNIFEI

$$\begin{aligned}
 h_{fOPPU} &= 39891 \times 10^2 \\
 &\quad + (7,26 \times -393510 + 4,83 \times -241814 + 36,28 \times 0 + 0,028 \\
 &\quad \times -296840)
 \end{aligned} \tag{4.25}$$

Neste caso, o valor da entalpia de formação da água é -285830 kJ/kmol, que corresponde a água líquida.

Murugan, Ramaswamy e Nagarajan (2008)

$$h_{fOPPU} = 38 \times 10^5 - 4131738,90 = -331738,90 \text{ kJ/kmol} \tag{4.26}$$

OPPU- UNIFEI

$$h_{fOPPU} = 39891 \times 10^2 - 4031209,36 = -42109,36 \text{ kJ/kmol} \tag{4.27}$$

Os valores para diferentes composições são mostrados na Figura 4. 2, onde os diferentes valores obtidos, são devido as diferentes composições de cada um dos óleos porque a composição depende do tipo e os parâmetros do processo de pirólise.

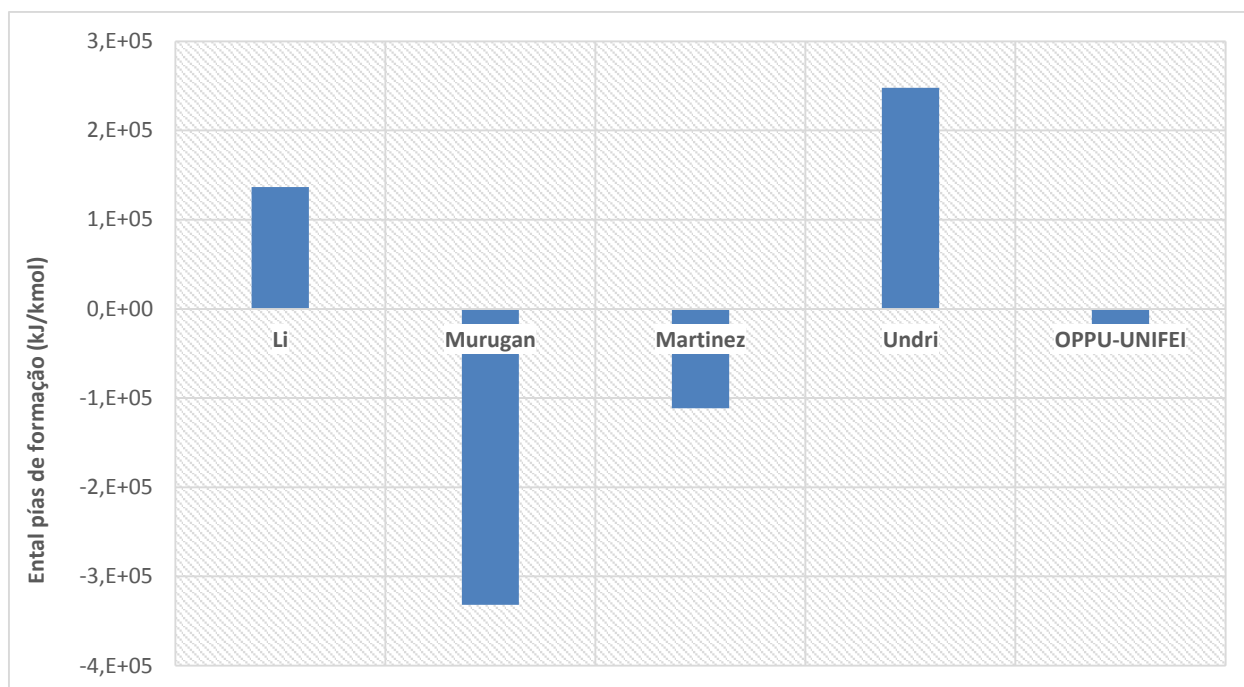


Figura 4. 2 Entalpias de formação para diferentes composições do OPPU

4.2.9 Temperatura de chama adiabática do OPPU

A temperatura T_F é chamada temperatura de chama adiabática. Ela é a maior temperatura que se pode obter para os produtos de combustão, sendo a mesma atingida, como se disse anteriormente, se não houver perda de energia para fora do sistema durante o processo de combustão. (CARVALHO e MCQUAY, 2007).

Como mostra a Figura 4. 1, a temperatura de chama adiabática T_2 , é atingida num processo sem perda de energia, saindo do ponto 1 até o ponto 2

A temperatura de chama adiabática é definida a partir da Primeira Lei da termodinâmica, para um sistema aberto adiabático isolado:

$$\sum_{Produtos} [n_i(\bar{h}_{f,i}^o + \Delta\bar{h}_i)] = \sum_{Reagentes} [n_i(\bar{h}_{f,i}^o + \Delta\bar{h}_i)] \quad (4. 28)$$

Onde.

n_i = Número quilomols do composto i [kmol]

$\bar{h}_{f,i}^o$ = Entalpia de formação do composto i [kJ/kmol]

$\Delta\bar{h}_i = \bar{h}_{T,i} - \bar{h}_{T0,i}$ = Variação de entalpia entre a temperatura adiabática e a temperatura de referência do composto i (entalpia sensível) [kJ/kmol]

A temperatura de chama adiabática pode ser calculada em duas formas, segundo a equação de conservação de energia, e com o uso do PCI.

a) Determinação da chama adiabática mediante a equação de conservação e tabelas termodinâmicas:

O primeiro método de cálculo é fazendo um balanço de entalpias dos produtos com os reagentes, e fazendo uso das tabelas termodinâmicas, iterando até achar a temperatura adiabática de chama.

Partindo da equação (4. 28), com o ingresso dos reagentes a uma temperatura de 25 °C, e segundo a composição química do Murugam tem-se a seguinte equação:

$$\begin{aligned} \bar{h}_{f,OPPU}^o - 6,64(\bar{h}_{f,CO_2}^o + \Delta h_{CO_2}) + 6,26(\bar{h}_{f,H_2O}^o + \Delta h_{H_2O}) \\ + 0,021(\bar{h}_{f,SO_2}^o + \Delta h_{SO_2}) + 36,54\bar{h}_{f,N_2}^o \Delta h_{N_2} = 0 \end{aligned} \quad (4. 29)$$

Onde:

$$\sum_{Reagentes} [n_i(\bar{h}_{f,i}^o + \Delta\bar{h}_i)] = \bar{h}_{f,OPPU}^o \quad (4. 30)$$

Portanto, sabendo que a entalpia de formação do OPPU é: -331738,90, e conhecendo as entalpias de formação e sensíveis do CO₂, H₂O, SO₂, N₂ e O₂, é realizado um processo iterativo com a equação (4. 29) para achar a Temperatura de chama adiabática. Vide a Figura 4. 3:

Obtém-se a temperatura de chama adiabática para a composição segundo Murugan, Ramaswamy e Nagarajan (2008) de 2347,75 K, e para o OPPU-UNIFEI, 2464,13 K.

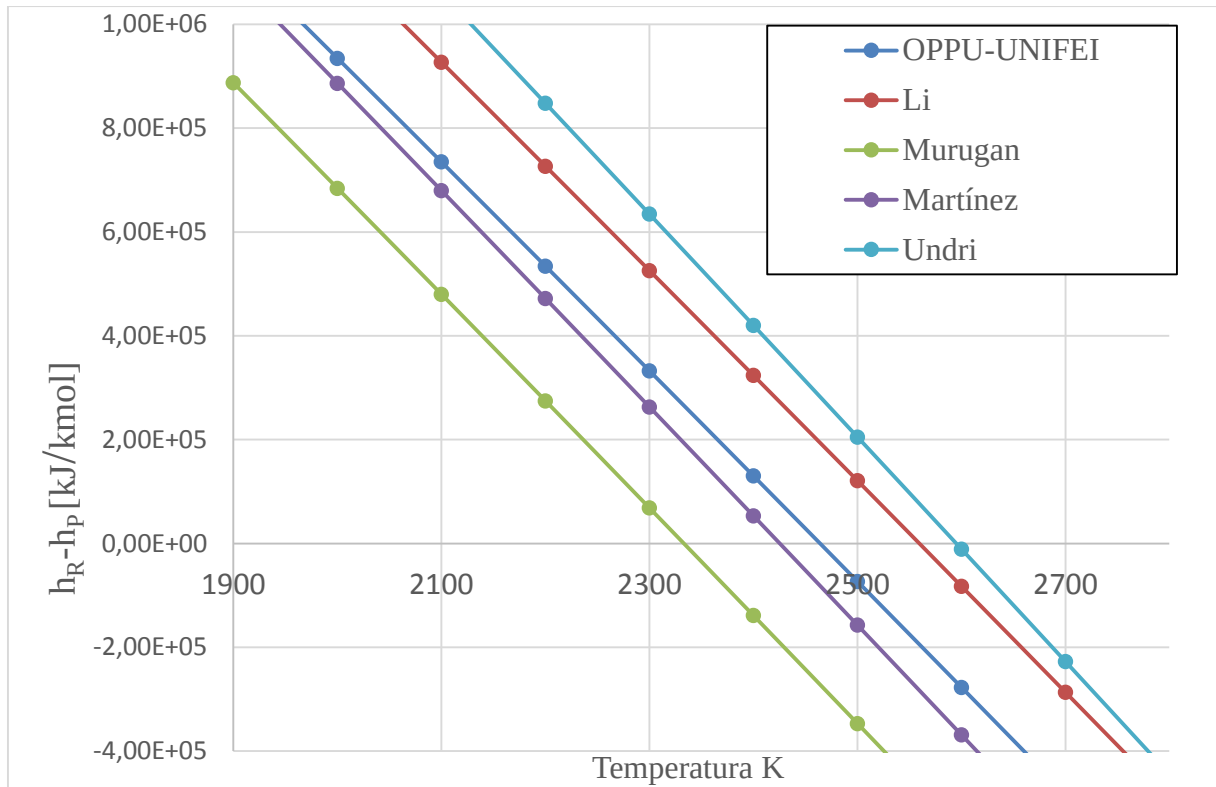


Figura 4. 3 Iterações para determinar a temperatura de chama adiabática, para misturas estequiométricas

b) Cálculo da Temperatura de chama adiabática com o PCI e Calor específico

Neste cálculo são utilizadas os valores do Cp baseado em um polinômio do qual é achada uma expressão polinomial da qual uma das soluções é a temperatura de chama.

Da equação (4. 28):

$$\begin{aligned}
 n_{comb}(\bar{h}_{f,comb}^o + \Delta h_{comb}) + n_{O_2}(\bar{h}_{f,O_2}^o + \Delta h_{O_2}) + n_{N_2}(\bar{h}_{f,N_2}^o + \Delta h_{N_2}) \\
 = n_{CO_2}(\bar{h}_{f,CO_2}^o + \Delta h_{CO_2}) + n_{H_2O}(\bar{h}_{f,H_2O}^o + \Delta h_{H_2O}) \\
 + n_{SO_2}(\bar{h}_{f,SO_2}^o + \Delta h_{SO_2}) + n_{O_2}(\bar{h}_{f,O_2}^o + \Delta h_{O_2}) + n_{N_2}(\bar{h}_{f,N_2}^o + \Delta h_{N_2})
 \end{aligned} \quad (4. 31)$$

Fazendo um rearranjo dos termos, a equação 4.25, fica:

$$\begin{aligned}
& (n_{comb}\bar{h}_{f,comb}^o + n_{O_2}\bar{h}_{f,O_2}^o + n_{N_2}\bar{h}_{f,N_2}^o) + n_{comb}\Delta h_{comb} + n_{O_2}\Delta h_{O_2} \\
& + n_{N_2}\Delta h_{N_2} \\
& = (n_{CO_2}\bar{h}_{f,CO_2}^o + n_{H_2O}\bar{h}_{f,H_2O}^o + n_{SO_2}\bar{h}_{f,SO_2}^o + n_{O_2}\bar{h}_{f,O_2}^o \\
& + n_{N_2}\bar{h}_{f,N_2}^o) \\
& + (n_{CO_2}\Delta h_{CO_2} + n_{H_2O}\Delta h_{H_2O} + n_{SO_2}\Delta h_{SO_2} + n_{O_2}\Delta h_{O_2} \\
& + n_{N_2}\Delta h_{N_2})
\end{aligned} \tag{4.32}$$

A equação (4.32), fica:

$$\begin{aligned}
& (n_{comb}\bar{h}_{f,comb}^o + n_{O_2}\bar{h}_{f,O_2}^o + n_{N_2}\bar{h}_{f,N_2}^o) \\
& - (n_{CO_2}\bar{h}_{f,CO_2}^o + n_{H_2O}\bar{h}_{f,H_2O}^o + n_{SO_2}\bar{h}_{f,SO_2}^o + n_{O_2}\bar{h}_{f,O_2}^o + n_{N_2}\bar{h}_{f,N_2}^o) \\
& + n_{comb}\Delta h_{comb} + n_{O_2}\Delta h_{O_2} + n_{N_2}\Delta h_{N_2} \\
& = h_{fR} - h_{fP} + n_{comb}\Delta h_{comb} + n_{O_2}\Delta h_{O_2} + n_{N_2}\Delta h_{N_2} \\
& = (n_{CO_2}\Delta h_{CO_2} + n_{H_2O}\Delta h_{H_2O} + n_{SO_2}\Delta h_{SO_2} + n_{O_2}\Delta h_{O_2} \\
& + n_{N_2}\Delta h_{N_2})
\end{aligned} \tag{4.33}$$

Levando em consideração a equação (4.19):

$$\begin{aligned}
& PCI_{comb} + n_{O_2}\Delta h_{O_2} + n_{N_2}\Delta h_{N_2} \\
& = n_{CO_2}\Delta h_{CO_2} + n_{H_2O}\Delta h_{H_2O} + n_{SO_2}\Delta h_{SO_2} + n_{O_2}\Delta h_{O_2} + n_{N_2}\Delta h_{N_2}
\end{aligned} \tag{4.34}$$

Onde

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \int_1^2 C_P dT \tag{4.35}$$

Fazendo uso da equação (4.34), a equação (4.35) seria:

$$\begin{aligned}
& (PCI)_{comb} + \left(n_{O_2} \int_{T_0}^{T_e} C_P dT \right)_{O_2} + \left(n_{N_2} \int_{T_0}^{T_e} C_P dT \right)_{N_2} \\
& = \left(n_{CO_2} \int_{T_0}^{T_F} C_P dT \right)_{CO_2} + \left(n_{H_2O} \int_{T_0}^{T_F} C_P dT \right)_{H_2O} \\
& + \left(n_{SO_2} \int_{T_0}^{T_F} C_P dT \right)_{SO_2} + \left(n_{O_2} \int_{T_0}^{T_F} C_P dT \right)_{O_2} \\
& + \left(n_{N_2} \int_{T_0}^{T_F} C_P dT \right)_{N_2}
\end{aligned} \tag{4.36}$$

Onde:

C_p = Calor específico [kJ/kmolK]

n_i = Numero de mols do elemento i [kmol]

T_0 = Temperatura de referencia [K]

T_e = Temperatura de entrada dos reagentes, para estes cálculos $T_e = T_0$ [K]

T_F = Temperatura de saída = Temperatura adiabática de chama [K]

PCI = Poder calorifico inferior do combustível [kJ/kg]

Para resolver o C_p da integral na equação (4. 36), tem-se que achar um valor do C_p , em função de T, que é calculado segundo a equação (4. 37) (ÇENGEL e BOLES, 2009):

$$C_p = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4 \quad (4. 37)$$

Os valores dos coeficientes a, b, c e d, são apresentados na Tabela 4. 5

Tabela 4. 5 Calores específicos em função da temperatura, com T em K e C_p em kJ/kmol.K

	a	b	c	d
CO ₂	22,26	$5,9810 \times 10^{-2}$	$-3,501 \times 10^{-5}$	$7,469 \times 10^{-9}$
H ₂ O	32,24	$0,1923 \times 10^{-2}$	$1,055 \times 10^{-5}$	$-3,595 \times 10^{-9}$
N ₂	28,9	$-0,1571 \times 10^{-2}$	$0,8081 \times 10^{-5}$	$-2,873 \times 10^{-9}$
SO ₂	25,78	$5,7950 \times 10^{-2}$	$-3,812 \times 10^{-5}$	$8,612 \times 10^{-9}$
O ₂	25.48	$1,520 \times 10^{-2}$	$-0,7155 \times 10^{-5}$	$1,312 \times 10^{-9}$

Com isso obtém-se a equação (4. 38)

$$\begin{aligned}
& (PCI)_{comb} + n_{O_2} \left(a(T_e - T_0) + \frac{b}{2}(T_e^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T_e^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T_e^4 - T_0^4) \right)_{O_2} \\
& + n_{N_2} \left(a(T_e - T_0) + \frac{b}{2}(T_e^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T_e^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T_e^4 - T_0^4) \right)_{N_2} \\
& = n_{CO_2} \left(a(T_F - T_0) + \frac{b}{2}(T_F^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T_F^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T_F^4 - T_0^4) \right)_{CO_2} \\
& + n_{H_2O} \left(a(T_F - T_0) + \frac{b}{2}(T_F^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T_F^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T_F^4 - T_0^4) \right)_{H_2O} \\
& + n_{SO_2} \left(a(T_F - T_0) + \frac{b}{2}(T_F^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T_F^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T_F^4 - T_0^4) \right)_{SO_2} \\
& + n_{O_2} \left(a(T_F - T_0) + \frac{b}{2}(T_F^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T_F^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T_F^4 - T_0^4) \right)_{O_2} \\
& + n_{N_2} \left(a(T_F - T_0) + \frac{b}{2}(T_F^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T_F^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T_F^4 - T_0^4) \right)_{N_2}
\end{aligned} \tag{4.38}$$

Desta equação, com os reagentes ingressando a temperatura ambiente (25°C), obtém-se a equação:

$$\begin{aligned}
(PCI)_{comb} = & n_{CO_2} \left(a(T_F - T_0) + \frac{b}{2}(T_F^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T_F^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T_F^4 \right. \\
& \left. - T_0^4) \right)_{CO_2} \\
& + n_{H_2O} \left(a(T_F - T_0) + \frac{b}{2}(T_F^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T_F^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T_F^4 \right. \\
& \left. - T_0^4) \right)_{H_2O} \\
& + n_{SO_2} \left(a(T_F - T_0) + \frac{b}{2}(T_F^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T_F^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T_F^4 \right. \\
& \left. - T_0^4) \right)_{SO_2} \tag{4.39} \\
& + n_{O_2} \left(a(T_F - T_0) + \frac{b}{2}(T_F^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T_F^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T_F^4 \right. \\
& \left. - T_0^4) \right)_{O_2} \\
& + n_{N_2} \left(a(T_F - T_0) + \frac{b}{2}(T_F^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T_F^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T_F^4 \right. \\
& \left. - T_0^4) \right)_{N_2}
\end{aligned}$$

Substituindo os valores obtém-se um polinômio de 4 grau com 4 soluções, sendo só uma de elas a resposta certa, para o caso da composição do dada por Murugan, Ramaswamy e Nagarajan, (2008): 2589.7 K, e para o OPPU-UNIFEI, o valor de: 2488,16 K.

A Figura 4. 4 mostra a temperatura de chama mudando o excesso do ar para diferentes composições do OPPU.

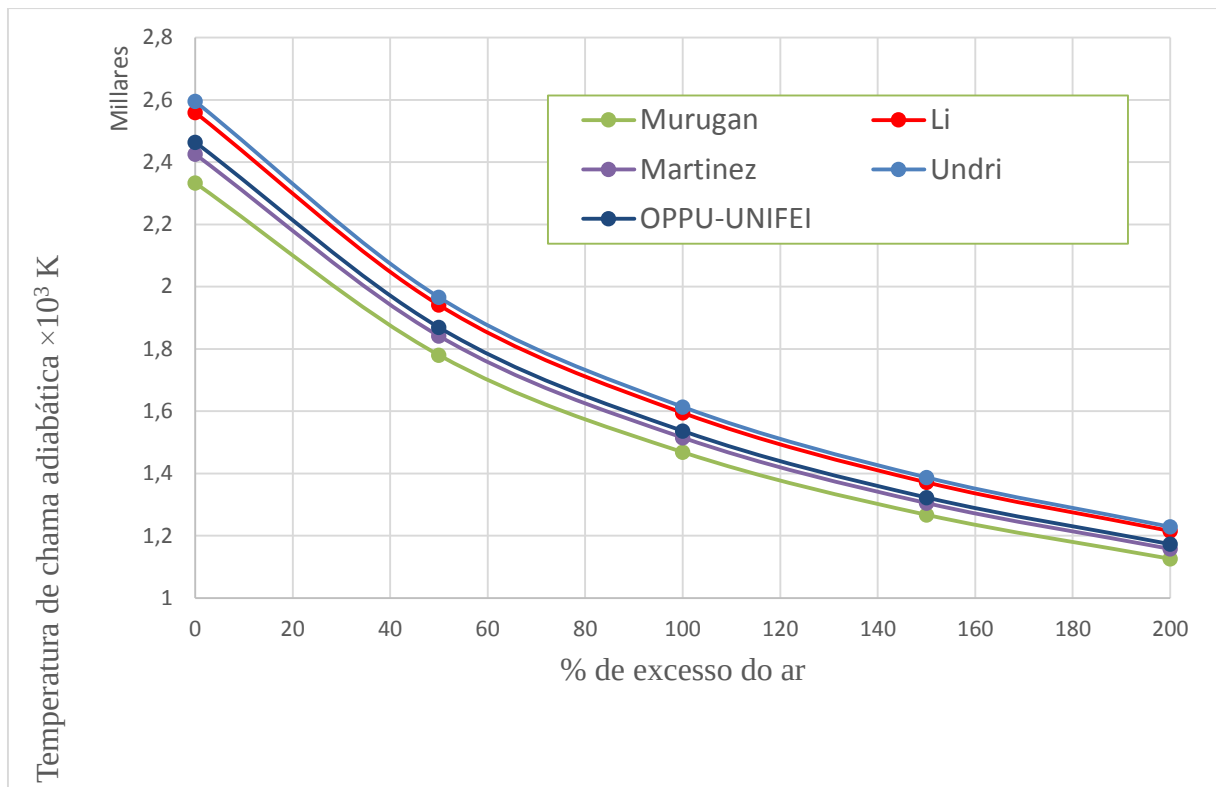


Figura 4. 4 Variação da temperatura de chama adiabática com a porcentagem de excesso de ar

4.3 Atomização

Em processos de combustão é necessário que o combustível líquido seja desintegrado em gotas pequenas para assegurar uma rápida vaporização e transferência de calor. O princípio fundamental da desintegração de um líquido consiste no incremento da área superficial até ficar instável e se-dividir em pequenas gotas. O processo pelo qual o líquido transforma-se em gotas depende da natureza do escoamento e da geometria do atomizador. O mecanismo básico, consiste essencialmente da quebra dos fios instáveis de líquido em colunas de gotas, onde a quebra é dependente da longitude e a circunferência da coluna de líquido (Figura 4. 5), (QUISPE, CARVALHO e COSTA, 2011; BEÉR e CHIGIER, 1983).

A atomização do combustível antes de sua injeção na zona de combustão é fundamental para a eficiência da combustão e o desempenho de um forno industrial, já que gera uma alta razão de superfície-volume na fase líquida, promovendo a evaporação de combustível e a combustão. (QUISPE, CARVALHO e COSTA, 2011)

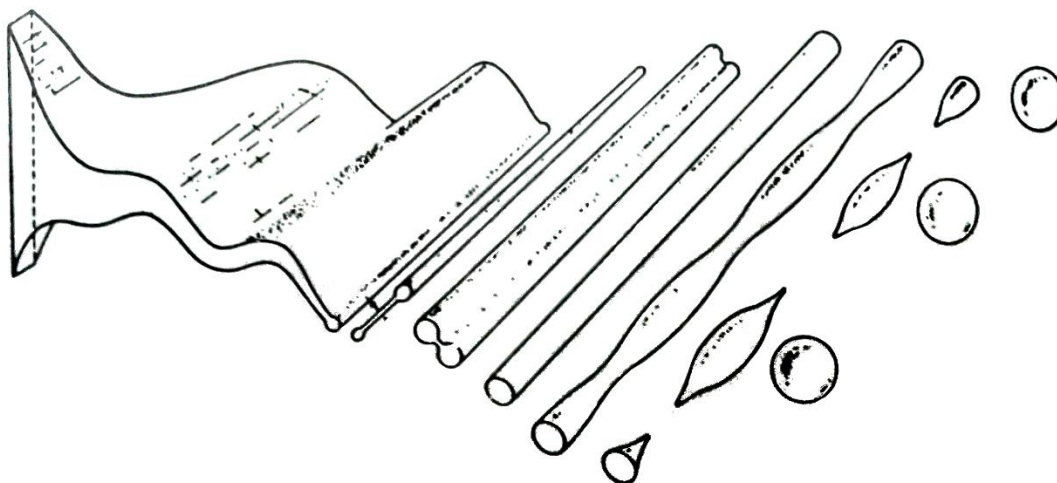


Figura 4. 5 Processo ideal da formação de gotas a partir de uma lâmina líquida (BEÉR e CHIGIER, 1983).

4.3.1 Termos básicos

A atomização segundo Schaschke (2014) é “a criação de pequenas gotículas de um líquido dentro de um fluido ou vácuo. As gotículas podem variar em tamanho de acordo com a aplicação, mas em geral apresentam uma área de superfície muito elevada, permitindo assim a reação química rápida, secagem, calor e transferência de massa”.

Segundo Lefebvre (1989), o processo de atomização é aquele em que um jato, folha ou filme líquido é desintegrado pela energia cinética do próprio líquido, pela exposição a uma corrente de ar ou gás a alta velocidade ou como resultado da aplicação de energia mecânica externa através de dispositivos rotativos ou vibratórios. (LEFEBVRE, 1989)

A atomização é particularmente útil para os combustíveis nos processos de combustão e de secagem ou desidratação de produtos líquidos em secadores de pulverização utilizando um atomizador. A atomização pode ser feita, mediante uma variedade de meios: aerodinamicamente, mecanicamente por ultra-som, ou eletrostaticamente, etc. Por exemplo um jato pode ser desintegrado: pela energia cinética do próprio líquido, pela exposição a um gás de alta velocidade, pela energia mecânica aplicada externamente mediante rotação ou vibração (SCHASCHKE, 2014; LIU, 2000).

Um *Spray* é uma coleção de gotas em movimento, resultante do processo de atomização, contendo uma grande variedade de tamanhos de gotas. (APAZA, 2011). As gotas, contêm quantidade de movimento suficiente para penetrar no meio circundante.

Os atomizadores ou injetores, são dispositivos empregados para a transformação de líquidos em nuvens de gotas, para maximizar a área de contato do líquido com o meio circundante. (AZEVEDO, 2013)

4.3.2 Tipos de atomizadores

Para cada tipo de atomizador, o tamanho médio da gota e a distribuição do tamanho das gotas no spray são muito dependentes do atomizador, condições de funcionamento, propriedades do líquido atomizado e do meio circundante. Os principais tipos são mostrados a seguir.

a) Atomizadores por pressão

Quando um líquido é descarregado sob pressão por uma pequena abertura, a entalpia do líquido é convertida em energia cinética fornecendo uma velocidade relativa elevada entre o líquido e gás circundante, acelerando e desintegrando o líquido em pequenas gotas por efeito da turbulência gerada.

O mecanismo de atomização destes atomizadores é baseado na capilaridade ou quebra caótica do jato ou folha de líquido ejetado com alta velocidade do bocal sob elevada pressão de injeção. São projetados com pequenos orifícios de saída e não são apropriados para líquidos viscosos, devido ao entupimento que podem acontecer. Nesta categoria estão: Injetor de orifício simples (*plain orifice*), centrífugo simples (*pressure-swirl simplex*), injetor centrífugo dual (*pressure swirl dual*), injetor centrífugo com retorno (*Pressure swirl with spill return*), e com spray em leque.

b) Atomizadores rotativos

O fluido é introduzido num disco ou copo rotativo com alta rotação, que transmite uma quantidade de movimento angular para o fluido. O líquido escoar radialmente para a periferia do disco e é descarregado para o ambiente em virtude da alta velocidade tangencial adquirida, é por isso que o grau de atomização depende da velocidade periférica, propriedades do líquido,

é a vazão. Estes em comparação, com os atomizadores por pressão, permitem uma variação independente da vazão e velocidade do disco fornecendo maior flexibilidade na operação.

Alguns atomizadores utilizam um copo em vez de disco.

c) Atomizadores com dois fluidos

Inclui atomizadores assistidos a ar (*air assist*) e por rajada de ar (*airblast*). Eles utilizam a velocidade do ar para a quebra do jato ou folha do líquido, primeiro em ligamentos, e depois em gotículas.

A diferença entre eles, é a velocidade e quantidade de ar utilizado na atomização, o injetor por rajada de ar (*airblast*) faz uso de elevadas quantidades de ar ou vapor em comparação com os assistidos a ar (*air assist*).

O atomizador efervescente é um caso especial de atomizador de dois-fluidos com mistura interna, em que bolhas de ar ou gás são dispersas na corrente de líquido. Nestes injetores o ar de atomização é injetado diretamente no líquido numa câmara de mistura a montante do orifício de descarga. O gás injetado forma bolhas que dão origem a uma mistura bifásica. Ao passar pelo orifício de saída do injetor, a mistura experimenta uma rápida diminuição na pressão, causando a expansão do gás e gerando forças de bolha, acima da tensão superficial. A expansão do gás causa a explosão das bolhas e desintegra o líquido, criando um fino spray. Estes injetores requerem uma pequena quantidade de ar para produzir um spray muito fino. O mecanismo de quebra do líquido com um injetor efervescente é fundamentalmente diferente do encontrado em injetores por pressão, assistidos a ar (*air-assist*) e rajada de ar (*airblast*). Comparado com um injetor *airblast*, os injetores efervescentes apresentam vantagens tais como, a formação de um spray com gotas mais finas para uma ampla faixa de condições de operação. (AZEVEDO, 2013)

Além destes tipos, existem outros tipos de injetores, que são nomeados segundo seu princípio de funcionamento, por exemplo temos: Atomizadores eletrostáticos, ultrassônicos, sônicos, cata-vento (moinho de vento ou windmill), por vibração capilar, etc. (APAZA, 2011; LEFEBVRE, 1989)

4.3.3 Influência das propriedades do líquido na atomização.

São vários os fatores que afetam a qualidade da atomização, o diâmetro das gotas e a facilidade para quebrar os fios e ligamentos do líquido depois de sair do injetor.

a) Massa específica

Ao atomizar líquidos de maior massa específica, produz-se um incremento no tamanho das gotas e, em consequência, incrementa-se o trabalho para obter uma boa atomização. Além disso, a massa específica, tem um efeito na vazão do líquido. Quanto menor a massa específica do líquido, maior será a velocidade na saída do injetor e vice-versa.

b) Viscosidade

O incremento da viscosidade provoca uma diminuição na vazão mássica, gerando grandes esforços cisalhantes, precisando de uma maior pressão para movimentar o fluido, manter o ângulo do cone do spray e a amplitude. O incremento da viscosidade provoca um aumento do tamanho das gotas, além de requerer uma maior potência de alimentação.

c) Temperatura

Embora as mudanças de temperatura não afetem o desempenho do injetor, afetam as propriedades do líquido, como a viscosidade, massa específica e tensão superficial.

d) Tensão superficial

Um aumento na tensão superficial do líquido incrementa o tamanho das gotas e a pressão mínima de operação, além de diminuir o ângulo de cone do spray (QUISPE, 2013)

4.3.4 Injetores de mistura interna do tipo Y.

Como um atomizador eficiente de duplo fluido, com mistura interna de multi-orifício, os bicos do tipo Y, têm sido amplamente utilizados em caldeiras de óleo, fornos industriais, pulverizadores agrícolas, secado por spray (*spray dryer*) e sprays de pintura (ZHOU, ZHANG, *et al.*, 2010). O injetor tipo Y, é um injetor do tipo assistidos a ar (*air assisted*), pois tem um fluido auxiliar a alta velocidade, sobre o combustível líquido, sendo o desempenho da

atomização influenciado pela pressão na injeção, as propriedades do líquido e gás é a configuração geométrica do injetor. (LACAVA, PIMENTA e CARVALHO, 2004), (SONG e LEE, 1996)

Esses injetores inicialmente desintegram o combustível líquido dentro de uma câmara de mistura, gerando gotas e uma camada fina que se adere à parede da câmara, prosseguindo a quebra desta camada fora do injetor. O combustível já desintegrado em finas gotas se dispersa dentro da câmara de combustão, onde ocorre a queima destas gotas. (QUISPE, CARVALHO e COSTA, 2011)

O processo físico de atomização do injetor do tipo Y é mostrado na Figura 4. 6 onde o combustível líquido é injetado na câmara de mistura com um determinado ângulo, enquanto o líquido de atomização (ar ou vapor comprimido) é introduzido na câmara central com a pressão necessária para prover condições sônicas ao jato de saída. O combustível líquido forma uma película anular ao redor da parede da câmara de mistura, com o jato atomizado a alta velocidade passando pelo centro ao longo da câmara de mistura. Alguma atomização acontece na câmara de mistura, mas a maior quantidade sai da câmara em forma de lâminas de líquido, que são desintegradas em ligamentos e depois em gotas. A secundária atomização acontece a seguir, fora do atomizador por alguns 50 diâmetros da câmara de mistura, a jusante.

O processo é afetado pela relação ar/combustível, geometria da câmara de mistura e velocidade do líquido atomizador. (CHIGIER, 1976)

Song e Lee (1996), fizeram a descrição do mecanismo de atomização baseadas na visualização do fluxo de água com ar. A primeira é chamada “modo de colisão direta”, mostrada na Figura 4. 7, é caracterizada pelo choque da corrente de ar com o líquido, gerando gotas perto da saída do líquido, a seguinte região, B é a região “modo de arrastamento/deposição” que apresenta uma película delgada circunferencial, não uniforme, em uma ampla faixa, onde as gotas são geradas pelo cisalhamento do jato de ar a alta velocidade e o anel de líquido na parede da câmara. Ao mesmo tempo, nesta zona algumas gotas já geradas pelo modo de colisão direta se aglutinam e depositam na película líquida. Assim, o comprimento da porta de mistura desempenha um papel primordial nesta zona de escoamento de névoa-anular, porque as chances de arrastamento/deposição das gotas incrementa-se com o incremento da camara de mistura, uma vez que o tempo de residência torna-se mais longo e a superfície interfacial entre o ar e a película de água também aumenta. A atomização pelo “modo de desintegração da película

líquida” (região C) também é afetada pelo comprimento da câmara de mistura devido ao movimento entre o ar e o jato de água. A Tabela 4. 6 mostra um resumo do mecanismo descrito.

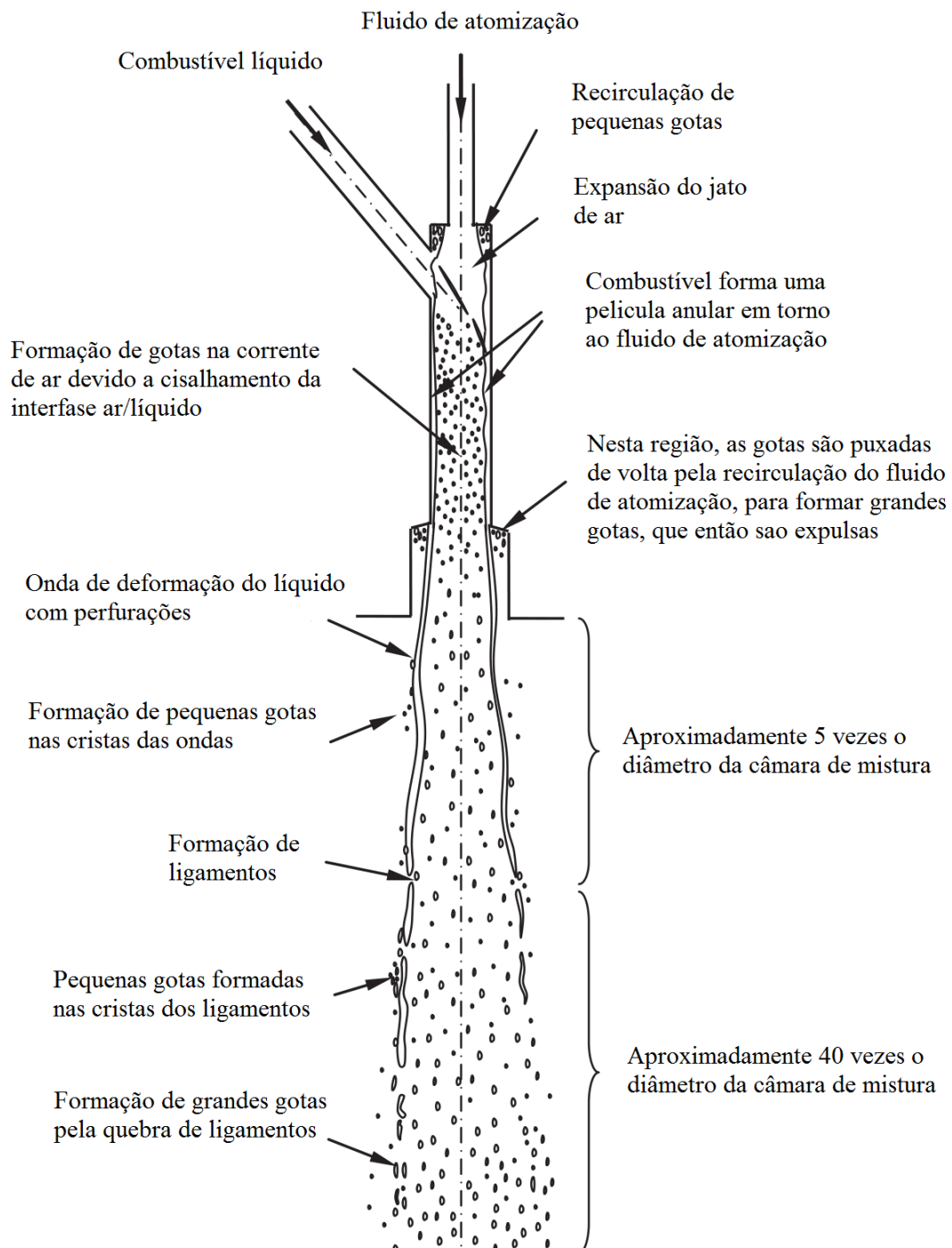


Figura 4. 6 Atomização do líquido em um injetor tipo Y (MULLINGER e CHIGIER, 1974)

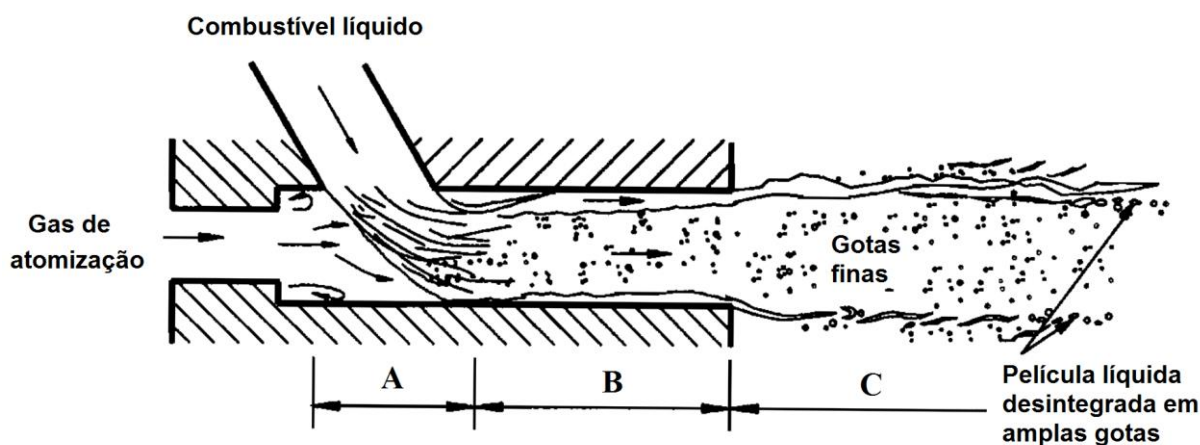


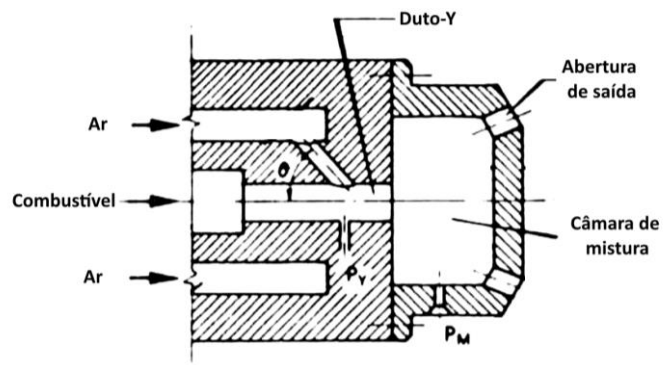
Figura 4. 7 Ilustração esquemática do mecanismo de atomização em atomizadores tipo Y (SONG e LEE, 1996)

Tabela 4. 6 Resumo da descrição do mecanismo de atomização de um injetor tipo Y (SONG e LEE, 1996).

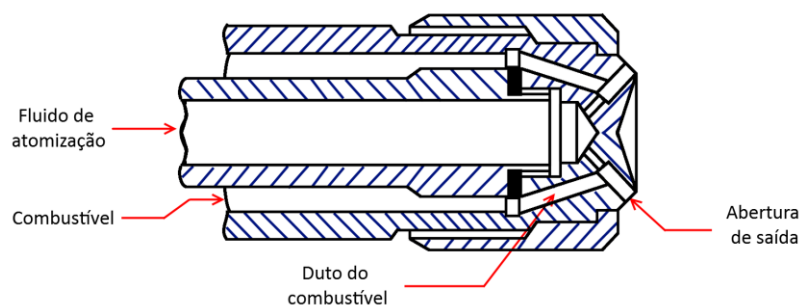
Região	Modo	Principal fenômeno
A	Colisão direta	Gotas geradas pela colisão entre o jato líquido e o fluido de atomização (gás)
B	Arrastamento, deposição das gotas	- Uma película líquida anular é formada e o fluxo de ar é distorcida e direcionada na direção axial. - Gotas são geradas pelo fluxo de ar cisalhante e a entrada do ar ao núcleo. - Algumas gotas aglutinam-se entre elas e são depositadas na película líquida.
C	Desintegração da película líquida	A película líquida desintegra-se em ligamentos e depois em gotas longas fora do atomizador

Na bibliografia existem outros tipos de configurações destes tipos de atomizadores, como os mostrados na Figura 4. 8.

A Figura 4. 9 apresenta um esquema típico desse tipo, onde o fluido auxiliar pode ser ar comprimido, ou em caso houver vapor no processo, como em caldeiras. Também a figura, apresenta as características geométricas que definem a configuração do injetor Y (LACAVA, PIMENTA e CARVALHO, 2004)



(a)



(b)

Figura 4. 8 Outras configurações de atomizadores tipo-Y (a) ENEL Y-duct atomizador de mistura interna, (GRAZIADIO, 1987). (b) Atomizador Babcock Y-jet, (LEFEBVRE, 1989)

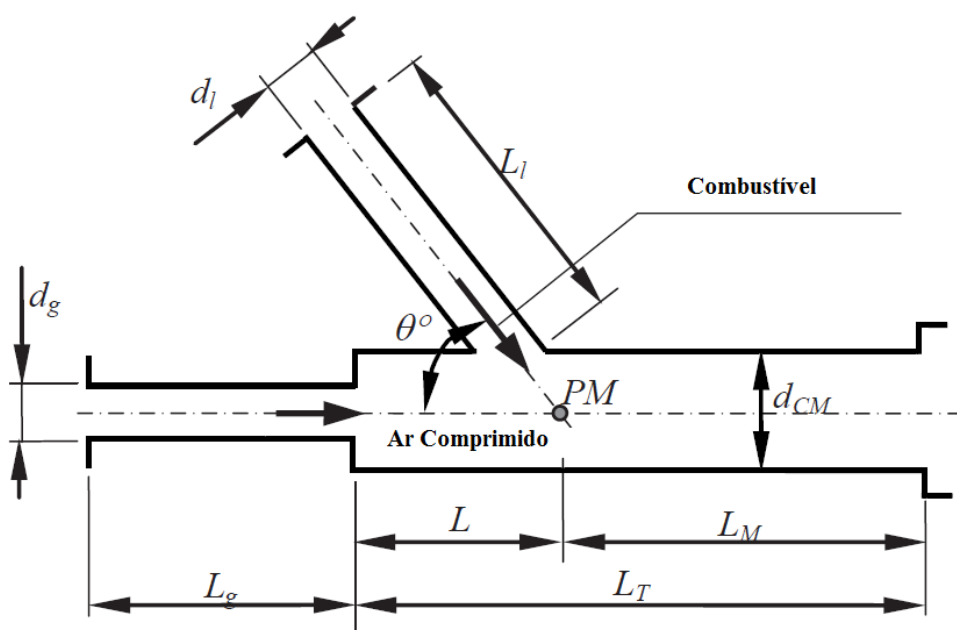


Figura 4. 9 Esquema de um injetor tipo Y-Jet e suas principais dimensões (MULLINGER e CHIGIER, 1974)

Dentre os injetores conhecidos, os injetores de tipo Y são classificados como injetores de jato de ar de mistura interna e são muito utilizados devido a:

- 1) Sua configuração ser relativamente simples, sendo adaptáveis para a construção com materiais resistentes à erosão e à corrosão térmica.
- 2) O ângulo de pulverização (*spray angle*) não variar com a mudança da vazão de combustível ou gás de atomização, o que difere de outros injetores.
- 3) Uma boa qualidade do spray com baixo consumo do fluido auxiliar (gás de atomização).
- 4) Capacidade de trabalho com combustíveis altamente viscosos. (QUISPE, 2013)

Muitas metodologias foram propostas e estudadas para o projeto de atomizador tipo Y, sendo a metodologia apresentada por Mullinger & Chigier (1974), e depois utilizada por Lacava, Carvalho & Mc Quay (1998), Lacava, Pimenta & Carvalho (2004) e Quispe (2013), a metodologia utilizada neste trabalho. Esta metodologia contém os parâmetros do projeto recomendados, os quais são apresentados na Tabela 4. 7

Tabela 4. 7 Recomendações para projeto das dimensões de um atomizador tipo Y-jet (MULLINGER e CHIGIER, 1974).

Parâmetro	Recomendado
Diâmetro da linha de ar	d_g (calculado)
Diâmetro da linha de combustível	$d_l = d_g$
Diâmetro da câmara de mistura	$d_{CM} = (1,4 - 1,8)d_g$
Comprimento de pre-mistura	$L = (1-2)d_g$
Comprimento de mistura	$L_M = (4-5)d_g$
Comprimento total da câmara	$L_T = L + L_M$
Comprimento da linha de ar	$L_g > 2d_g$
Comprimento da linha de combustível	$L_l > 2d_g$
Ângulo entre os eixos das linhas de alimentação	$\theta = 52^\circ$

4.3.5 Injetores efervescentes

A técnica da atomização efervescente foi desenvolvida no final do 1980 por Lefebvre e colaboradores, sendo descrita, a técnica formalmente como: “atomização de líquido aerado” e não obteve o nome de efervescente até 1990. O desenvolvimento do atomizador efervescente foi devido as desvantagens associadas com a atomização flash e a dissolução do gás de atomização. A atomização flash depende da rápida evaporação de uma pequena quantidade do líquido, porque neste estado (gasoso) o volume ocupado é maior ocupando um volume maior na saída do bocal. O problema com esta técnica é a baixa taxa de crescimento das borbulhas no líquido, e que está limitada a líquidos com alta volatilidade ou tenham alto conteúdo de gás dissolvido.

Uma solução para o problema descrito foi a atomização efervescente, na atomização efervescente, o gás é introduzido (ar para o caso da combustão) diretamente dentro da vazão líquida, para criar um escoamento borbulhante de duas fases. O método para injetar o ar no líquido é o método da *injeção supercrítica*, baseado na dissolução (*flashing*) intermitente de gás no líquido. Esse tipo de atomizador é mostrado na Figura 4. 10 (LEFEBVRE, 1989; QIAN e LIN, 2011; SOVANI, SOJKA e LEFEBVRE, 2001).

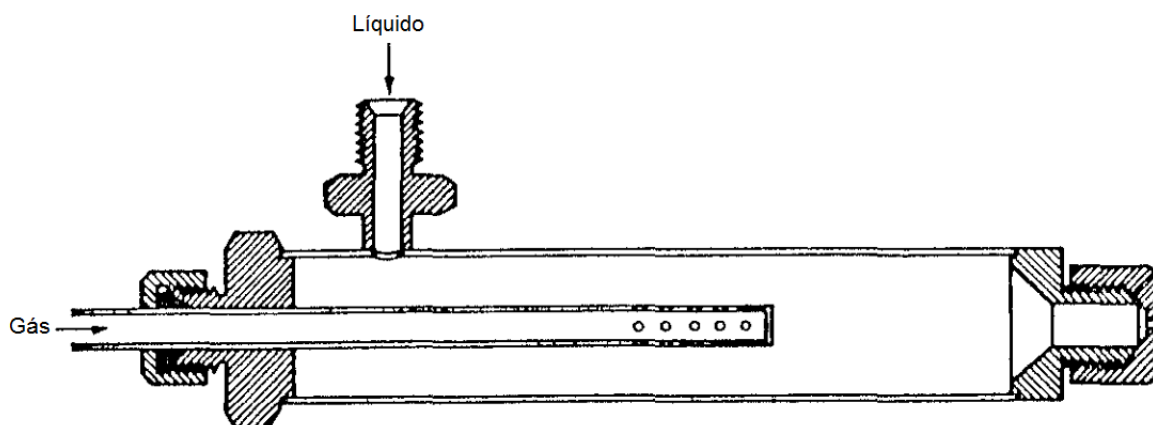


Figura 4. 10 Atomizador de escoamento efervescente, (LEFEBVRE, 1989).

Como o líquido que vaza através do orifício de saída, é pressionado pelas borbulhas e gás são formados ligamentos e folhas planas de líquido. Se a queda de pressão é suficientemente grande, ao longo do orifício de descarga, aquelas folhas planas são rotas em pequenas gotas, devido à expansão rápida das borbulhas do gás, o qual acontece a jusante do orifício de descarga. Uma das principais vantagens do atomizador efervescente, é o uso eficiente do ar, sendo possível uma boa atomização com uma pequena vazão do gás atomizador, sendo usado quando o gás de atomização é escasso (CHIN e LEFEBVRE, 1993; LEFEBVRE, 1989).

a) Vantagens e desvantagens:

As vantagens do atomizador efervescente são:

- Boa atomização com uma baixa pressão de injeção, e baixas taxas de fluxo do gás. O tamanho do diâmetro médio é comparável ao obtido para a mesma taxa gás/líquido com atomizadores do tipo assistidos a ar (LEFEBVRE, 1989; SOVANI, SOJKA e LEFEBVRE, 2001; QIAN e LIN, 2011)
- O sistema contém grandes furos e passagens, o que reduz grandemente os problemas de entupimento (plugging) que acontecem, por exemplo, com combustíveis residuais os quais precisam grandes orifícios e passagens para evitar o entupimento, pode ser usado com soluções viscosas, suspensões, fluidos não newtonianos, etc. (LEFEBVRE, 1989; SOVANI, SOJKA e LEFEBVRE, 2001; QIAN e LIN, 2011).
- Para aplicações de combustão, a aeração do spray pelas borbulhas do ar diminuem o fuligem e fumaça na saída. (LEFEBVRE, 1989)
- A simplicidade do dispositivo permite uma boa confiabilidade, resistência, fácil manutenção e baixo custo (LEFEBVRE, 1989; SOVANI, SOJKA e LEFEBVRE, 2001).
- Para uma determinada pressão de injeção, são obtidas menores gotas em comparação ao outros tipos de atomizadores (SOVANI, SOJKA e LEFEBVRE, 2001) .
- As taxas de escoamento do gás são menores em comparação com outras formas de atomização de fluido duplo (SOVANI, SOJKA e LEFEBVRE, 2001).
- O tamanho meio da gota é insensível à viscosidade do líquido, o que permite o uso com diversos líquidos sem modificar o desempenho. (SOVANI, SOJKA e LEFEBVRE, 2001)

Desvantagem

- A principal desvantagem é a necessidade de suprimento de gás a alta pressão.

b) Regime borbulhante

Os padrões de fluxo que acontecem num duto são variáveis e com comportamento diferenciado, para o caso de um duto horizontal foram determinados experimentalmente diferentes tipos de regimes: estratificada, onda, anular, golfadas, pistonado, disperso e borbulhante.

O regime borbulhante é caracterizado pela presença de pequenas gotas de ar dentro do líquido, onde como em outros regimes este é determinado pelas características do líquido, gás,

e o duto de vazamento. O padrão de fluxo para escoamento bifásico horizontal, num atomizador, pode ser prevista na Figura 4. 11:

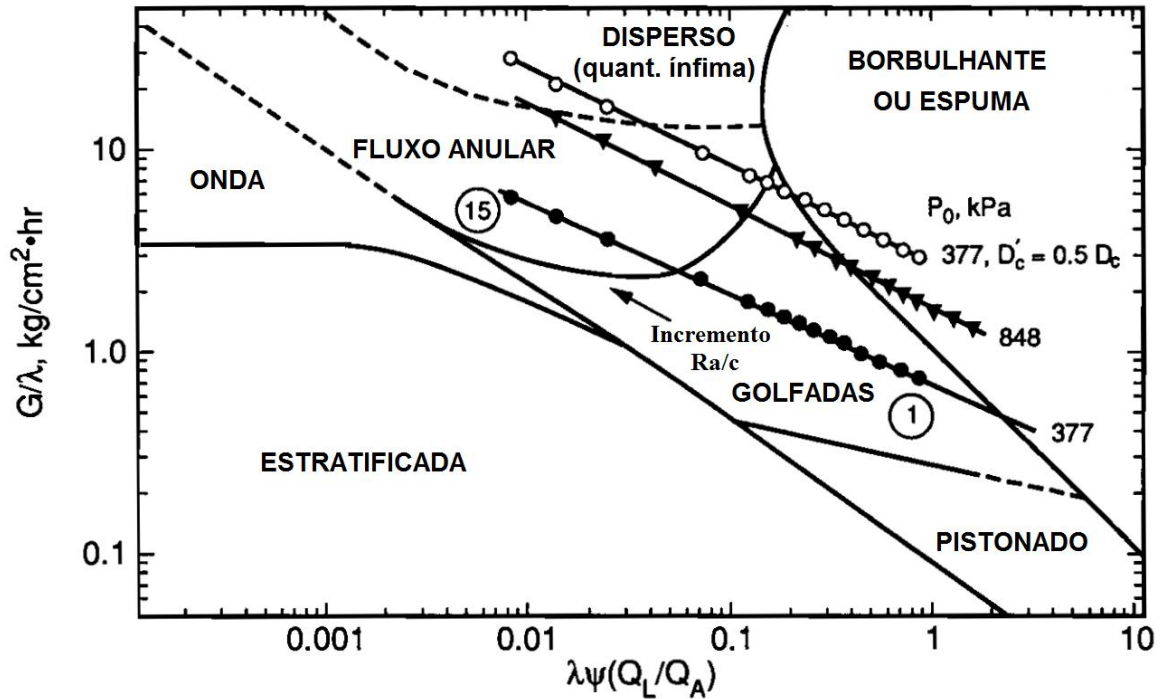


Figura 4. 11 Regimes de fluxo para misturas ar/água num escoamento horizontal, (CHIN e LEFEBVRE, 1993)

Onde mostra-se a influência da taxa ar/líquido, pressão e diâmetro da câmara de mistura (ALR, D_c , P) no regime do fluxo bifásico, onde G é o fluxo mássico do gás em $\text{kg}/\text{cm}^2\text{h}$, e:

$$\lambda = (\rho'_G \rho'_L)^{0.5}, \quad \Psi = (\sigma')^{-1} (\mu'_L)^{1/3} (\rho'_L)^{-2/3}$$

Sendo, ρ'_L , μ'_L e σ' as taxas da viscosidade, massa específica e tensão superficial do líquido com os correspondentes valores da água.

Os atomizadores efervescentes trabalham no regime de bolha ou borbulhante, e por isso dá importância do regime de fluxo no atomizador, este tipo de atomizador aproveita a presença de pequenas gotas no fluxo, as quais são aceleradas no bico de saída do injetor produzindo um aumento de pressão nas gotas, as quais ao sair ao ambiente (com pressão atmosférica) explodem gerando uma melhor atomização com um menor gasto de energia.

c) Configurações do atomizador efervescente

Os atomizadores efervescentes são divididos em 3 grupos segundo a Figura 4. 12

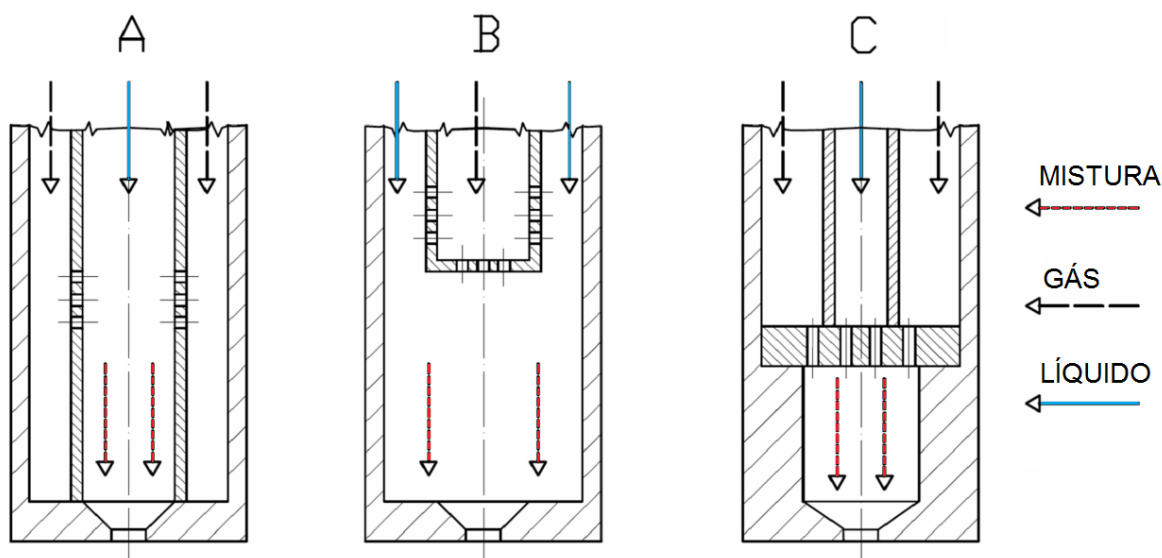


Figura 4. 12 Esquemas simplificados dos desenhos das diferentes configurações dos atomizadores efervescentes, Tipo A, B, C, (JEDELSKY, JICHA, *et al.*, 2009)

Tipo A: Neste tipo o líquido escoia geralmente no tubo central e o gás é introduzido no líquido por um conjunto de pequenos orifícios. Esta configuração com injeção do gás de fora para dentro permite um fluxo da área líquida grande; esta configuração evita o entupimento, o que faz adequado para suspensões. Esta é a mais utilizada pelos pesquisadores, a configuração com os fluidos trocados é menos usada. Esta configuração também é conhecida como de tipo outside-inside.

Tipo B: O líquido escoia no duto anular e o gás é introduzido no líquido por um conjunto de furos localizados nos lados o na parte final do aerador. Esta configuração também é conhecida como injetor do tipo inside-outside.

Tipo C: Os dois fluxos entram na câmara de mistura separadamente, permitindo o controle independente da velocidade de entrada, direção e distribuição do líquido e o gás.

Capítulo 5

CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO EXPERIMENTAL DA ATOMIZAÇÃO DO OPPU

5.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se a descrição das medições das principais propriedades físico – químicas do OPPU e os parâmetros importantes no desenvolvimento dos injetores, sendo a continuação descrito o processo de cálculo e sua metodologia.

5.2 Determinação experimental das propriedades do OPPU

As propriedades dos combustíveis são de muita importância na hora de fazer os cálculos relacionados ao projeto dos dispositivos de atomização do OPPU.

A importância da determinação das principais propriedades do combustível, estão relacionadas com o desempenho deste em uma bancada experimental, devido a que estes, fornecem uma ideia da natureza do combustível e seu comportamento.

Por isso, na caracterização do OPPU, nosso objetivo principal é determinar as principais propriedades físico-químicas do combustível derivado da pirólise de pneus, OPPU (Óleo pirolítico de pneu usado).

Na determinação das propriedades deste combustível alternativo, são realizadas as seguintes medições:

- Determinação da massa específica.
- Determinação da viscosidade
- Determinação da tensão superficial.
- Determinação do poder calorífico
- Determinação da composição CHNOS e cinzas

5.2.1 Conceitos iniciais

a. Massa específica:

A massa específica é definida como a concentração de massa homogênea por unidade de volume, a unidade no sistema internacional é o kg/m³.

$$\rho = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} \quad (5.1)$$

b. Viscosidade

A viscosidade é a medida quantitativa da resistência ao escoamento de um fluido, relacionando as tensões locais em um fluido em um fluido com a taxa de deformação por cisalhamento do elemento de fluido.

A viscosidade dinâmica ou viscosidade absoluta é a força requerida para movimentar uma unidade de área a uma unidade de distância, sendo as unidades de medida Pa.s, P (Poise), cP (CentiPoise).

Uma das medições de viscosidade é realizada pelo viscosímetro, tipo capilar, viscosímetro de Ostwald. Este viscosímetro está composto por um tubo em U, com dois bulbos e um depósito. O viscosímetro tem duas marcas, uma no começo e ao final do segundo bulbo. Estas marcas são sinalizadoras do início e do final da marcação do tempo, mediante o qual é calculada a viscosidade do líquido em análise. O viscosímetro, o qual foi usado nesta dissertação, é observado na Figura 5. 1.

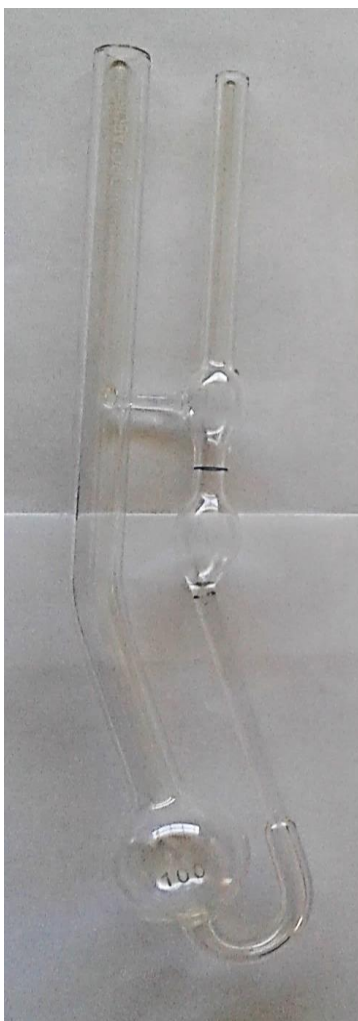


Figura 5. 1 Viscosímetro de Ostwald

O tempo de escoamento entre as duas linhas sinalizadoras do viscosímetro, permite o cálculo da viscosidade dinâmica, mediante a equação (5. 2):

$$\mu_{liq} = \mu_{H_2O} \frac{\rho_{liq} t_{liq}}{\rho_{H_2O} t_{H_2O}} \quad (5. 2)$$

Onde:

μ_{liq}	:	Viscosidade dinâmica do líquido (Pa.s)
μ_{H_2O}	:	Viscosidade dinâmica do líquido de referência, neste caso água (Pa.s)
ρ_{liq}	:	Massa específica do líquido (kg/m ³)
ρ_{H_2O}	:	Massa específica do líquido de referência, neste caso água (kg/m ³)
t_{liq}	:	Tempo decorrido pelo líquido entre as duas linhas no viscosímetro (s)

t_{H_2O} : Tempo decorrido pelo líquido de referência (água) entre as duas linhas no viscosímetro (s)

Esta equação (Eq. (5. 2)) é baseada no princípio de Poiseulle, para escoamento de um volume de líquido viscoso dentro de um tubo vertical reto.

Outro tipo de viscosímetro são os viscosímetros de rotação de estrutura e serve para determinar a viscosidade dinâmica de líquidos newtonianos. Nos viscosímetros rotativos a viscosidade é calculada em função do esforço necessário para uma determinada velocidade angular, numa superfície devido à viscosidade, isto é, devido à gradiente de velocidade gerado ao longo da superfície. O viscosímetro de rotação, que foi usado nesta dissertação, é mostrado na Figura 5. 2.



Figura 5. 2 Viscosímetro de rotação, QUIMIS

c. Tensão superficial

A tensão superficial é a magnitude, por unidade de longitude da força de tração resultante das forças de atração intermoleculares (forças de Van der Waals), existente as

moléculas de um líquido. Um dos métodos utilizados experimentalmente para determinar a tensão superficial é o método do anel, baseado na medição da força que é necessária para separar um anel da superfície do líquido do qual é necessário medir a tensão superficial. O detalhe do método é apresentado na Figura 5. 3.

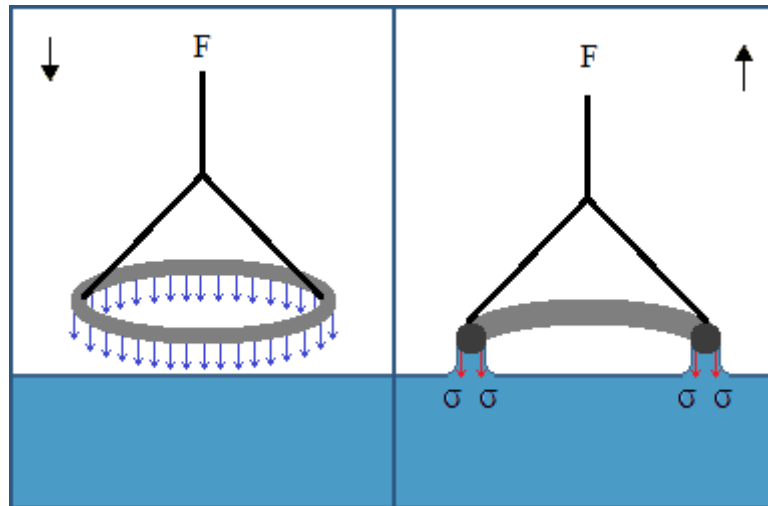


Figura 5. 3 Determinação da tensão superficial mediante o tensiômetro de Du Nouy

No momento em que o anel é separado da superfície do líquido, arrasta uma quantidade de líquido, teoricamente cilíndrica, que naquele momento encontra-se em equilíbrio com a força que é subministrada ao anel. Aquela força que é aplicada ao anel, está equilibrada com o peso da coluna do líquido a ser testado. A seguir a equação (5. 3) apresenta esta relação de forças.

$$\sigma = \frac{m \cdot g}{4\pi R} = \frac{F}{4\pi R} \quad (5. 3)$$

Onde:

R	:	Raio médio do anel (m)
F	:	Força no momento da quebra da película (N)
σ	:	Tensão superficial do líquido a medir (N/m)

Sendo $F = F_2 - F_1$ diferença entre F_1 que é o peso do anel, e F_2 que é a força no momento da quebra da película entre o anel e o líquido.

d. Poder calorífico

O calor de combustão, pode ser o Poder Calorífico Superior (PCS) ou Poder Calorífico inferior (PCI). Quando o estado da água nos produtos é gasoso (vapor) é o Poder Calorífico Inferior, e quando a água nos produtos é considerada no estado líquido (equações (4. 22) e (4. 23)), é o Poder Calorífico Superior.

O poder calorífico pode ser determinado mediante um calorímetro, o qual, é um instrumento utilizado para medir as quantidades de calor subministradas ou recebidas por um corpo. O calorímetro utilizado nos testes desta dissertação foi o IKA C200, este é do tipo isoperibólico, onde a temperatura dos arredores permanece constante, mediante o uso de um termostato, enquanto a temperatura do corpo muda com o tempo, a troca de calor depende da diferença de temperaturas dos arredores e na célula onde é realizada a medida.

e. Composição Elementar

A análise elementar é uma técnica que permite encontrar a quantidade de um elemento químico num determinado composto. Os elementos mais comuns a ser analisados geralmente são: o Carbono, Hidrogênio, Nitrogênio, Enxofre e Oxigênio. Estas quantidades são de muita utilidade ao momento de caracterizar os combustíveis, e permitem obter as características do combustível, podendo achar a fórmula empírica do composto.

5.2.2 Desenvolvimento do procedimento experimental e resultados

As medições dos parâmetros foram realizadas nas instalações de distintos laboratórios: Laboratório de Combustão e Gaseificação do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em Cachoeira Paulista, SP, Laboratórios de Química da Universidade Federal de Itajubá, e pelo Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), em São Paulo.

A seguir apresenta-se a metodologia para a determinação das propriedades do OPPU junto com os resultados. Os testes foram realizadas a uma temperatura de 24 °C no INPE, 25 °C na UNIFEI e 20 °C no IPT.

a) Massa específica

A determinação da massa específica do OPPU foi realizada mediante a medição de forma indireta, a partir da relação expressada na equação (5. 1).

A massa, foi determinada mediante o uso de uma balança de precisão, modelo Mettler M3 Micro-Scale / Balance Type M3, e o volume foi medido com uma seringa de alta precisão. Na Figura 5. 4 se apresenta o equipamento utilizado.



Figura 5. 4 Medição da massa com a Balança Mettler M3.

Um volume de 0,1 ml é medido na seringa, e logo pesado na balança de alta precisão, para isso foi necessário colocar um recipiente, fazer a pesagem do recipiente e logo, tarar a balança. A Figura 5. 5 apresenta detalhes da medição.



Figura 5. 5. Medição da mostra do OPPU

Com os dados obtidos de massa e volume é possível determinar a massa específica com a equação (5. 1), estes dados e os resultados são apresentados na Tabela 5. 1.

Tabela 5. 1 Resultados da determinação da massa específica.

Nº	Volume (ml)	Massa (mg)	Volume (m ³)	Massa (kg)	ρ (kg/m ³)
1	0,1	74,2	1×10^{-7}	$7,42 \times 10^{-5}$	742
2	0,1	76,5	1×10^{-7}	$7,65 \times 10^{-5}$	765
3	0,09	67,5	9×10^{-8}	$6,75 \times 10^{-5}$	750
Média					752,333

A determinação também foi realizada no IPT e Laboratórios da UNIFEI, sendo no IPT o análise, mediante o uso de um densímetro digital, a 20 °C segundo a norma ASTM D4052-11, obtendo-se como resultado 0,9207 g/ml (920 kg/m³); e na UNIFEI com uso de uma balança de alta precisão, uma proveta e uma pipeta descartável, sendo o resultado de 0,89116 g/mL (891,16 kg/m³). A medição da UNIFEI foi realizada para elucidar o melhor valor para a densidade, das duas medições realizadas anteriormente.

b) Viscosidade

O procedimento para determinar a viscosidade do OPPU com o viscosímetro de Ostwald consiste em tomar o tempo decorrido entre as duas linhas sinalizadas no viscosímetro, primeiro com o líquido de referência (água) e depois com o líquido que será medido (OPPU).

Para este procedimento foram necessários um viscosímetro, uma pipeta, e um termómetro (vide Figura 5. 6).

A água é colocada no viscosímetro e o tempo é medido, logo também é colocado o líquido a testar no viscosímetro e também é medido o tempo, ambas medições são realizadas com uma temperatura ambiente constante e similar as temperaturas a serem usadas nos testes (nosso caso 25 °C). Com os dados da água e do líquido testado (tempo, massa específica e viscosidade) é possível usar a equação (5. 2). A Figura 5. 7 apresenta os detalhes da medição do OPPU.

Os resultados das medições são processados na Tabela 5. 2, onde são encontrados os resultados mediante o uso da equação (5. 2).

Outras medições foram realizadas com um viscosímetro de rotação, marca QUIMIS, onde posicionou-se o óleo pirolítico abaixo do spindle SP1, o qual foi abaixado até que este

estivesse submerso no óleo. Estabeleceu-se a rotação fixa em 100 rpm. Após devida ajustagem das unidades do aparelho, iniciou-se as medições. Foram efetuadas 3 medições. Como é mostrado na Figura 5. 8, e os resultados na Tabela 5. 3

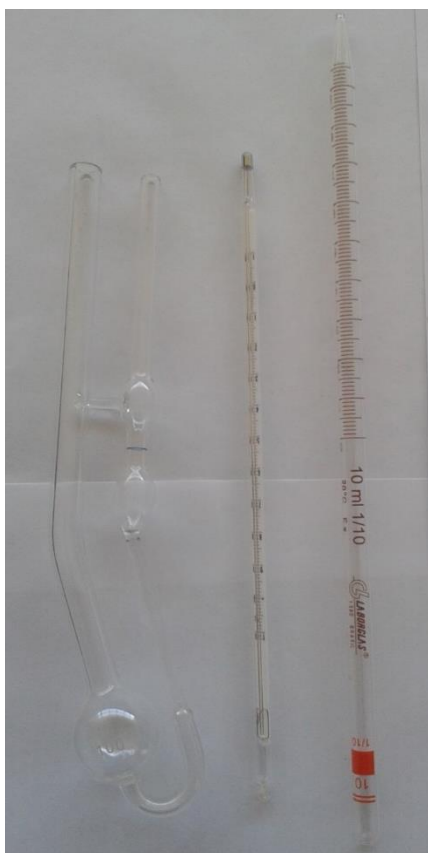


Figura 5. 6 Aparelhos necessários para a determinação da viscosidade



Figura 5. 7 Detalhes da Medição do OPU no viscosímetro de Ostwald

Tabela 5. 2 Resultados da medição da viscosidade com o Viscosímetro de Ostwald.

Nº	Tempo	Viscosidade			
		dinâmica (Pa.s)	mPa.s	cP	cSt
1	234,55	0,0037	3,71	3,71	4,026
2	217,955	0,0034	3,44	3,44	3,74
Média			3,58	3,58	3,88



Figura 5. 8 Medição do OPPU no viscosímetro de rotação

Tabela 5. 3 Medições no viscosímetro de rotação

Nº	Temperatura (°C)	Viscosidade (mPa.s)	Viscosidade (cSt)
1	25,5	5,8	6,30
2	25,5	5,94	6,45
3	25,1	6	6,52
Media			6,42

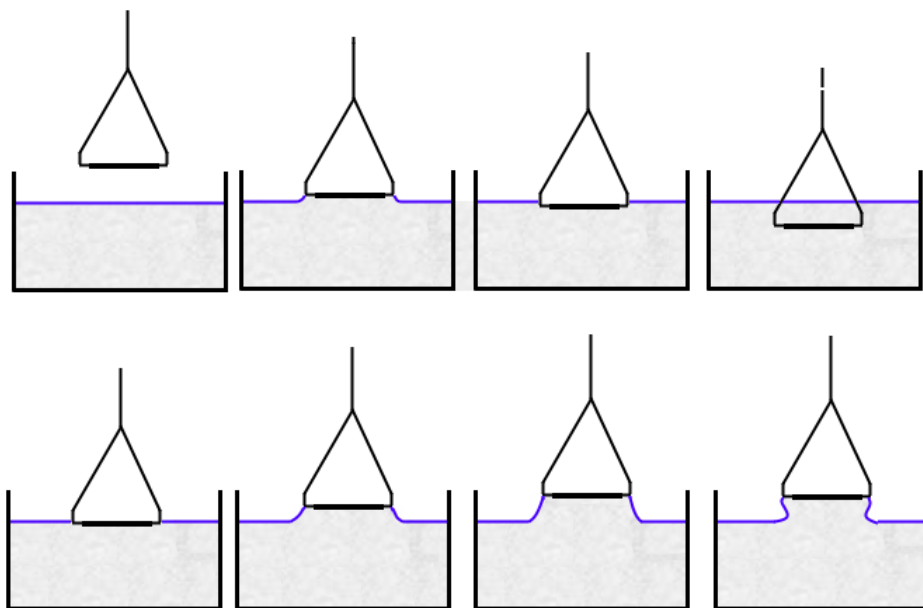
c) Tensão superficial

A tensão superficial foi encontrada mediante o uso do método do anel (tensiômetro do Du Nouy). É preciso o uso de um dinamômetro, termômetro é um anel, mostrados na Figura 5. 9, além de um recipiente (Bécker graduado) onde é colocado o OPPU.



Figura 5. 9 Dinamomêtro, termometro e anel.

O anel é alinhado, para evitar erros de medição, até ficar paralelo à superfície do líquido, então é medido o peso do anel. Logo é submerso no OPPU, até molhar todo o contorno dele, a continuação foi retirado o anel e medida a força no dinamometro, no momento da ruptura da película entre o anel e o líquido, como é mostrado na Figura 5. 10.



(a)

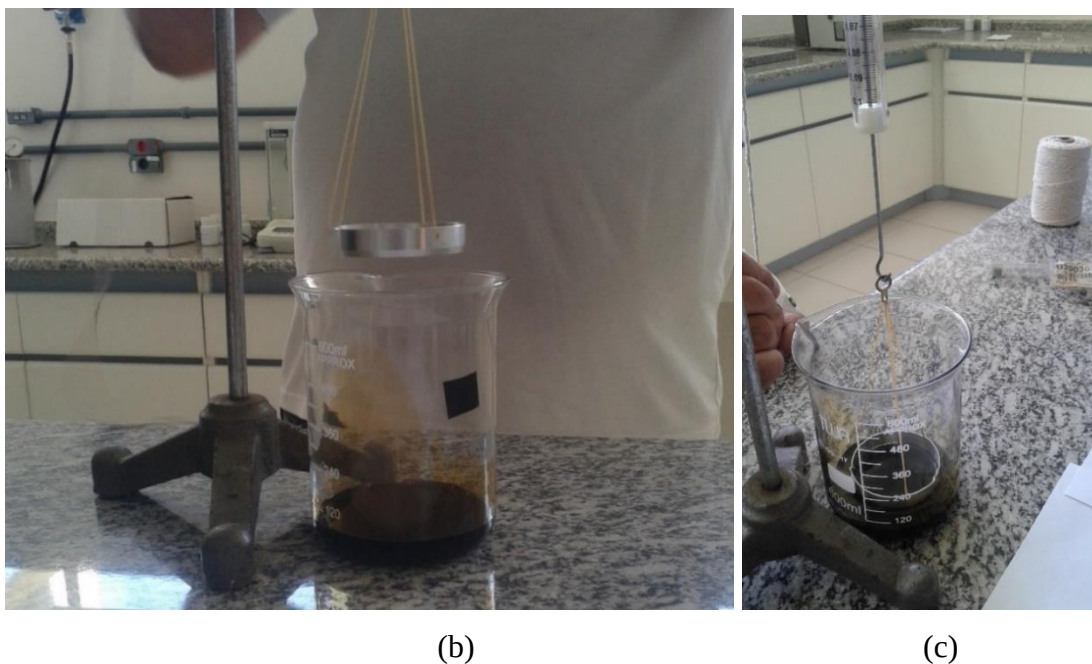


Figura 5. 10 Determinação da tensão superficial mediante o método do anel (tensiômetro do Du Nouy) (a) Esquema da submersão do anel no líquido em 8 passos (b) e (c) Procedimento no laboratório com o OPPU.

Os resultados obtidos com a equação (5. 3) são mostrados na Tabela 5. 4

Tabela 5. 4. Resultados de tensão superficial obtidos mediante o método de Du Nouy.

Nº	Inicial	Final	Diferença	σ (N/m)	σ (dina/cm)
1	0,048	0,058	0,01	0,027	25,63
2	0,048	0,057	0,009	0,024	26,98
3	0,048	0,058	0,01	0,027	26,98
Média				0,026	26,53

O Laboratório de Química do Instituto de Matemática e Computação (IMC) da UNIFEI, possui um dispositivo de alta precisão que trabalha com o princípio de operação do anel. Este aparelho é o tensiômetro LAUDA TD 3. Para efeito de comparação foi realizada uma medição da tensão superficial usando este aparelho.

Para a determinação da tensão superficial com este tensiômetro, coloca-se água destilada entre o frasco que contém a amostra, neste experimento OPPU, e a estrutura do equipamento. O objetivo da inserção da água é de ajudar a controlar a temperatura. Utilizou-se apenas o OPPU suficiente para preencher o frasco até a metade de seu volume.

Para a calibragem, deve-se, em primeiro lugar, colocar o anel de platina no gancho, para assim fazer a tara do anel. A Figura 5. 11 mostra uma imagem do anel pendurado no gancho e embaixo dele o frasco com o OPPU.

Após a tara do anel, se insere um peso conhecido no gancho, para assim efetuar a calibração. Com a devida regulagem do equipamento realizada, coloca-se o termômetro (termopar de fio) dentro do frasco com o OPPU; a medição de temperatura é diretamente no material.



Figura 5. 11. Preparação do equipamento de medição.

Automaticamente, eleva-se o nível do patamar do frasco até que o anel encoste superficialmente no fluido do frasco. Com isso, o equipamento inicia automaticamente as medições por comando remoto. Após duas medidas iniciais para que a temperatura do fluido fosse estabilizada, foram efetuadas mais seis medições. Os resultados das medições iniciais são apresentados no painel de controle do tensiómetro, como mostra a Figura 5. 12.

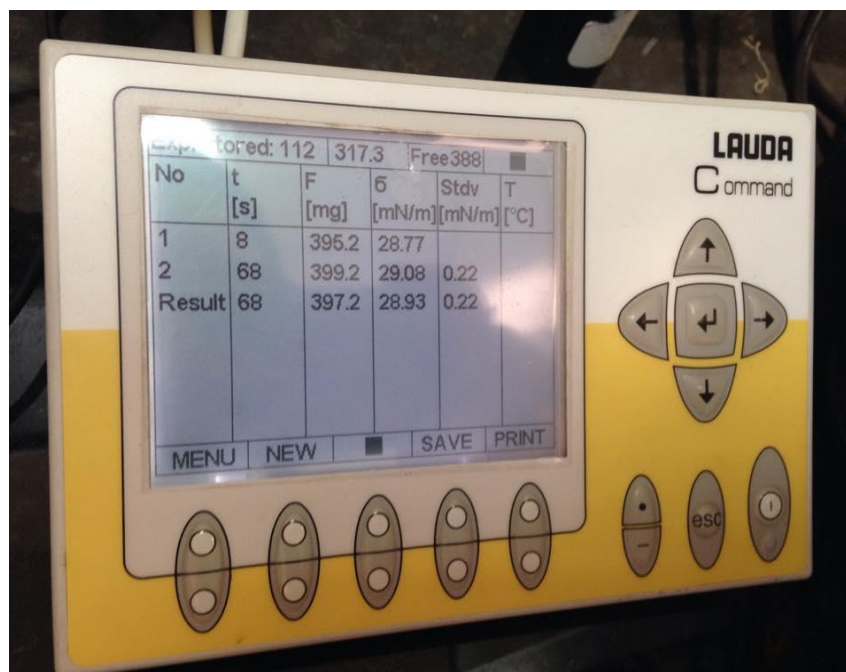


Figura 5. 12 Painel de controle com as primeiras medições de tensão superficial

Os resultados estabilizaram-se a partir da terceira medição, e estes dados são apresentados, na Tabela 5. 5

Tabela 5. 5. Resultados de tensão superficial obtidos com o tensiômetro LAUDA TD 3

Nº	°C	mN/m	N/m	σ (dina/cm)
3	25	28,93	0,029	28,93
4	24,7	29,44	0,029	29,44
5	24,8	29,49	0,029	29,49
6	24,9	29,59	0,030	29,59
7	24,9	29,57	0,030	29,57
8	24,9	29,56	0,030	29,56

d) Poder calorífico

O Poder calorífico superior foi determinado com um calorímetro de bomba de oxigênio IKA C200, disponível nos laboratórios do INPE. Este calorímetro é mostrado na Figura 5. 13.



Figura 5. 13 Calorímetro IKA C200

Os resultados obtidos, são mostrados na Tabela 5. 6.

Tabela 5. 6. Poder calorífico superior, determinado no calorímetro IKA C200

Nº	Massa	PCS (kJ/kg)
1	0,57	42229
2	0,21	41801
Média		42015



Figura 5. 14 Analisador Perkim Elmer 2400 Series II

e) Composição Elementar

A análise da composição elementar foi realizada com o analisador, disponível nos laboratórios do INPE, Perkim Elmer 2400 Series II CHNS/O Elemental Analyzer, que mede Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio (vide Figura 5. 14).

A Tabela 5. 7, mostra os resultados da composição elementar, em base mássica, obtidos no calorímetro.

Tabela 5. 7. Composição elementar do OPPU

Composto	%
C (%)	80,41
H (%)	9,15
N (%)	5,81
S (%)	2,17 ^a
O (%)	2,46 ^b

^a Obtido como média das referências bibliográficas mostradas na Tabela 4. 1

^b Obtido por diferença

No Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), também foram realizadas medições da composição do OPPU, as medições foram: de Carbono, Hidrogênio, Nitrogênio, Enxofre, Oxigênio e Cinzas, segundo a seguinte metodologia:

- Determinação do teor de carbono, hidrogênio e nitrogênio com a utilização de um analisador de carbono, hidrogênio e nitrogênio e uma balança analítica, segundo a norma ASTM D5291-10(15).
- Determinação do teor de cinzas total com a utilização de uma mufla, balança analítica e termômetro segundo a norma ASTM D482-13.
- Determinação do teor de enxofre total com a utilização de um analisador de enxofre e uma balança analítica, segundo a norma ASTM D1552-15. Os resultados apresentados na Tabela 5. 8.

5.2.3 Resumo

As características determinadas do OPPU nos laboratórios são apresentadas em forma de resumida na Tabela 5. 9, e os valores foram comparados e mostrados na Tabela 4. 1

Tabela 5. 8. Composição elementar do segundo IPT

Composto	IPT
C (%)	87,1
H (%)	9,65
N (%)	0,6
S (%)	0,89
O (%)	1,76
Cinzas (%)	<0,01

Tabela 5. 9. Resumo das propriedades do OPPU.

Característica	OPPU -UNIFEI
C (%)	87,1 ^a
H (%)	9,65 ^a
N (%)	0,6 ^a
S (%)	0,89 ^a
O (%)	1,76 ^a
Cinzas	< 0,01 ^a
Massa Especifica (kg/m ³)	920,7 ^a
Viscosidade (cSt)	5,15 ^b
Tensão Superficial (N/m)	28,091 ^b
PCS (MJ/kg)	42,015 ^c
PCI (MJ/kg)	39,89 ^d

^a Valores do IPT,

^b Obtido da média das medições na UNIFEI/INPE,

^c Valores obtido nas medições no INPE,

^d Calculado a partir do PCS e a composição elementar.

5.3 Dimensionamento do atomizador tipo Y para OPPU

5.3.1 Parâmetros do injetor

O estado de estagnação é definido como o estado onde a velocidade de escoamento é reduzido a zero isentropicamente. Alternativamente, é definido como, o estado de um fluido que é acelerado de um reservatório infinito, até obter o escoamento determinado.

Para um escoamento unidimensional, adiabático e reversível; de um gás perfeito, obtém-se os parâmetros do fluxo para o qual é aproximado o escoamento bifásico no injetor. (ZUCROW e HOFFMAN, 1976; BAUKAL e SCHWARTZ, 2001)

No cálculo dos parâmetros geométricos no injetor, é considerado um estado de estagnação e que, para o cálculo, o escoamento pode ser representado como escoamento monofásico considerando ar puro.

a. Temperatura de estagnação

A temperatura do ar, no bocal, é:

$$T = T_0 \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right) \quad (5.4)$$

Onde M é o número de Mach, k o coeficiente isentrópico do ar o subscrito 0 condições de estagnação.

Tendo em consideração um número de Mach, $M = 1$ (BAUKAL e SCHWARTZ, 2001; OOSTHUIZEN e CARCSCALLEN, 2014), resulta

$$T^* = T_0 \left(\frac{2}{k+1} \right) \quad (5.5)$$

b. Pressão de estagnação

Sendo um processo adiabático reversível, tem-se a equação (5.6):

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{k/(k-1)} \quad (5.6)$$

E com a equação anterior (equação (5.6)), obtém-se:

$$\frac{P}{P_0} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{k/(k-1)} \quad (5.7)$$

E para condições sónicas a pressão do ar é:

$$p^* = p_0 \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (5.8)$$

c. Massa específica de estagnação

Da equação de gases ideais, tem-se a equação (5.9)

$$\rho_0 = P/RT \quad (5.9)$$

sendo R a constante universal dos gases.

A partir da equação (5.7) e (5.9) obtém-se a equação (5.10)

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{1/(k-1)} \quad (5.10)$$

Ou diretamente da Pressão e Temperatura, a massa específica do ar é:

$$\rho^* = \frac{p^*}{RT^*} \quad (5.11)$$

d. Área do bocal no injetor

A velocidade é definida pela equação (5.12)

$$a = \sqrt{kRT^*} \quad (5.12)$$

Da equação de continuidade, da equação (5.11) e (5.12)

$$\dot{m} = \rho A v = \frac{p A v}{RT} = p A v \times \frac{1}{\sqrt{kRT^*}} \times \frac{\sqrt{k}}{\sqrt{RT^*}} = p A M \left(\frac{k}{RT}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.13)$$

onde o valor de T está na equação (5.4)

$$\dot{m} = p A M \left(\frac{k}{RT}\right)^{\frac{1}{2}} = p A M \left[\frac{k}{RT_0} \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right) M^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.14)$$

Com a equação (5.7)

$$\dot{m} = p_0 A M \left(\frac{k}{RT_0} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\left(1 + \frac{k-1}{2} \right) M^2 \right]^{\frac{k+1}{2(1-k)}} \quad (5.15)$$

Para o caso de $M=1$, obtém-se:

$$\dot{m}^* = \frac{p_0 A_g^*}{\sqrt{RT_0}} \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (5.16)$$

E a partir desta equação é obtida a área do duto do ar, obtendo-se a equação (5.17)

$$A_g^* = \dot{m}^* \frac{\sqrt{RT_0}}{p_0 \sqrt{k}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{-\frac{k+1}{2(k-1)}} \quad (5.17)$$

As pressões de injeção do combustível (P_{ic}), e velocidade de injeção (v_{ic}) são calculados com as equações (5.18) e (5.19) (LACAVA, CARVALHO e MCQUAY, 1998)

$$p_{ic} = \left(\frac{\dot{m}_c}{C_d A_g^*} \right)^2 \times \frac{1}{2 \times \rho_c} \quad (5.18)$$

$$v_{ic} = C_d \sqrt{\frac{2 \times P_{ic}}{\rho_{comb}}} \quad (5.19)$$

Onde C_d , é o coeficiente de descarga é varia entre 0,7 e 0,85 segundo Mullinger e Chigier (1975)

O diâmetro mediano mássico das gotas (MMD) é determinado da equação desenvolvida por Wigg (1964) que também foi analisada e utilizada por Quispe (2013) (LACAVA, CARVALHO e MCQUAY, 1998; QUISPE, 2013)

$$D_{MMD} = \frac{200 \nu_L^{0,5} \dot{m}_L^{0,1} (1 + \dot{m}_L / \dot{m}_A)^{0,5} h^{0,1} \sigma^{0,2}}{\rho_{AT}^{0,3} U_{AR}} \quad (5.20)$$

Onde:

D_{MMD} : Diâmetro mediano de massa das gotas do spray (μm)

ν_L : Viscosidade cinemática do combustível (cSt)

$\dot{m}_L$: Vazão mássica do combustível (g/s)

$\dot{m}_A$: Vazão mássica do gás de atomização (g/s)

h : Raio da câmara de mistura (cm)

σ : Tensão superficial do combustível (dinas/cm)
 ρ_{AT} : Massa específica do ar de atomização (g/cm³)
 U_{AR} : Velocidade do ar de atomização (m/s)

5.3.2 Cálculo dos parâmetros do injeto

Para o cálculo do injetor foram caracterizados segundo sua potência, sendo consideradas duas potências térmicas, de 5 kW e 38 kW, sendo mostrada a continuação o processo de cálculo do injetor de 5 kW. A eleição desta potência foi realizada depois de analisar a influência deste parâmetro no tamanho de gota no líquido atomizado para várias potências (injetores de: 5, 15, 30, 50 e 75 kW), isto é mostrado na Figura 5. 15, com os valores iniciais mostrados na Tabela 5. 10.

Tabela 5. 10. Valores de estagnação

Parâmetro	Valor
T_0	300 K
P_0	3 bar
k	1,4
R	287 J/kg·K

Sendo T_0 a temperatura do ar na entrada do compressor, P_0 a pressão subministrada pela linha do gás, e k referido ao ar.

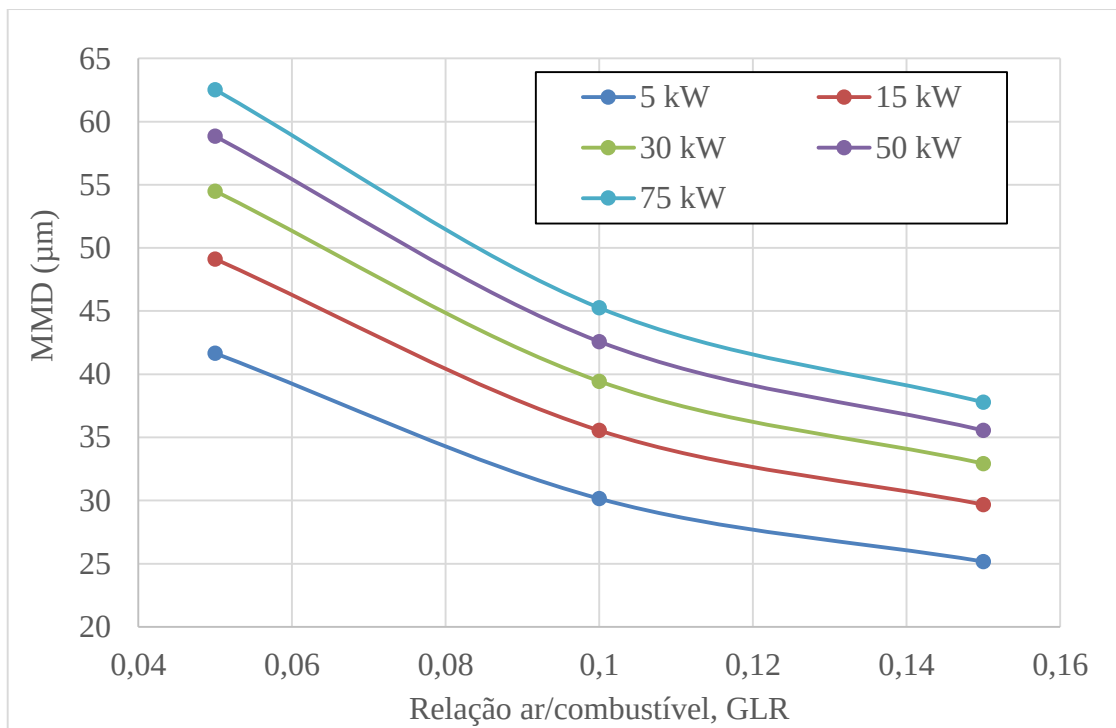


Figura 5. 15 Cálculo de diâmetro mediano mássico (MMD), para diferentes potencias

Sendo possível perceber que o tamanho de gota é proporcional à potência liberada pelo combustível.

Para um injetor de 35 kW, a vazão mássica de combustível é calculada:

$$\dot{m}_{comb} = \frac{Potência}{PCI} = \frac{35 \text{ kW}}{39891 \text{ kJ/kg}} = 0,00088 \text{ kg/s} \quad (5. 21)$$

A relação entre as vazões mássicas do gás de atomização e do líquido (GLR), tem um valor na faixa de 0,05 – 0,15 (LACAVA, CARVALHO e MCQUAY, 1998) para a eleição desta relação, foram realizados cálculos para determinar a influência desta relação no tamanho de gota, isto é mostrado na Figura 5. 16 e Figura 5. 15.

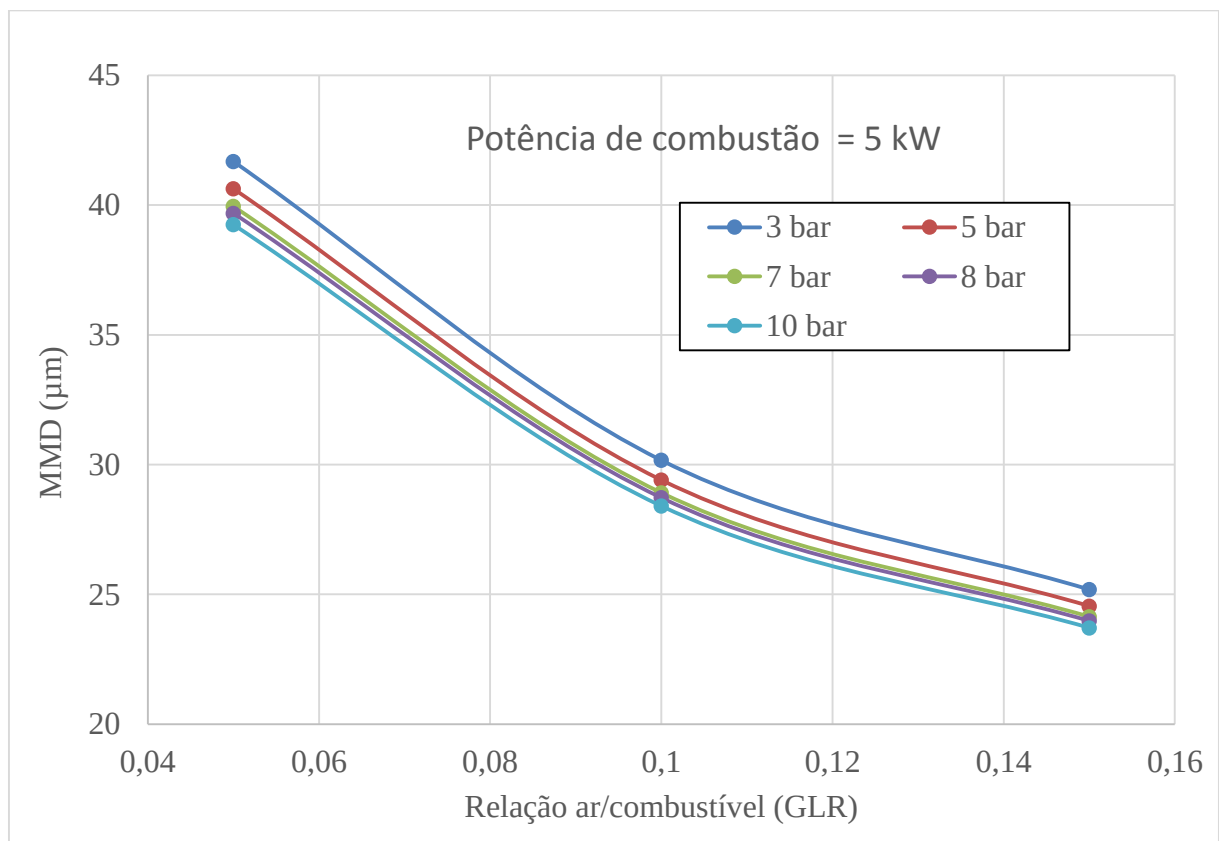


Figura 5. 16 Cálculo de diâmetro mediano mássico, para diferentes pressões

A GLR selecionada para o cálculo foi 0,15, o valor máximo da faixa recomendada (LACAVA, CARVALHO e MCQUAY, 1998) e com este valor se obter o maior escoamento de ar e combustível, com isto garantir dimensões maiores dos dutos internos do injetor, o qual faz a usinagem mais fácil.

$$GLR = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_l} = 0,15 \quad \rightarrow \quad \dot{m}_g = 0,000132 \text{ kg/s} \quad (5. 22)$$

Com as equações do gás de atomização em condições críticas, com as equações (5. 5), (5. 8), (5. 11), (5. 12) e (5. 17) são calculados os parâmetros.

Temperatura do ar

$$T^* = 300 \times \left(\frac{2}{1,4 + 1} \right) = 250 \text{ K} \quad (5. 23)$$

Pressão do ar

$$p^* = 300 \left(\frac{2}{1 + 1,4} \right)^{\frac{1,4}{0,4}} = 158,48 \text{ kPa} \quad (5. 24)$$

Massa específica do ar

$$\rho^* = \frac{158,48}{250 \times 0,287} = 2,21 \text{ kPa} \quad (5. 25)$$

Velocidade do ar na entrada da câmara de mistura

$$v^* = \sqrt{1,4 \times 287 \times 250} = 316,94 \text{ m/s} \quad (5. 26)$$

Diâmetro do bocal do injetor

$$A_g^* = 1,88 \times 10^{-5} \times \frac{\sqrt{287 \times 250}}{3 \times 10^5 \sqrt{1,4}} \left(\frac{2}{1,4 + 1} \right)^{-\frac{1,4+1}{2(1,4-1)}} = 1,88 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \quad (5. 27)$$

$$d_g = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 1,88 \times 10^{-7}}{\pi}} \quad (5. 28)$$

A pressão de injeção do combustível e velocidade de injeção do combustível são calculados das equações (5. 19) e (5. 18) com o $C_d = 0,75$ e as propriedades da Tabela 5. 9

$$p_{ic} = \left(\frac{0,00013}{0,75 \times 2,69 \times 10^{-8}} \right)^2 \times \frac{1}{2 \times 920,7} = 21029,39 \text{ Pa} \quad (5. 29)$$

$$v_{ic} = 0,75 \times \sqrt{\frac{2 \times 21029,39}{920,7}} = 5,069 \text{ m/s} \quad (5.30)$$

Diâmetro mediano de massa das gotas do spray, com a equação (5.20)

$$D_{MMD} = \frac{200 \times 5,1532^{0,5} \times 0,87739^{0,1} (1 + 1/0,15)^{0,5} \times 0,044032^{0,1} 28,091^{0,2}}{0,0022381^{0,3} \times 316,9384798} \quad (5.31)$$

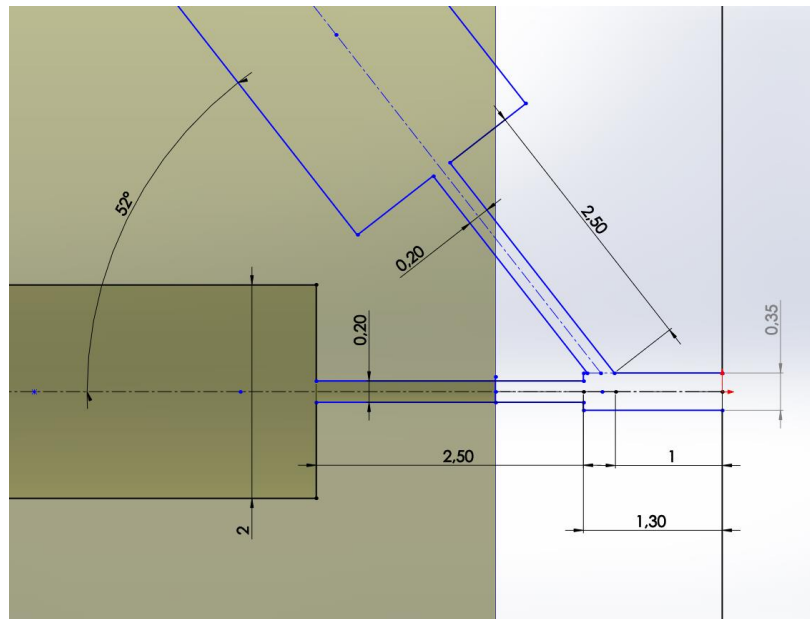
$$= 34,82 \mu\text{m}$$

Com o mesmo procedimento realizado até agora com o injetor de 35 kW, foram calculados os valores para uma potência de 7 kW, valores que são mostradas na Tabela 5.11 junto com os valores para o injetor de 35 kW.

Tabela 5.11 Valores calculados para uma potencia de 7 kW e 35 kW.

Parâmetro	7 kW	35 kW
$\dot{m}_{comb}$	0,00018 kg/s	0,00088 kg/s
$\dot{m}_g$	0,000026 kg/s	0,00013 kg/s
T^*	250 K	250 K
p^*	158484,54 Pa	158484,54 Pa
ρ^*	2,21 kg/m ³	2,21 kg/m ³
v^*	316,94 m/s	316,94 m/s
A_g^*	3,76×10 ⁻⁰⁸ m ²	1,88×10 ⁻⁰⁷ m ²
d_g	0,00022 m	0,00049 m
p_{ic}	21029,39 Pa	21029,39 Pa
v_{ic}	5,069 m/s	5,069 m/s
D_{MMD}	27,032 μm	34,82 μm

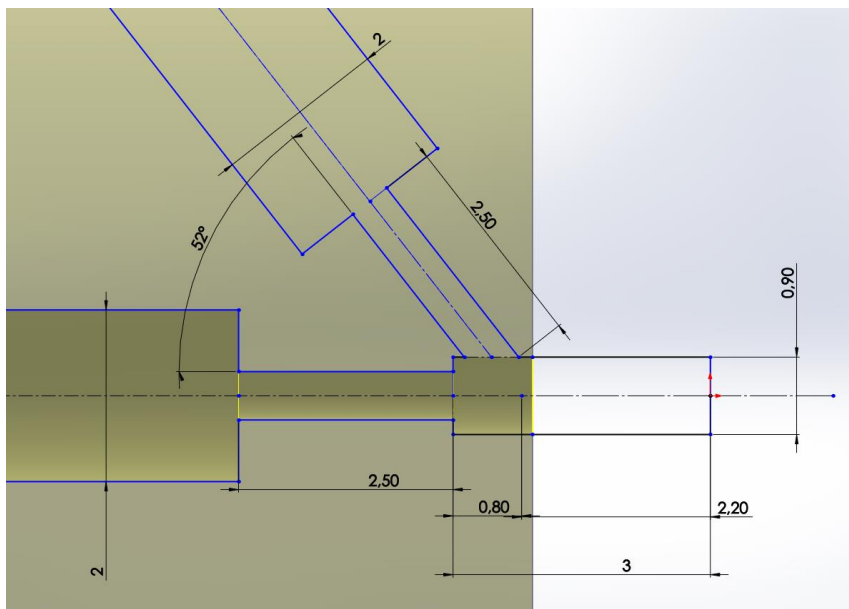
Os parâmetros geométricos, de acordo as recomendações da Tabela 4.7 são apresentados na Tabela 5.12 e são mostrados na Figura 5.17 e Figura 5.18.



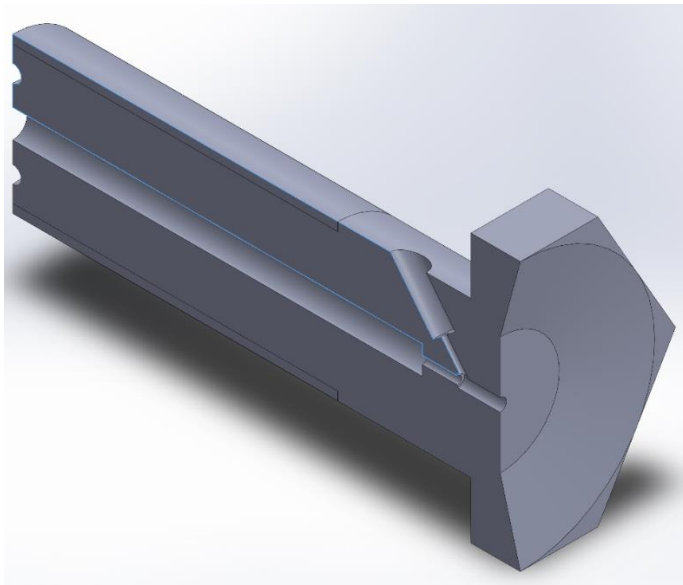
(d)

Figura 5. 17 Dimensões do injetor de 7 kW

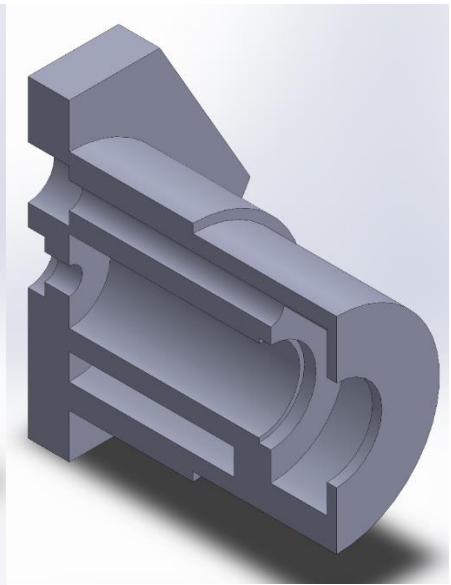
Todas as dimensões foram feitas em função das medidas padrão das ferramentas de usinagem, as características do injetor de 35 kW são apresentadas a detalhe, devido a que foi a peça que foi usinada, devido a sua maior factibilidade de fabricação.



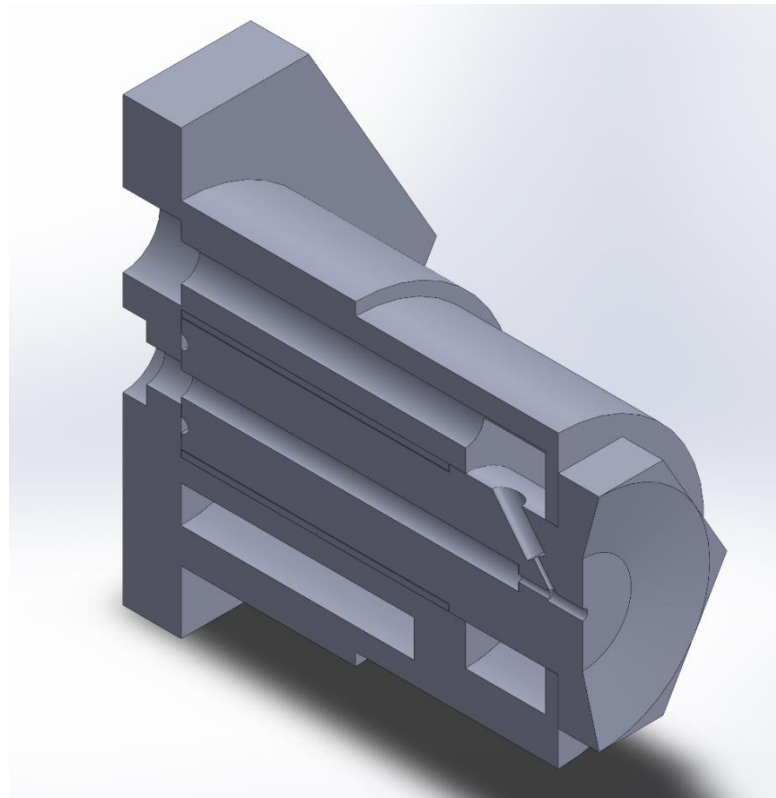
(a)



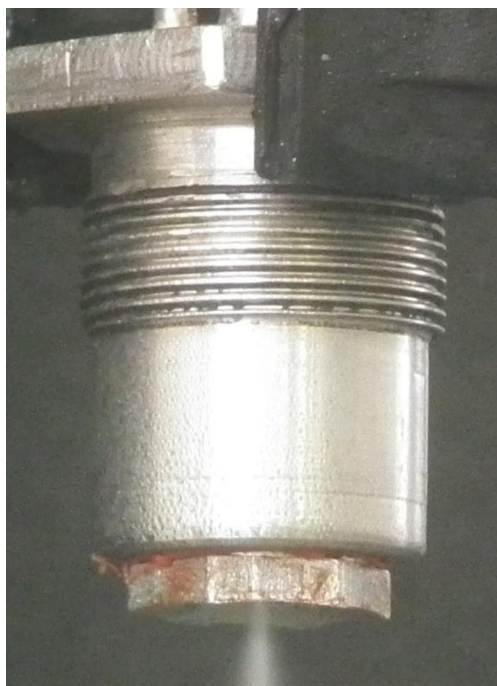
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5. 18 (a) Dimensões do injetor de 35 kW, (b) vista isométrica do bico do injetor, (c) Vista isométrica da carcaça do injetor, (d) vista isométrica do montagem das duas peças (bico e carcaça) (e) injetor de 35 kW feito em aço .

Tabela 5. 12 Valores adotados no dimensionamento do injetor Y

Parâmetro	Recomendado	Adotado	35 kW	Adotado	7 kW
1. Diâmetro da linha de gás de atomização, d_g (mm)	d_g	d_g	0,5	d_g	0,2
2. Diâmetro do conduto de alimentação de combustível, d_l (mm)	$d_g=d_l$	$d_g=d_l$	0,5	$d_g=d_l$	0,2
3. Diâmetro da câmara de mistura, d_M (mm)	$d_M=(1,4 - 1,8)d_g$	$d_M=(1,8)d_g$	0,9	$d_M=(1,6)d_g$	0,35
4. Comprimento de pré-mistura, L (mm)	$L=(1 - 2)d_g$	$L=(1,63)d_g$	0,8	$L=(1,5)d_g$	0,3
5. Comprimento de mistura, L_M (mm)	$L_M=(4 - 5)d_g$	$L_M=(4,5)d_g$	2,2	$L_M=(4,5)d_g$	1,0
6. Comprimento total da câmara de mistura, L_T (mm)	$L_T=L+L_M$	$L_T=L+L_M$	3,0	$L_T=L+L_M$	1,3
7. Comprimento do conduto de alimentação do gás de atomização, L_g (mm)	$L_g > 2d_g$	$L_g = 2,55d_g$	2,5	$L_g > 5,7d_g$	2,5
8. Comprimento do conduto de alimentação de combustível, L_l (mm)	$L_L > 2d_g$	$L_g = 2,55d_g$	2,5	$L_g > 5,7d_g$	2,5
9. Ângulo do canal de alimentação de cana de combustível, θ (°)	θ	θ	52	θ	52

Os planos destes injetores, mostram-se no [Apêndice A.2](#) e [Apêndice A.3](#).

5.4 Dimensionamento do atomizador tipo efervescente para OPPU.

5.4.1 Parâmetros do injetor

O princípio de funcionamento do injetor efervescente é o regime borbulhante (*bubble or froth*), regime que está em função as taxas de fluxo, propriedades do líquido e dimensões da tubulação. O padrão para escoamentos horizontais bifásicos, pode-se prever com o uso do diagrama de Baker, mostrado na Figura 4. 11. Este diagrama está em função dos seguintes parâmetros:

Vazão de ar (gás):

$$\dot{m}_G = GLR \dot{m}_L \quad (5.32)$$

Razões específicas dos fluidos respeito ao um fluido padrão:

$$\rho'_G = \frac{\rho_G}{\rho_{ar}} \quad (5.33)$$

$$\rho'_L = \frac{\rho_{OPPU}}{\rho_{H_2O}} \quad (5.34)$$

$$\mu'_L = \frac{\mu_{OPPU}}{\mu_{H_2O}} \quad (5.35)$$

$$\sigma'_L = \frac{\sigma_{OPPU}}{\sigma_{H_2O}} \quad (5.36)$$

Fatores adimensionais:

$$\lambda = (\rho'_G \rho'_L)^{0,5} \quad (5.37)$$

$$\psi = (\sigma'_L)^{-1} (\mu'_L)^{1/3} (\rho'_L)^{-2/3} \quad (5.38)$$

Vazões volumétricas do gás e do combustível:

$$Q_G = \frac{\dot{m}_G}{\rho_G} \quad (5.39)$$

$$Q_l = \frac{\dot{m}_l}{\rho_{OPPU}} \quad (5.40)$$

O fluxo de gás em kg/(cm².h):

$$G = \frac{\dot{m}_G}{A} = \frac{4 \times \dot{m}_G}{\pi \times \phi^2} \quad (5.41)$$

Sendo, $\dot{m}$ a vazão mássica, GLR a razão de vazões mássicas do gás de atomização e do líquido, ρ a massa específica, μ a viscosidade dinâmica, A a área e ϕ o diâmetro da tubulação.

Assim podem ser calculados os parâmetros do diagrama de Baker com as seguintes equações (5.42) e (5.43):

$$G/\lambda = \frac{4}{\pi} \sqrt{\frac{\rho_{ar}\rho_{H_2O}}{\rho_G\rho_{OPPU}}} \times \frac{GLR \times \dot{m}_L}{\phi^2} \quad (5.42)$$

$$\lambda\psi\left(\frac{Q_L}{Q_G}\right) = \frac{(\rho_G)^{3/2}}{(\rho_{ar})^{1/2}} \frac{(\rho_{H_2O})^{1/6}}{(\rho_{OPPU})^{7/6}} \frac{\sigma_{H_2O}}{\sigma_{OPPU}} \left(\frac{\mu_{OPPU}}{\mu_{H_2O}}\right)^{1/3} \times \frac{1}{GLR} \quad (5.43)$$

Com $\dot{m}_L$ em kg/h, e ϕ em centímetros.

Nas equações (5.42) e (5.43), o primeiro termo das expressões, dependem das propriedades dos fluidos, podendo-se dizer que para os fluidos já determinados, os valores destes termos serão constantes (equações (5.44) e (5.45)).

$$\frac{4}{\pi} \times \sqrt{\frac{\rho_{ar}\rho_{H_2O}}{\rho_g\rho_{OPPU}}} = cte \quad (5.44)$$

$$\frac{(\rho_G)^{3/2}}{(\rho_{ar})^{1/2}} \frac{(\rho_{H_2O})^{1/6}}{(\rho_{OPPU})^{7/6}} \frac{\sigma_{H_2O}}{\sigma_{OPPU}} \left(\frac{\mu_{OPPU}}{\mu_{H_2O}}\right)^{1/3} = cte \quad (5.45)$$

5.4.2 Cálculo dos parâmetros do injetor.

Para o cálculo dos parâmetros correspondentes ao regime de escoamento do injetor efervescente, é preciso usar as propriedades do OPPU e dos fluidos de referência (água e ar) a 20 °C e pressão atmosférica (GREEN e PERRY, 2008), estes valores estão mostrados na Tabela 5. 13.

Tabela 5. 13 Valores das propriedades utilizados no calculo.

Ar		
Massa especifica do ar em condição padrão	1,2	kg/m ³
Água		
Massa especifica da água	1000	kg/m ³
Viscosidade da água	0,001	Pa.s
Tensão superficial da água	0,073	N/m
OPPU		
Massa Especifica	920,7	kg/m ³
Viscosidade	0,0047	Pa.s
Tensão Superficial	0,028	N/m

A configuração selecionada, é a correspondente ao tipo B, mostrada na secção 4.3.5, devido à vazão mássica baixa do combustível (SOVANI, SOJKA e LEFEBVRE, 2001). Para isto, o diâmetro da câmara deve ser maior do duto interno de aeração. Sendo está uma restrição do diâmetro mínimo da câmara de mistura.

Utilizando as equações (5. 42) e (5. 43) e os dados da Tabela 5. 13:

$$G/\lambda = 1,24 \times \frac{GLR \times \dot{m}_L}{\phi^2} \quad (5. 46)$$

$$\lambda \psi \left(\frac{Q_L}{Q_G} \right) = 0,0051 \times \frac{1}{GLR} \quad (5. 47)$$

Para o cálculo das dimensões e configuração (*outside-inside*, *inside-outside*) do injetor foi preciso calcular a potência do injetor, esse parâmetro tem uma forte dependência do diâmetro da câmara de mistura, como é mostrada na equação (5.42), e como o injetor precisa trabalhar em uma faixa de trabalho com relações GLR variáveis, é preciso fazer um dimensionamento da câmara de mistura ar/líquido que permita ter uma margem de funcionamento, para isso a potência foi determinada a partir do limite máximo do rotâmetro de

medição de combustível, o qual é 0,5 l/min (7,6725 g/s), o qual representa uma potência máxima de 306 kW.

É importante ressaltar que a equação (5. 47), só dependerá da relação GLR, e das propriedades do combustível, motivo pelo que, neste caso, será praticamente fixa para uma determinada relação ar/líquido. Dos parâmetros que definem os valores do diagrama de Baker, o parâmetro mais difícil de modificar uma vez usinado o injetor, é o diâmetro da câmara de mistura, e o mais fácil a relação GLR, é por isso que o injetor foi projetado para ter uma margem de variação em relação à GLR, e mantendo o valor do diâmetro da câmara fixa.

Foram tabulados valores para duas vazões de 6 e 7 g/s e conferidos no diagrama de Baker, para mostrar se operam na faixa do regime borbulhante, devido as pequenas vazões do fluido necessárias para estas potências. Foi selecionado a configuração *outside-inside*, onde o ar entra pela câmara externa e logo é injetado mediante orifícios ao líquido que fica na câmara central do injetor. (Injetor de tipo A da Figura 4. 12)

Como exemplo, o cálculo tomando valores da Tabela 5. 13, os resultados são mostrados na Tabela 5. 14 e Tabela 5. 15 , para mostrar a determinação do tipo de regime que apresenta o fluido em aquelas condições.

Desta maneira tem-se os seguintes resultados.

$$G/\lambda = 14,33 \text{ kg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h}) \quad (5. 48)$$

$$\lambda \psi \left(\frac{Q_L}{Q_G} \right) = 0,29 \quad (5. 49)$$

Tabela 5. 14 Valores calculados para um consumo de 6 g/s de combustível

GLR	0,001	0,005	0,01	0,015	0,02	0,05	0,1
m_l [g/s]	6	6	6	6	6	6	6
Diâmetro [cm]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
G/λ	0,72	3,58	7,16	10,73	14,33	35,83	71,65
$\lambda \psi Q_L/Q_g$	5,77	1,15	0,58	0,38	0,29	0,11	0,058
Regime borbulhante	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗

Tabela 5. 15 Valores calculados para um gasto de 7 g/s de combustível

GLR	0,001	0,005	0,01	0,015	0,02	0,05	0,1
$\dot{m}_l$ [g/s]	7	7	7	7	7	7	7
Diâmetro [cm]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
G/λ	0,84	4,18	8,36	12,54	16,72	41,80	83,60
$\lambda\psi Q_L/Q_g$	5,77	1,15	0,58	0,38	0,29	0,11	0,06
Regime borbulhante	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗

Tabela 5. 16 Valores adotados para o dimensionamento o injetor

Dados iniciais		
GLR	0,02	
$\dot{m}_L$	6	g/s
Diâmetro da câmara	0,2	cm
$\dot{m}_G$	0,012	g/s

Colocando estes dois valores (resultados das equações 5,48 e 5,49) na Figura 5. 19, pode-se visualizar que a região que se obtém é a região borbulhante. Sendo nesta parte importante observar que todo o procedimento realizado é para um injetor em posição horizontal.

Para o dimensionamento interno do injetor, toma-se os parâmetros da Figura 5. 20, e para o dimensionamento destes parâmetros Quispe (2013), apresenta os parâmetros de desenho mostrados na Tabela 5. 17:

Sendo A_0 a área transversal do orifício de saída do injetor, com diâmetro d_0 e A_g a área total da somatória de todas as áreas dos orifícios de aeração.

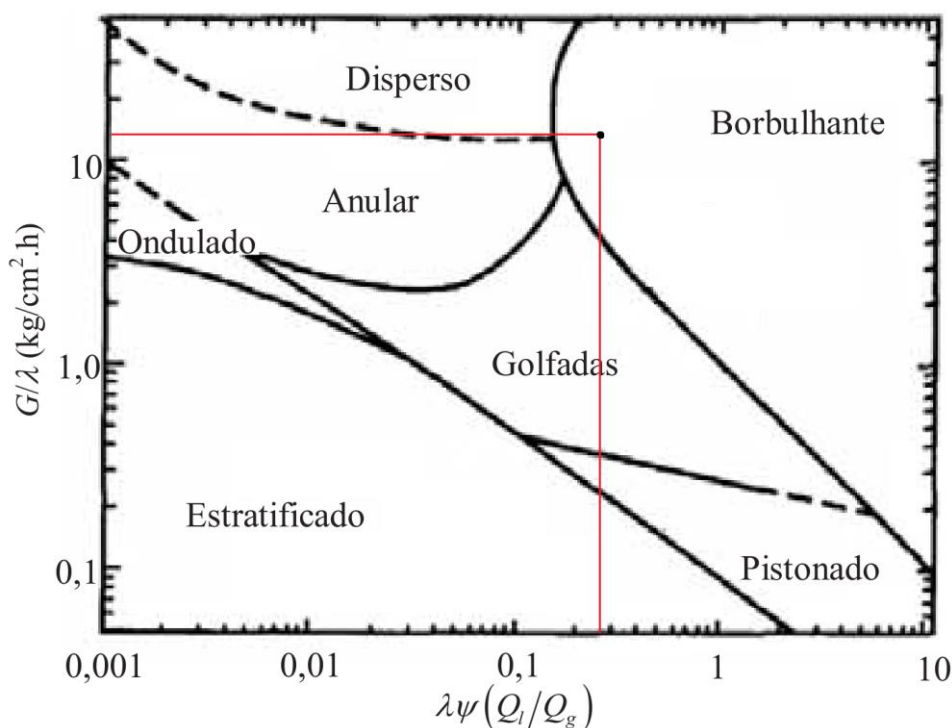


Figura 5. 19 Ponto de funcionamento do injetor, adaptado de, (CHIN e LEFEBVRE, 1993)

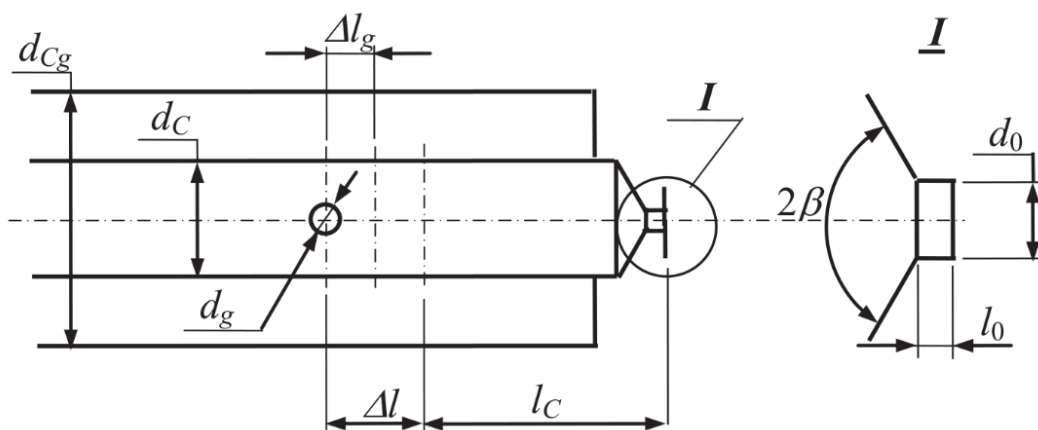


Figura 5. 20 Esquema da geometria interna do injetor efervescente, (QUISPE, 2013)

A relação A_o/A_g segundo Chin e Lefebvre (1995) é para valores de GLR menores a 0,05, é por isso que, foi escolhido o valor inferior, para obter um orifício pequeno na saída do injetor com duas filas de 4 furos em cada fila, com um orifício de saída $d_0 = 0,5$ mm.

$$\frac{A_0}{A_g} = 0,13 \quad (5.50)$$

$$A_g = \frac{\pi \times d_0^2}{4 \times 0,13} = \frac{\pi \times 0,5^2}{4 \times 0,13} = 1,51 \quad (5.51)$$

Com m o número de filas e n o número de furos por cada fila,

$$m \times n \frac{\pi \times d_g^2}{4} \rightarrow d_g = \sqrt{\frac{4 \times 1,51}{2 \times 4 \times \pi}} \approx 0,5 \text{ mm} \quad (5.52)$$

Tabela 5. 17 Valores recomendados segundo Quispe (2013)

Parâmetros	Faixa
Diâmetro do orifício de saída do (mm)	0,5 - 2,5
A_o/A_g segundo Chin e Lefebvre (1995)	0,13 - 0,28
A_o/A_g segundo Jedelsky et al. (2009)	0,08 - 0,125
l_c/d_c segundo Quispe (2013)	3,5 - 5,0
2β	$90^\circ - 120^\circ$

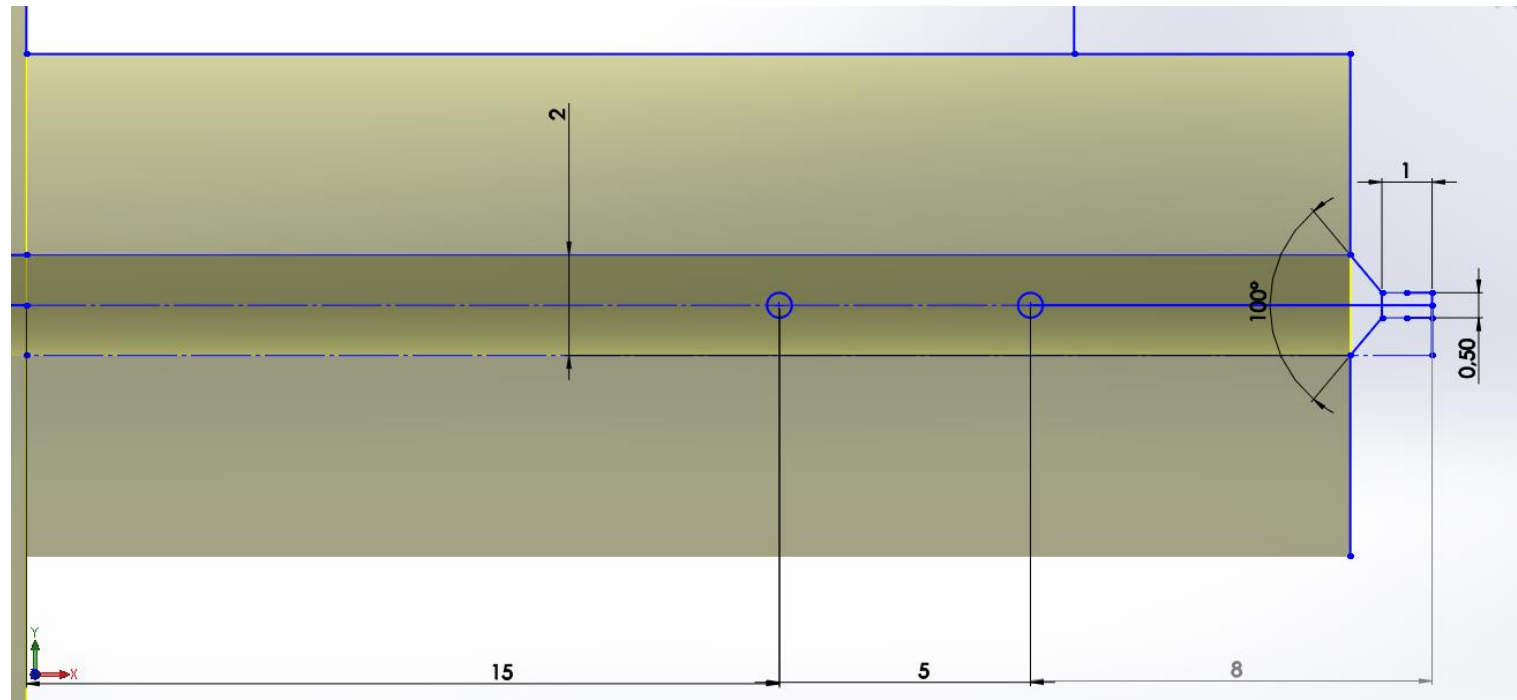
A relação l_0/d_0 , é tomado como 2 devido as dimensões do orifício de saída, sendo difícil a perfuração de longitudes menores a 1 mm de comprimento.

A relação l_c/d_c , é escolhida na faixa recomendada e fixada no valor de 4, obtendo-se um comprimento de 8 mm de câmara de mistura a montante da última fila de furos, como é mostrado na Figura 5. 20.

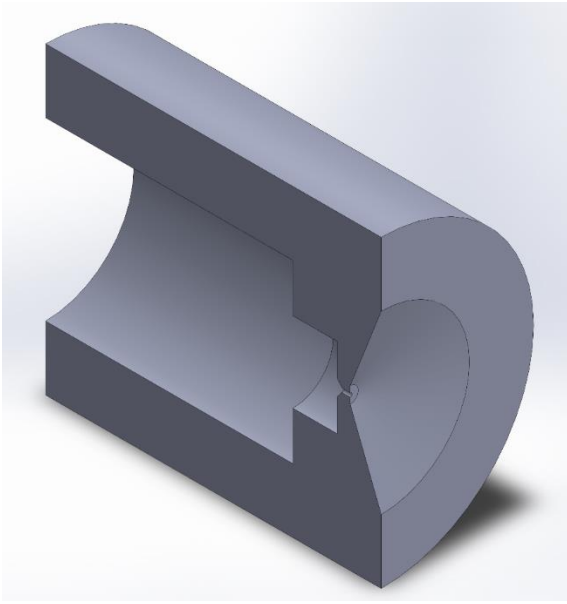
Baseado nestes valores e considerações, os parâmetros geométricos calculados, são apresentados na Tabela 5. 18 e Figura 5. 21.

Tabela 5. 18 Valores adotados, segundo as recomendações de Quispe (2013)

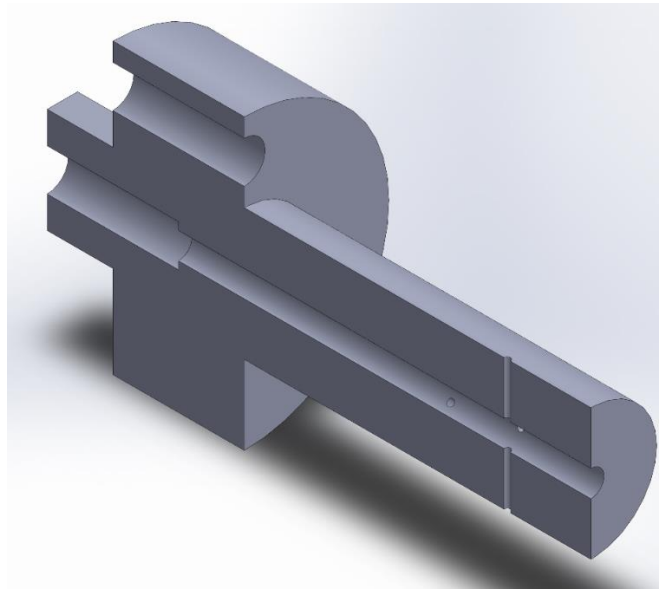
Parâmetros	Adotado
Diâmetro do orifício de saída do (mm)	0,5
A_o/A_g , segundo Jedelsky et al. (2009)	0,13
A_g (mm ²)	1,51
Número orifícios/arranjo - n	4
Número de filas - m	2
Diâmetro dos orifícios de aeração (mm)	0,5
Ângulo 2β	100
l_0/d_0	2
l_0 (mm)	1
l_c/d_c	4
d_c (mm)	2
l_c	8



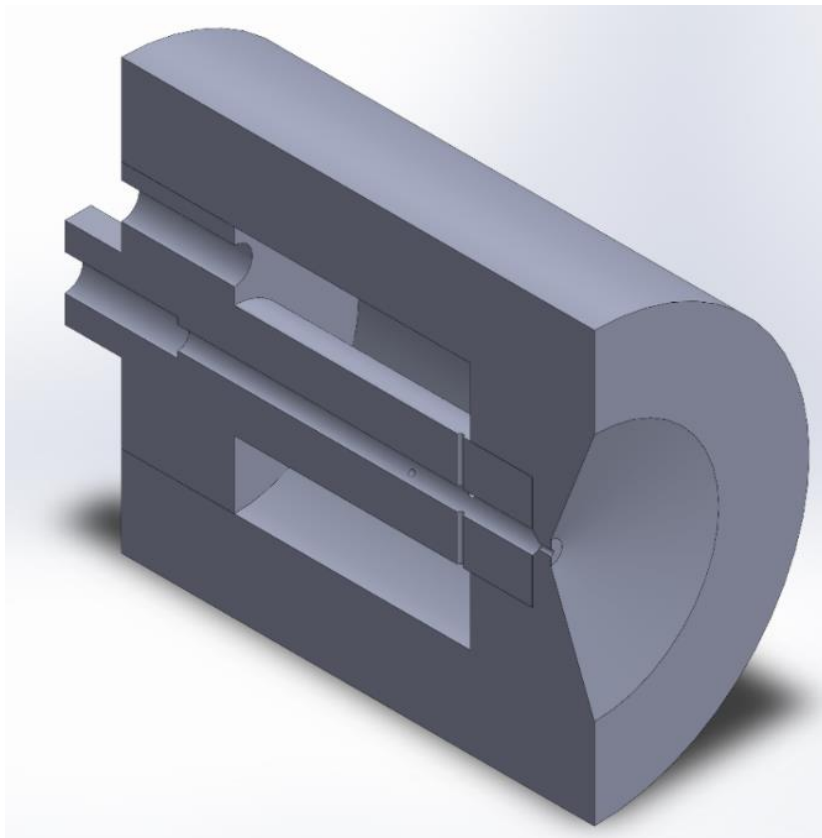
(a)



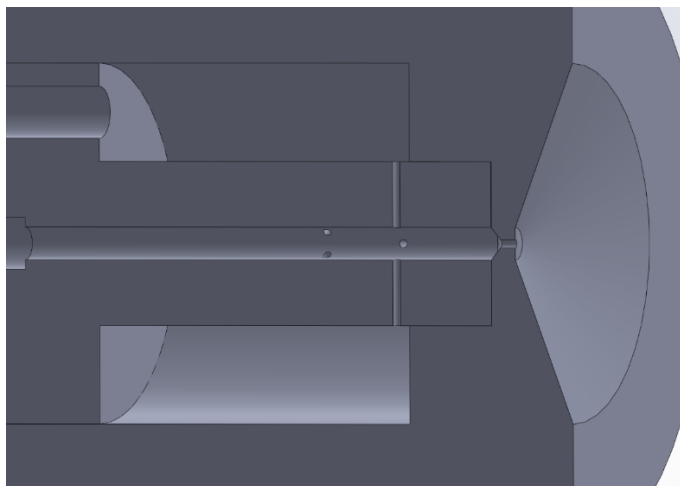
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5. 21 (a) Dimensões do injetor efervescente, (b) detalhe da carcaça do injetor, (c) detalhe bico do injetor, (d) detalhe da montagem da carcaça e bico do injetor ,(e) Detalhe da camara de mistura com as duas fileiras de furos de aeração, (f) injetor efervescente, feito em acrilico (PMMA).

Capítulo 6

CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL PARA TESTES DE ATOMIZAÇÃO

6.1 Introdução.

A bancada experimental móvel, para o teste dos injetores, foi construída mediante o auxílio financeiro do CNPq, nas instalações do Instituto Nacional de Pesquisa Espacial, restando só a integração analógica dos dados, para um período posterior. No presente capítulo, apresenta o detalhe do processo de construção e operação da bancada.

6.2 Construção da bancada experimental.

A bancada experimental junto com os dois tipos de injetores dimensionados anteriormente foram montados e construídos, respectivamente com auxílio financeiro do projeto CNPq proc. N° 442050/2014-3 coordenado pelo orientador da presente dissertação. (CORONADO R., 2016)

A montagem da bancada, mostrada na Figura 6. 1, apresenta os principais componentes sinalizados mediante números, esta é mostrada na fotografia da Figura 6. 2. A bancada ainda não possui o sistema de exaustão de pluma (inversor e compressor) que serve para retirar o combustível pulverizado evitando a contaminação do ambiente durante os testes.

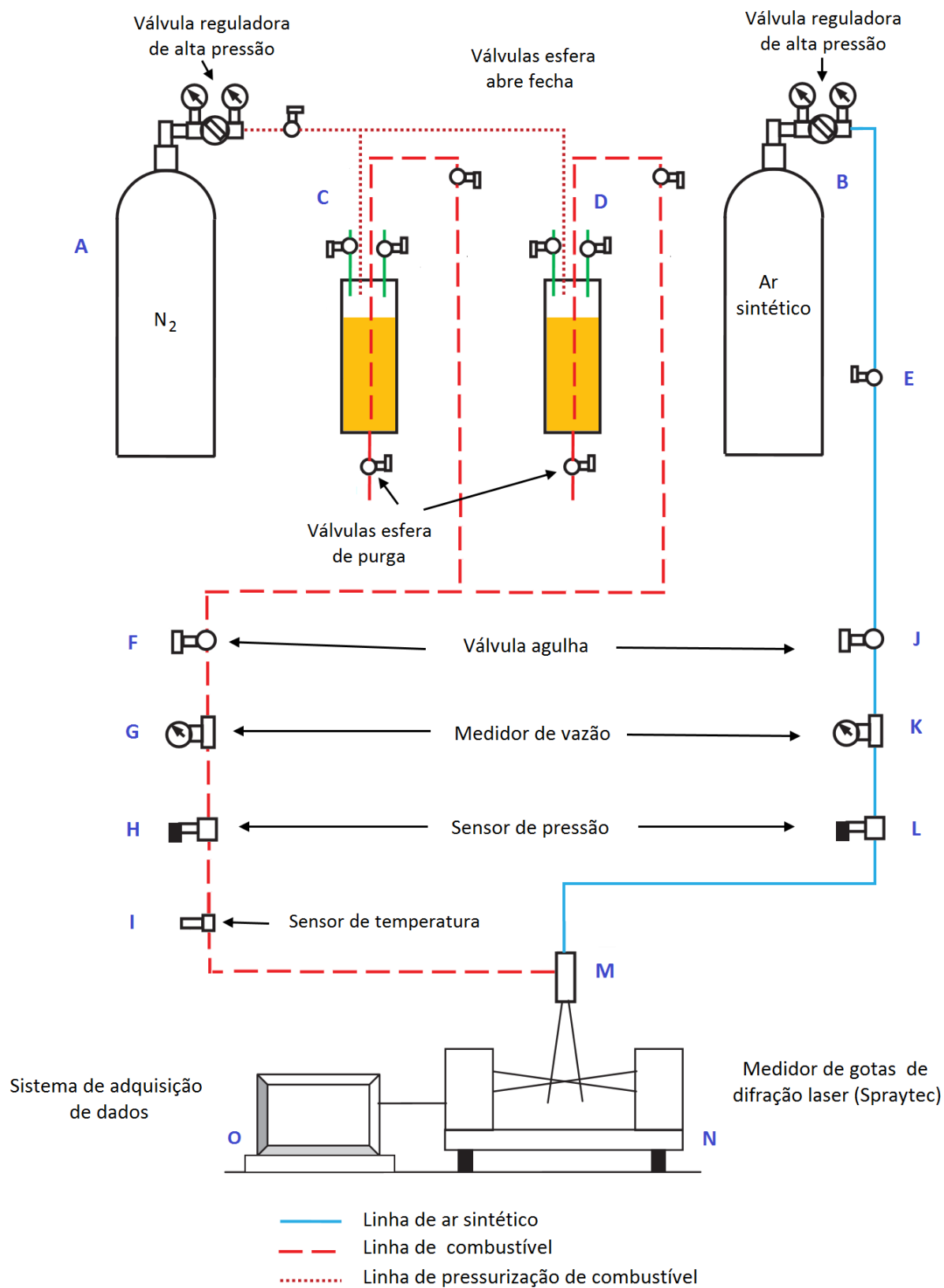


Figura 6. 1 Esquema da bancada experimental para testes de injetores.



Figura 6. 2 Bancada experimental construída.

Esta bancada tem a facilidade de permitir trabalhar com dos líquidos combustíveis, já que possui dois depósitos permitindo a utilização de um dos depósitos enquanto é feita a limpeza do outro depósito, porque são dois depósitos independentes, não recomendando-se o uso dos dois ao mesmo tempo, devido à complexidade do controle nesta situação. Nesta bancada foram utilizados os seguintes componentes:

- a. **02 cilindros de gases**, estes dois cilindros contém os dois gases pressurizados utilizados para os testes nesta bancada, e são um dos principais componentes desta. O primeiro, o Nitrogênio, gás inerte, que fornece a pressurização ao combustível líquido e o segundo cilindro, que fornece o ar para a combustão, os dois são mostrados na Figura 6. 3.



Figura 6. 3 Cilindros de Nitrogênio (esquerda) e ar puro (direita).

- b. 02 válvulas de posto de aço inoxidável VALMIG PCGE**, são as válvulas utilizadas para regular a pressão dos cilindros **A** e **B** da Figura 6. 1, e com isso fixar a pressão no líquido combustível junto com a pressão do ar de atomização. As válvulas são mostradas na Figura 6. 4.



Figura 6. 4 Válvulas de posto na bancada.

- c. 01 Rack de piso Hi top 19"- 44U-600mm**, que é a estrutura que dá suporte a todos os equipamentos que serão colocados na bancada, ele consta de dois painéis laterais e duas

portas de vidro ambas removíveis, para uma fácil operação e montagem da bancada. Vide Figura 6.2.

- d. **02 Depósitos de combustível cilíndricos com visor indicador de nível**, que foram construídos especialmente de uma peça só para ter maior resistência à pressão, eles são de aço inoxidável e a configuração é mostrada na Figura 6. 5, e na Figura 6. 1 estão representados mediante as letras **C** e **D**, respectivamente. Os depósitos têm uma linha de subministro de combustível que precisa de uma quantidade mínima de combustível dentro do depósito devido a sua geometria. A geometria dos depósitos permite a decantação de partículas no fundo do depósito, onde encontra-se a válvula de purga.

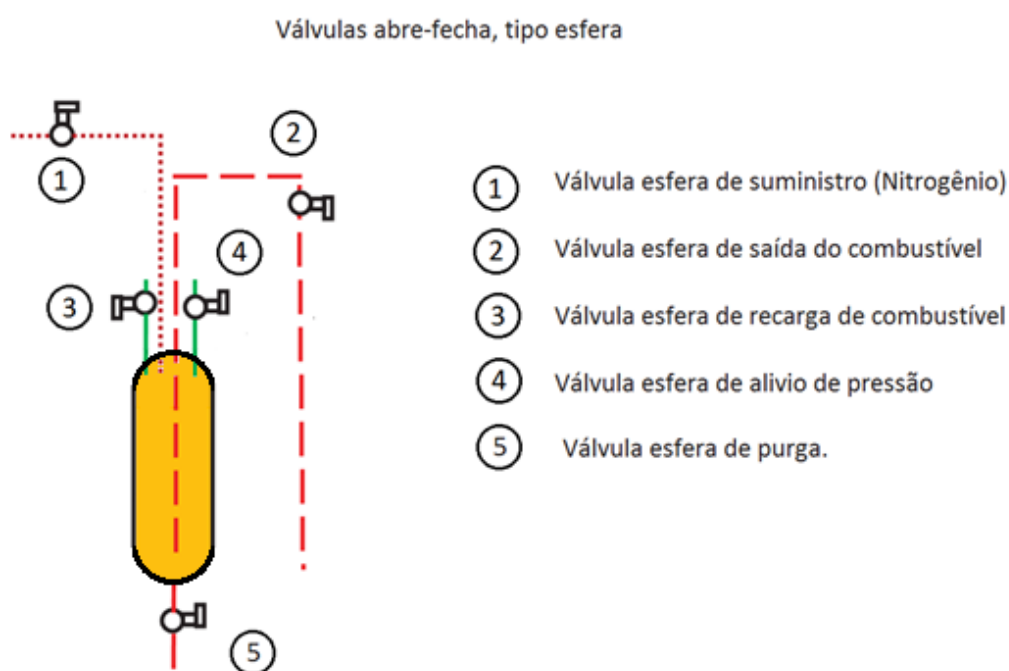


Figura 6. 5 Esquema dos depósitos de combustível.

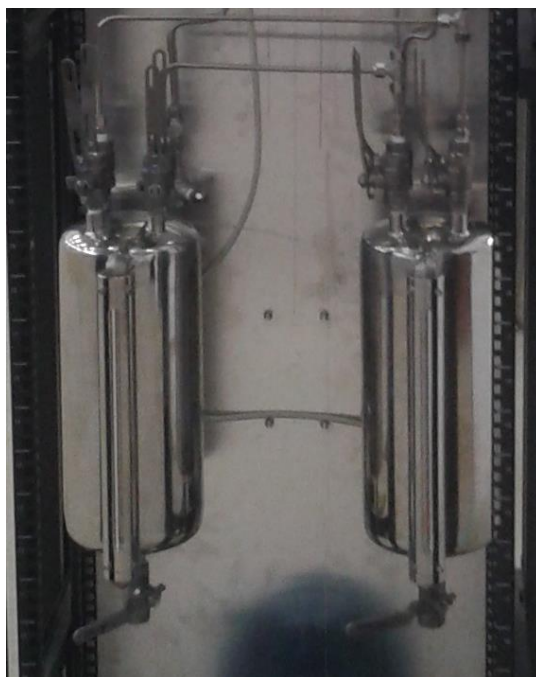


Figura 6. 6 Tanques de combustível na bancada.

- e. **05 Válvulas abre-fecha, para cada cilindro de combustível**, estas válvulas são usadas para o controle dos depósitos de combustíveis. Onde a linha 1 da Figura 6. 5, fornece a pressão a todo o sistema mediante o Nitrogênio comprimido.

A válvula 2 contém um pescador que vai até o fundo do tanque, que permite levar o líquido combustível até o injetor.

A válvula 3, é utilizada para recargar o combustível.

A válvula 4 é uma válvula de alívio, que permite a descompressão dos depósitos para as diferentes manobras a realizar.

- f. **01 Compressor centrífugo**, o compressor centrífugo é a encarregado de tirar a pluma gerada pelo injetor, e evitar assim a formação de uma nuvem contaminante de combustível dentro do laboratório.



Figura 6. 7 Compressor de limpeza de pluma.

- g. **Válvulas agulha de regulação de vazão**, estas válvulas estão sinalizadas com as letras **F** e **J**, onde a válvula **F** está inclusa no medidor de vazão de líquido, estes medidores tem a função de regular a vazão dos fluidos e com isto manter uma *GLR* constante.
- h. **01 Rotâmetro de 200 ml/min com válvula reguladora de tipo agulha**, é o medidor da vazão do líquido combustível, tem uma válvula tipo agulha, que permite regular a quantidade da vazão. Neste estudo se trabalhou também com um rotâmetro de 500 ml/min, tendo que ser calibrado cada um destes rotômetros para cada líquido de trabalho. Na Figura 6. 1 está representada pela letra **G** e **F** como foi mencionado no texto anterior.
- i. **01 Medidor de vazão de ar GFM AALBORG**. Sinalizado com a letra **K**, tem como função medir a quantidade de ar na linha, vazão que foi regulada antes, na válvula agulha o sensor é mostrado na Figura 6. 8.



Figura 6. 8 Medidor de vazão AALBORG.

- j. **04 indicadores universais N1540.** São os transdutores que permitem visualizar as medidas dos sensores de temperatura e pressão. Estes sensores (Figura 6. 9) permitem a coleta de dados no computador, e comunicação com outros tipos de interfaces.



Figura 6. 9 Compressor de limpeza de pluma.

- k. **02 Sensores de pressão relativa Huba Control tipo 520.** Eles estão na linha de ar e líquido e medem a pressão naquelas linhas, que depois são mostrados nos indicadores universais, este sensor é mostrado na Figura 6. 10 e no diagrama da Figura 6. 1 são sinalizados com as letras **H** e **L**.
- l. **01 Termopar tipo K,** mede a temperatura do líquido combustível na entrada do injetor, e é mostrado na Figura 6. 1 com a letra **I**.
- m. **01 Inversor CFW08 220V 0026S2024PSZ 0,5 CV STD,** é o aparelho eletrônico que permite o controle do compressor centrifugo.
- n. **Tubulações de aço inoxidável de 1/8",** são utilizadas na construção das linhas na bancada, elas são mostradas na Figura 6. 11.
- o. **Conexões, curvas e T de aço inoxidável,** junto com as tubulações são usadas em todas as conexões entre os componentes da bancada, detalhe que também é mostrado na Figura 6. 11.
- p. **01 Válvula abre-fecha,** está válvula regula o ar que sai do cilindro **B** e que fecha toda a linha de ar, junto com a válvula de posto, é nomeada com a letra **E** na Figura 6. 1.



Figura 6. 10 Sensor de pressão.

No processo de construção a primeira parte foi o processo de colocação do sistema de linhas de combustível e gás, isso foi feito escolhendo a posição dos equipamentos no rack, assim como a posição dos indicadores e sensores. Por esta razão a disposição dos equipamentos foi decidida para uma fácil manipulação dentro do espaço disponível, cuidando a não interferência de um com outro, e espaço para possíveis alterações a futuro (sistema de ar auxiliar, sistema de aquecimento de combustível, etc.)

Em primeiro lugar se procedeu a colocar os indicadores digitais na parte superior do rack, para uma melhor visualização das medidas, a continuação, foram colocadas as válvulas de posto que regulam a pressão dos cilindros e ligadas respetivamente ao depósito de combustível e à linha de ar. Para isto foi preciso colocar na posição final os dois depósitos de combustível, com suas respectivas válvulas de manobra (detalhe mostrado na Figura 6. 5). Foi concluída a linha de ar com a colocação de uma válvula esfera abre-fecha, o sensor de vazão, a válvula agulha, sensor de pressão, e depois um conector que permite colocar o injetor ao final da linha.

A linha de combustível também foi finalizada com a colocação do rotâmetro com válvula agulha inclusa, um sensor de pressão e um sensor de temperatura (vide Figura 6. 12 e Figura 6. 13)



Figura 6. 11 conexões das tubulações com os depósitos e os sensores.



Figura 6. 12 Bancada vista posterior, com as linhas de combustível, e ar finalizadas, além do compressor e os indicadores.

Em segundo lugar, foi colocado o sistema elétrico que inclui subministro de energia ao inversor de corrente, compressor e aos sensores e indicadores, mediante uma fonte pequena de 24V.



Figura 6. 13 Bancada, vista frontal, com as válvulas de posto, rotâmetro, medidor de vazão de ar, válvulas agulha, válvulas esfera abre-fecha inversor de corrente e os indicadores.

6.3 Operação da bancada.

6.3.1 Preparação inicial da bancada.

A bancada é ligada à fonte de energia de 220V, depois os cilindros com os combustíveis a serem testados são encheidos mediante o uso da válvula 3 (o combustível é jogado no cilindro com um funil), a válvula 4 é aberta e as válvulas 1 e 2 podem estar abertas ou fechadas, enquanto a válvula 5 tem que estar fechada (purga) (Vide Figura 6. 5), depois de ter o combustível cheio, todas as válvulas são fechadas.

6.3.2 Teste dos injetores.

Para o início dos testes experimentais, o procedimento é: são abertas as válvulas dos cilindros que contém os gases pressurizados e regulados com as válvulas de posto, a continuação é aberta a válvula 1 (todas as demais válvulas estão fechadas), para subministrar a pressão ao líquido no depósito.

Para o caso do injetor Y, depois que o depósito (C ou D) tem a pressão desejada, é possível abrir a válvula 2 (Figura 6. 5) e logo regular a quantidade de gás combustível fornecido mediante o uso da válvula de agulha E (Figura 6. 1), assim é conseguido que o injetor esteja com todas suas cavidades cheias de líquido.

Depois de ter o líquido no sistema a quantidade de ar é subministrada abrindo a válvula E e regulando-a com a válvula de agulha J, sendo preciso antes abrir a válvula de posto do cilindro do gás. Depois a quantidade de ar é subministrada ao injetor na medida adequada, segundo as condições do teste.

Para o caso do injetor efervescente, o processo é o mesmo, a diferença que antes deve ser fornecido o ar e depois o líquido, isto devido as configurações de cada um deles.

6.3.3 Limpeza ao final dos testes.

Depois de finalizados os testes a limpeza do sistema é necessária e realizada mediante o subministro de ar as duas linhas, mas tendo em consideração que as linhas ainda possuem uma quantidade de pressão dentro delas.

Assim se recomenda o seguinte processo: o injetor deve ser retirado da linha, isto é possível devido à conexão que permite retirar o injetor e manter a pressão da linha sem inconveniente, a continuação tem-se que liberar a pressão das linhas. Com a linha de ar não há inconvenientes, basta apenas fechar a válvula de posto e a válvula agulha e depois liberar a pressão no sistema.

Para o caso da linha de combustível, primeiro tem que se liberar a pressão no depósito de combustível, para isto é aberta a válvula 4 com cuidado, devido à pressão da linha, enquanto as válvulas 1, 5 e 2 ficam fechadas, para uma maior velocidade também pode ser usada a válvula 3. Depois disso é aberta a válvula 5 para fazer a purga, agora que o depósito não tem pressão dentro dele.

A limpeza final é realizada colocando algum líquido de limpeza, adequado ao combustível, e logo fazer circular na linha este líquido como se fosse o líquido combustível até esvaziar o depósito (com a válvula 1 de subministro fechada) e logo aliviar a pressão do depósito para depois retirar o líquido que resta com a válvula de purga (válvula 5).

6.4 Laser Spraytec Malvern.

O tamanho médio de gota do spray foi medido num sistema de difração laser Spraytec Malvern 2007, modelo STP5936.

O Spraytec faz a detecção da distribuição de tamanho de gota de uma dada região do spray pela medição de luz espalhada, estes sistemas medem a difração ou espalhamento da luz de um feixe de laser, em geral Hélio-Neônio com comprimento de onda de 633 nm, ao ser atravessado pelas gotas de um spray. A luz espalhada é coletada para cada setor angular particular. Para obtenção da distribuição do tamanho das gotas, o sistema utiliza a teoria de Fraunhofer, o qual mediante este modelo, quando um feixe de luz paralela e monocromática atravessa uma nuvem de gotas, o padrão obtido é o de uma série de discos concêntricos claros e escuros, cujo espaçamento entre eles dependerá da distribuição dos diâmetros das gotas. Esse padrão de difração é proporcionado por uma lente transformadora de Fourier que converge o feixe sobre o sistema de detecção. Esta transformação consiste na conversão do ângulo de espalhamento θ numa distância radial r sobre o detector plano. (LACAVA e MARTINS, 2010)

Devido à variedade dos tamanhos de gota produzidos na atomização, tem-se algumas formas de caracterizar um spray mediante um tamanho de diâmetro de gota representativo. Entre os tamanhos de gotas comuns, temos o diâmetro médio de Sauter (SMD ou D_{32}) que é utilizado nos trabalhos de combustão; outro é o diâmetro médio de massa (MMD) ou diâmetro mediano volumétrico (VMD), também é conhecido como Dv_{50} ou $Dv_{0,5}$ (AZEVEDO, 2013).

As principais partes do medidor de difração laser Spraytec Malvern, são mostradas na Figura 6. 14, sendo a descrição das partes as seguintes:

1. Banca de suporte ótico,
2. Transmissor.
3. Recebedor
4. Lentes (ligado ao recebedor)
5. Interruptor de alimentação

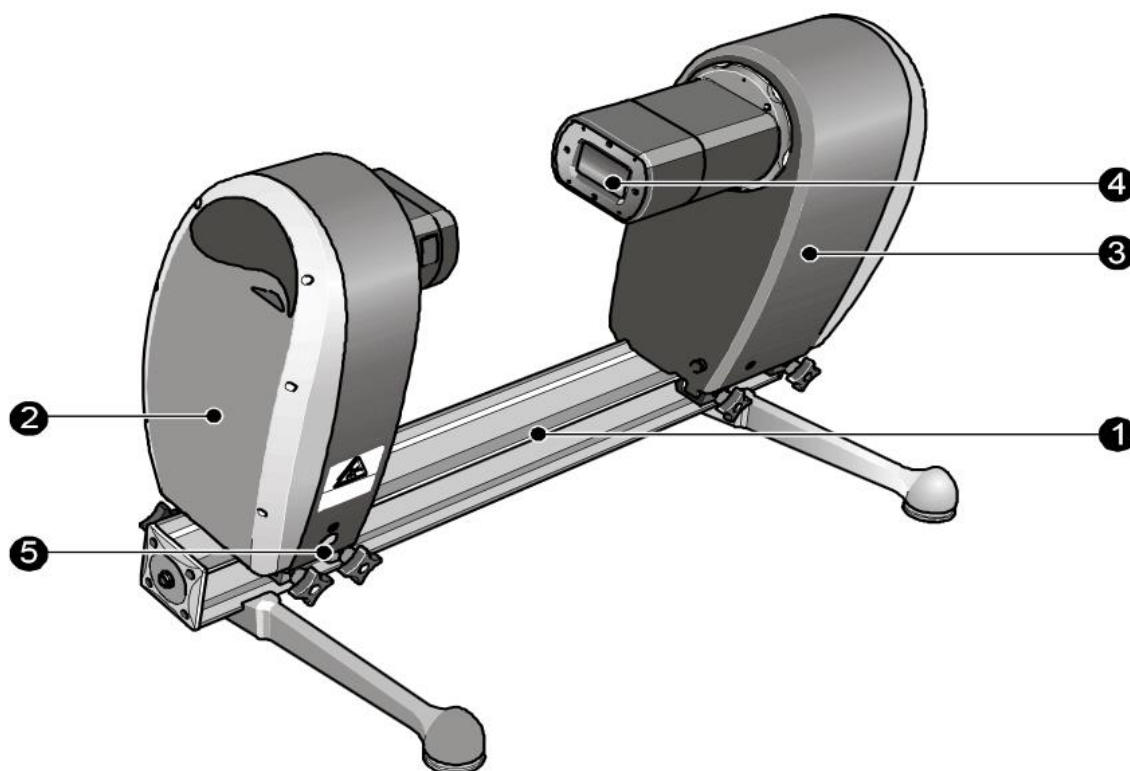


Figura 6. 14 Principais componentes do Spraytec, (MALVERN INSTRUMENTS, 2007).

Os fundamentos do funcionamento do equipamento Spraytec são os seguintes (Figura 6. 15):

1. A luz proveniente do laser (1) é dispersada pelas gotículas pulverizadas (3)
2. A luz é expandida por colimação ótica (2) para fornecer um amplo feixe paralelo.
3. A luz dispersa é concentrada com uma lente de focalização (4) em um arranjo de Fourier e apanhado por um conjunto de detectores (5).
4. A luz não dispersa e concentrada numa lente de focalização (5), de modo que passe através de um furo no centro de um conjunto de detectores. Isto é medido pelo detector de potência do feixe (detector 0) para dar a transmissão de luz.
5. O ângulo em que uma partícula difrata a luz é inversamente proporcional ao seu tamanho. O arranjo de detectores está conformado por arredor de 30 detectores individuais, cada um deles coleta a luz dispersada por uma faixa particular de ângulos. Tem-se um canal de dados para cada um deles, A medição do ângulo de difração determina o tamanho da partícula, como é mostrado na Figura 6. 16

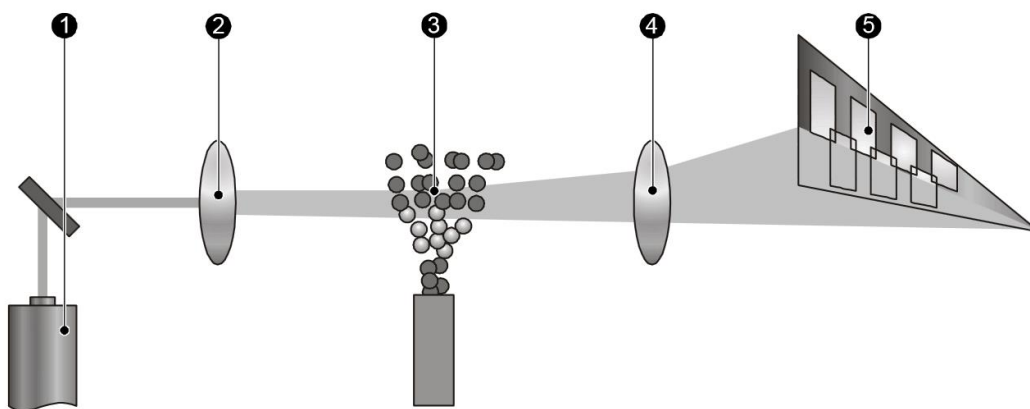


Figura 6. 15 Princípio de operação do sistema Spraytec, (MALVERN INSTRUMENTS, 2007).

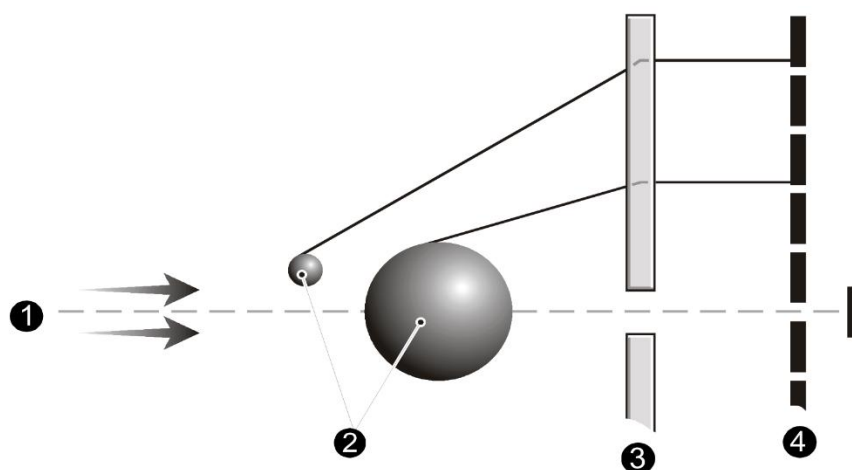


Figura 6. 16 Diagrama de determinação do tamanho de partícula, (MALVERN INSTRUMENTS, 2007).

O diagrama mostrado na Figura 6. 16 mostra a fonte de luz paralela (1), partículas de diferentes tamanhos (2), as lentes de focalização (3) e o conjunto de detectores (4), também tem um detector de extinção.

A difração também é influenciada pelo material e composição das partículas, para ter em conta isto, é preciso fornecer informação das propriedades óticas.

6. O Padrão de dispersão do spray é capturado, este padrão é conhecido como “medição”, a captura é controlada pelo usuário, manualmente ou usando um procedimento padrão de operação, SOP pelo seu acrônimo no inglês. (MALVERN INSTRUMENTS, 2007)

Capítulo 7

ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 Introdução

Para o estudo dos injetores foram projetados 02 tipos, o modelo Y e o modelo efervescente. O injetor efervescente foi testado somente com óleo de soja, devido a que o OPPU reage com o material com que qual foi feito o injetor efervescente (PMMA, polimetilmetacrilato). Neste capítulo são apresentados os resultados dos testes experimentais, no que tange à distribuição do spray e o tamanho de gota para ambos os injetores. Foram comparados os modelos teóricos e experimentais.

7.2 Preparação dos testes.

As potências selecionadas para o injetor Y foram de 7 e 35 kW, a potência de 7 kW foi selecionada para ser utilizada em uma câmara de combustão de pequeno porte, e o injetor de 35 kW foi projetada por ser uma potência média que é possível trabalhar no laboratório, e com dimensões para sua usinagem aceitáveis. Os resultados dos projetos do injetor Y foram já mostrados e apresentados no capítulo 5.

No primeiro momento, o injetor de 7 kW foi descartado devido à dificuldade de sua usinagem e pouca praticidade, isto devido as dimensões dos furos (0,2 mm o menor), os quais facilitam em grande medida seu entupimento. É por isso que foi construído o injetor de 35 kW,

o qual apresentava facilidades de adaptação na sua usinagem e tamanhos padrão das ferramentas, sendo igualmente sua construção difícil e de longa duração. O material selecionado em um primeiro momento foi o acrílico, a eleição do material foi devido a possibilidade de efetuar uma observação visual do fenômeno que acontece na câmara de mistura dos injetores, e a sua usinagem mais rápida respeito do aço inoxidável.

Os injetores Y foram desenhados em duas peças, uma peça geral (carcaça), e uma peça específica (o bico), a primeira é uma peça que contém os dutos que alimentam o líquido e o gás ao injetor, assim como uma câmara de refrigeração, para o caso de um elevado aquecimento do injetor (vide Figura 7. 1). O resfriamento do injetor foi projetado para ser realizado com água, resfriada a 20 °C, a segunda peça é o bico mesmo, onde encontra-se os dutos em ângulo, a câmara de pré-mistura, a câmara de mistura e a saída.

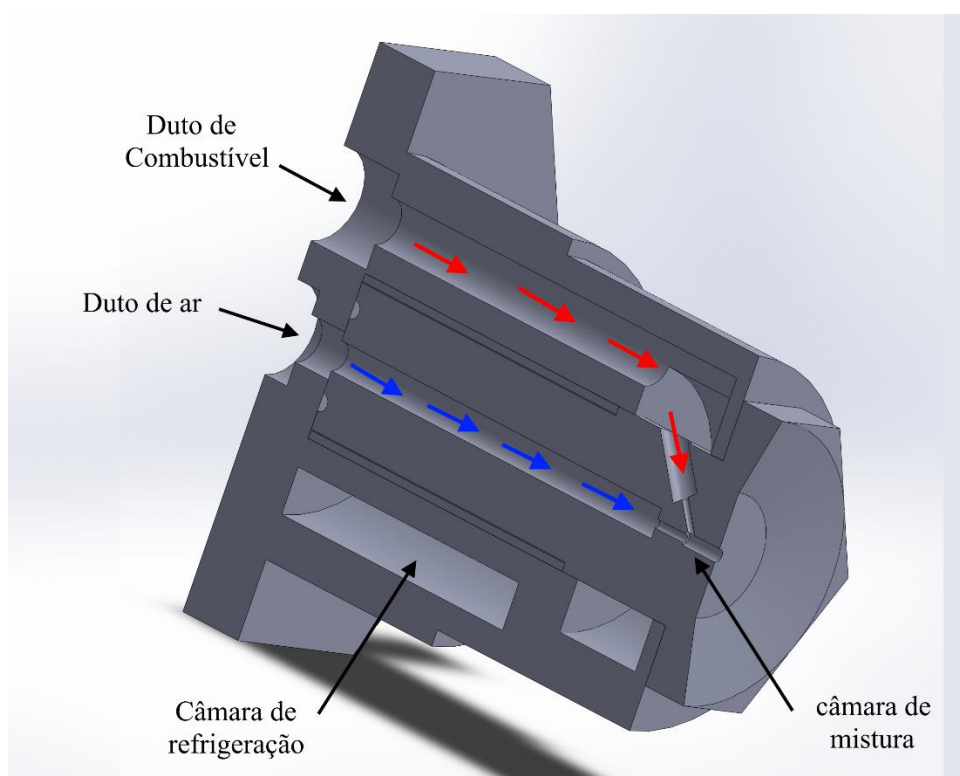


Figura 7. 1 Detalhe do injetor Y com as duas peças.

A decisão de usar o injetor em duas partes, é devido à sua fácil manutenção no caso de entupimento, sua maior facilidade de usinagem e permutabilidade dos bicos. É por esta razão que foi projetada uma carcaça para as duas potências e dois bicos, cada um para sua respectiva potência, sendo a carcaça projetada para suportar os dois bicos e qualquer outro bico que tenha uma potência entre as duas potências projetadas.

Os injetores de tipo efervescente, também foram projetados em duas peças, devido as mesmas vantagens que apresentava na manutenção e construção. No caso do injetor efervescente, não foi projetada com a câmara de resfriamento devido a que só foi construído em PMMA e para testes de tamanho de gota, mas não de queima direta de combustível.

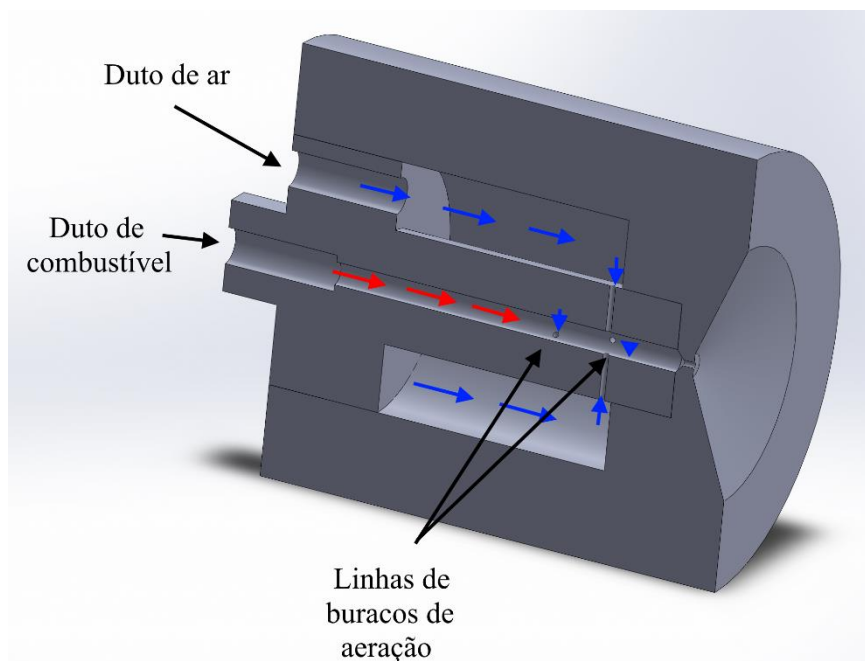


Figura 7. 2 Detalhe do injetor efervescente com as duas peças.

No momento da usinagem do bico em acrílico (polimetil-metacrilato), este mostrou uma alta capacidade de reagir com o OPPU, chegando a se destruir no primeiro teste a primeira versão do injetor Y de 35 kW. O acrílico reage com uma variedade de compostos produzindo efeitos em diferentes quantidades e características, sendo atacado pelos compostos aromáticos e dissolvido por compostos orgânicos (ANTÓNIO, 2007; ULTRA PLAS, 2016).

O OPPU atacou o acrílico, e produz uma quebra geral do injetor (vide Figura 7. 3 (a)), o motivo da quebra é a composição do OPPU, que apresenta na sua composição compostos aromáticos e orgânicos (ISLAM, HANIU e BEG, 2008; WILLIAMS, 2013), produzindo a quebra num tempo aproximado de um minuto e trinta segundos de operação do injetor. Durante a usinagem dos injetores observou-se o efeito dos compostos aromáticos presentes no querosene comercial no PMMA (vide Figura 7. 3 (b)); estes compostos aromáticos também estão presentes também no OPPU. Isso foi o motivo pelo qual foi decidido a usinagem de um injetor feito em aço, para os testes com OPPU.

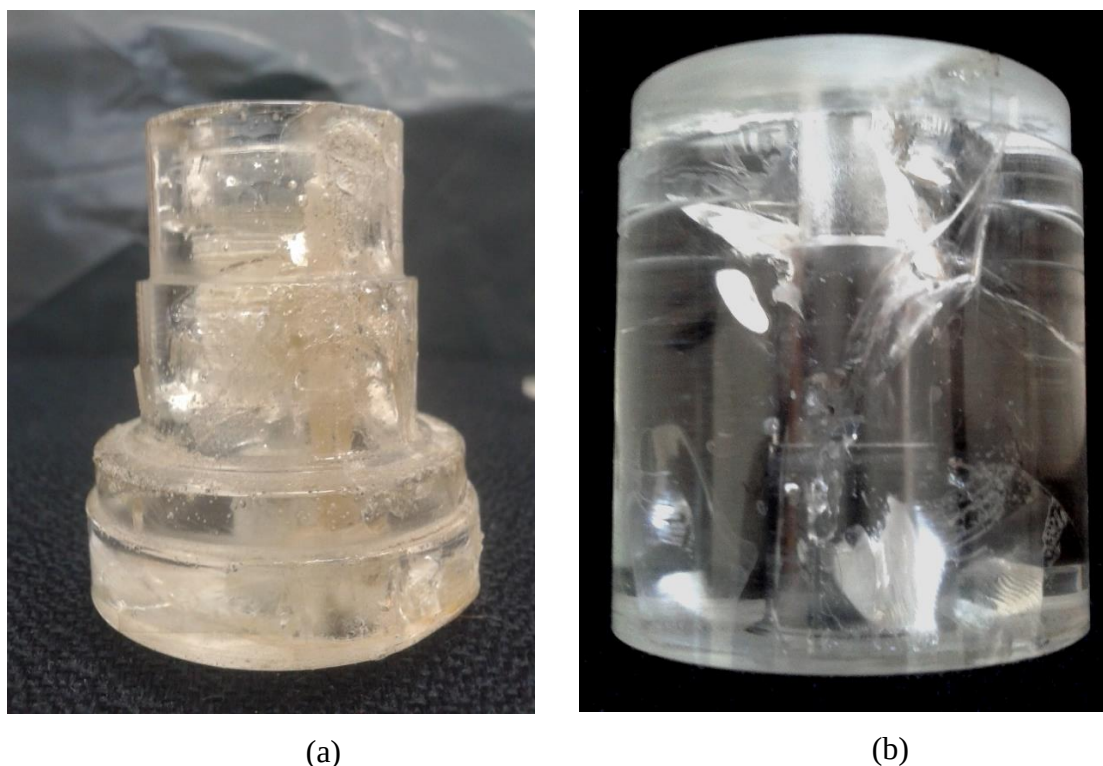


Figura 7. 3 (a)efeitos do OPPU no injetor feito de PMMA (b) efeitos dos compostos aromáticos no acrílico.

Mesmo assim foi usinado um injetor Y em acrílico para testar as condições de funcionamento deste injetor com outros líquidos, e observar o funcionamento dele com estes fluidos. A quantidade de líquido utilizado nestes testes foi calculado, baseado na quantidade de combustível necessário para uma determinada potência do injetor, os injetores foram nomeados segundo a potência resultante da queima do OPPU.

Para os primeiros testes, foi selecionado como líquido de teste: água, que foi colorida para obter uma melhor visualização do líquido dentro do injetor. (Vide Figura 7. 4).

Devido ao tempo necessário para a usinagem de um injetor efervescente em aço, para trabalhar com o OPPU não foi possível construir o modelo do injetor efervescente em aço, é por isto que foi necessário testar a configuração geométrica do injetor em PMMA e com fluidos de teste, para isto foram testados com óleo de Soja e com água.

Para evitar a propagação da pluma¹¹ gerada nos diferentes testes com os injetores, foi preciso adicionar um equipamento de extração desta, para evitar a contaminação do laboratório, isto foi de muita importância, devido as características necessárias para a medição das gotas com o laser (câmara obscura, e fechada).

¹¹ Nuvem de combustível gerado pela atomização de um líquido, neste caso os combustíveis testados, e permanece no ambiente e dissipa-se gradualmente.

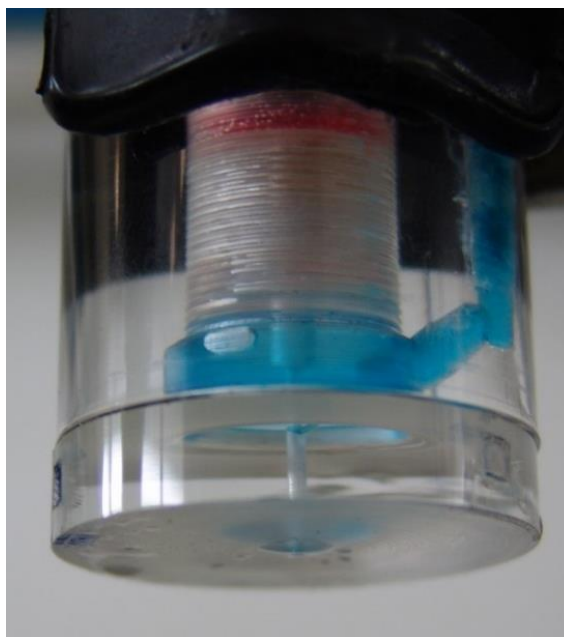


Figura 7. 4 Injetor em acrílico de 35 kW

No caso dos testes com o laser Malvern Spraytec, as distâncias utilizadas em todos os testes, são mostradas na Figura 7. 5, e o equipamento no processo de medição é mostrado na Figura 7. 6.

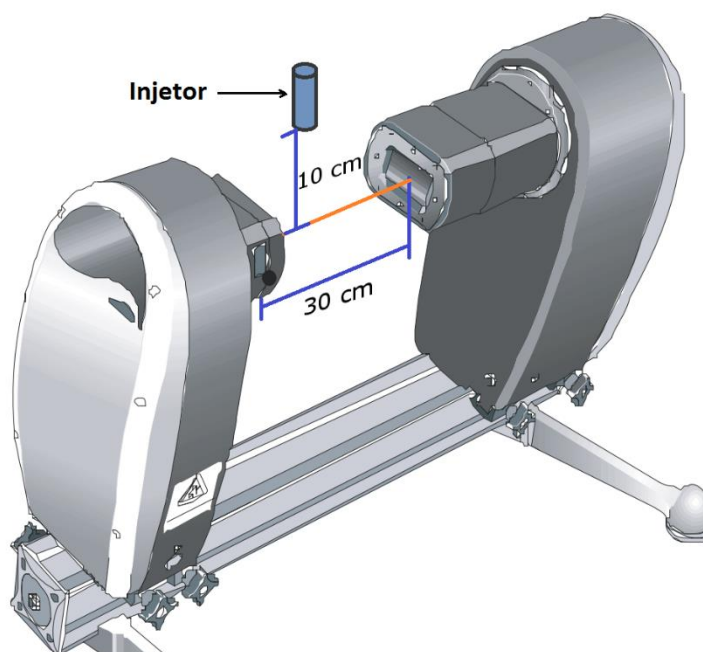


Figura 7. 5 Distancias no medidor laser, respeito ao jato e posição do injetor em todas as medições

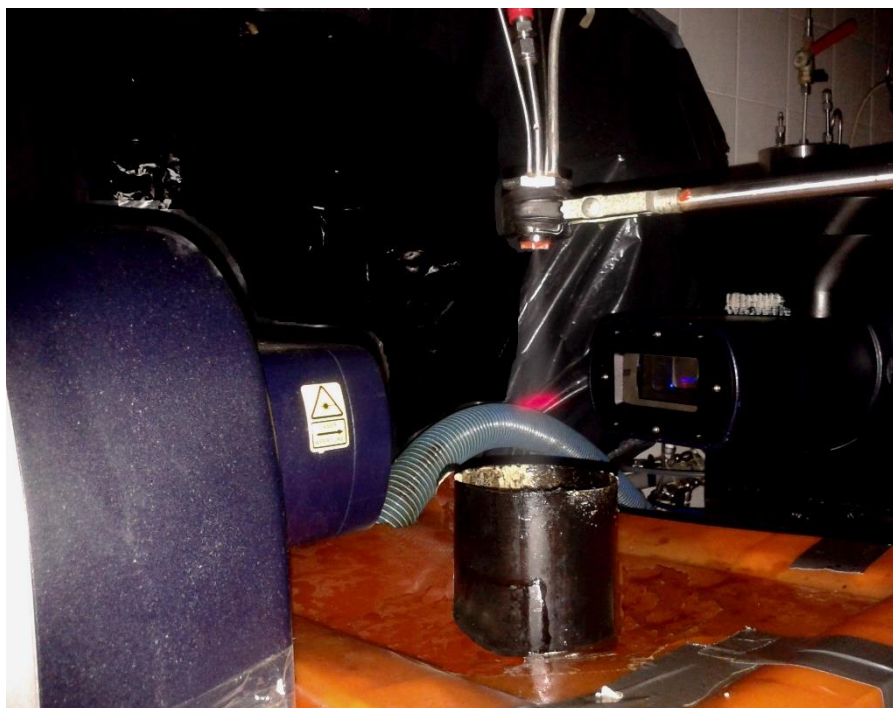


Figura 7. 6 Equipamento de medição do tamanho médio das gotas Malvern Spraytec

7.2.1 Calibração dos rotâmetros

O rotâmetro da bancada foi calibrado para cada um dos fluidos utilizados nos testes dos injetores. O rotâmetro é composto de um tubo cônico e de um flutuador com liberdade de movimento, cuja posição é proporcional ao vazamento de fluido. O princípio de funcionamento está baseado na condição de equilíbrio no flutuador das forças de arrasto, empuxo e o peso do corpo, devido a estas condições, a calibração é diferente para cada fluido, devido à dependência do rotâmetro da massa específica e viscosidade do fluido mediante o Número de Reynolds. Um fator de correção foi determinado experimentalmente para cada caso (WOJTKOWIAK e POPIEL, 1996).

Para evitar as variações da massa específica dos fluidos, as calibrações foram feitas a temperaturas próximas as temperaturas utilizadas nos testes na bancada experimental. A determinação das curvas de correção para os rotâmetros, foram determinados mediante um ajuste linear, e a partir destes valores foram corrigidos os valores medidos no rotâmetro no momento das leituras durante a realização dos testes.

A influência dentro dos rotâmetros no caso do óleo de soja, foi muito acentuada pela viscosidade deste fluido, observando-se uma menor capacidade de medição de fluxo com respeito aos outros fluidos (água, misturas OPPU-Diesel, e OPPU), o que originou vazões menores que as correspondentes com os outros fluidos, porque o rotâmetro atingia seu limite máximo a menores vazões que os outros líquidos testados.

Os resultados das calibrações são mostrados nas equações (6. 1) - (6. 8).

Água colorida:

$$[g/s] = 10,50 [l/min] + 0,019 \quad (6. 1)$$

$$[l/min] = 0,095 [g/s] - 0,0018 \quad (6. 2)$$

Óleo de soja

$$[g/s] = 1,32 [l/min] - 0,059 \quad (6. 3)$$

$$[l/min] = 0,75 [g/s] + 0,046 \quad (6. 4)$$

OPPU:

$$[g/s] = 9,72 [l/min] - 0,46 \quad (6. 5)$$

$$[l/min] = 0,10 [g/s] + 0,047 \quad (6. 6)$$

Misturas Diesel-OPPU:

$$[g/s] = 7,57 [l/min] - 0,39 \quad (6. 7)$$

$$[l/min] = 0,13 [g/s] + 0,054 \quad (6. 8)$$

7.2.2 Determinação das propriedades dos fluidos.

A determinação das propriedades do óleo de Soja, água colorida, e misturas de diesel-OPPU, foram realizadas nas instalações do Laboratório de Aplicações em Combustão e Gaseificação (LACG), com o viscosímetro de Ostwald, tensiômetro de Du Nouy, e utilizando a medição de massa e volume para a massa específica; segundo o procedimento mostrado anteriormente no item 5.2, e os resultados são mostrados na Tabela 7. 1.

Tabela 7. 1 Propriedades dos líquidos utilizados nos injetores.

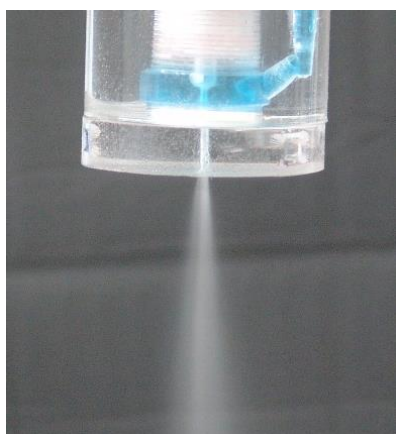
OLEO DE						
Líquido	SOJA	OPPU	ÁGUA	OPPU 2%	OPPU 5%	OPPU 10%
Massa específica						
g/ml	0,92	0,92	1,00	0,81	0,81	0,81
kg/m³	916,44	920,70	998,2	813,59	810,07	809,05
g/cm³	0,92	0,92	1,00	0,81	0,81	0,81
Viscosidade						
Pa.s	0,049	0,00047	$1,00 \times 10^{-3}$	0,0032	0,0033	0,0032
cP	48,52	0,47	1,00	3,18	3,27	3,24
m²/s	4,87E-05	$5,11 \times 10^{-7}$	$1,00 \times 10^{-6}$	$3,20 \times 10^{-6}$	$3,28 \times 10^{-6}$	$3,25 \times 10^{-6}$
cSt	48,67	5,15	1,00	3,20	3,28E+00	3,25
Tensão superficial						
N/m	0,020	0,028	0,073	0,013	0,012	0,012
Dinas/cm	19,89	28,091	72,80	12,82	12,38	12,38

Na Tabela 7. 1 pode-se observar que o óleo de soja apresenta a maior viscosidade dos fluidos testados, e a água a maior tensão superficial.

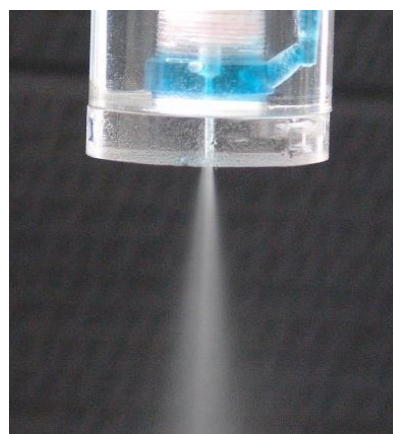
7.2.3 Testes iniciais com injetor Y em acrílico

O injetor acrílico foi testado com água, motivo pelo qual foi preciso realizar uma calibração do rotâmetro, baseado na massa específica e o volume da água colorida, e com isto foi feita a correção.

Com o rotâmetro calibrado foram realizados testes com o injetor Y em várias condições, para isto tomou-se em conta um fluxo constante de ar, variando as condições da relação gás líquido (Figura 7. 7). Com esta variação obteve-se uma variedade de potencias devido ao incremento da quantidade de líquido.



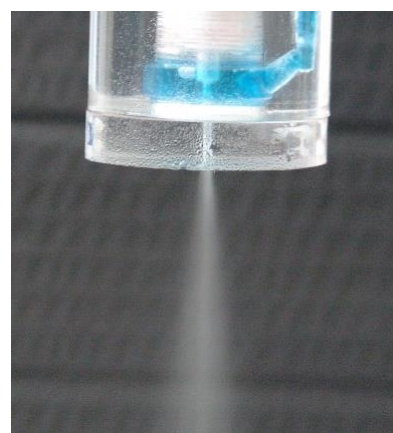
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 7. 7 Testes do injetor Y a diferentes relações gás combustível. (a) 0,05 (b) 0,075 (c) 0,1 (d) 0,125 (e) 0,15

Nestes testes não são apreciáveis variações nos ângulos de cone do jato, o aspecto apreciável nos testes, são a colagem do líquido (água) nas paredes da câmara de mistura, especialmente ao lado oposto do duto de líquido (lado esquerdo na Figura 7. 8) apresentando

uma maior concentração do líquido neste lado do injetor. As diferenças com distintas GLR, serão apreciáveis na medida do tamanho de gota em cada uma destas condições, mas os fenômenos observados nestes testes condizem com a descrição encontrada na literatura, porque também é possível observar a presença de uma menor densidade de gotas na parte central do jato e a quebra dos fios de líquido na saída da câmara de mistura do injetor. A quantidade de líquido no lado direito é maior que a quantidade no centro do jato, mas é menor que a quantidade no lado esquerdo.

Uma situação observada no processo experimental, foi o correto enchimento do injetor com os fluidos, sendo necessário encher primeiro as câmaras com líquido é logo adicionar o gás, isto é, devido à formação de borbulhas de gás nos compartimentos e dutos do injetor Y, as quais geram uma contrapressão e em alguns casos pistonado.



Figura 7. 8 Distribuição de gotas no injetor Y utilizando água colorida.

Nestes testes iniciais, não foram realizadas medições de gota, apenas para visualizar o comportamento visual do spray neste injetor.

Os resultados obtidos nas primeiras medições com este injetor são mostrados na Tabela 7. 2, junto com um gráfico de comparação das pressões (vide Figura 7. 9).

Observa-se que com baixos valores de GLR, onde tem-se o maior valor de líquido no injetor, a pressão de ar, é muito maior, sendo muito mais equilibrado nas demais medições

Tabela 7. 2 Resultados dos testes com o injetor Y em acrílico.

GLR	0,05	0,075	0,1	0,125	0,15
m_{ar} (l/min)	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4
m_{comb} (l/min)	0,25	0,165	0,12	0,1	0,08
P_{ar} (bar)	3,58	3,4	3,37	3,36	3,36
P_{comb} (bar)	3,51	2,31	1,7	0,96	0,74
T	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8

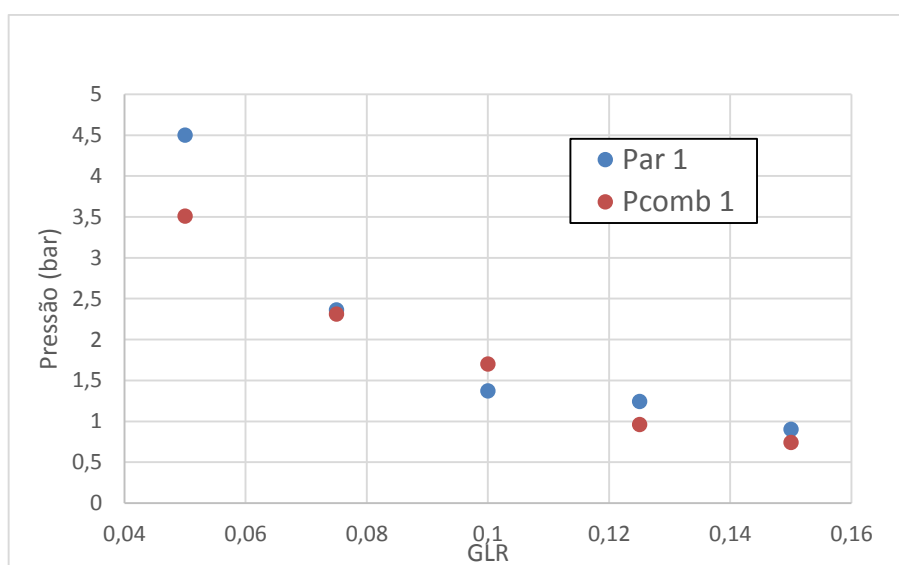


Figura 7. 9. Pressões nas linhas dentro do injetor Y em acrílico utilizando água.

7.3 Testes com injetor Y em aço

Depois de ter feito algumas medições com o injetor em acrílico, foram realizados os testes com o injetor em aço, neste ponto foi também acondicionada a bancada para a medição do tamanho de gota com o medidor Malvern Spraytec, e o extrator de pluma para evitar riscos de contaminação aos membros da equipe experimental.

Os testes estiveram diferenciados de acordo à capacidade do rotâmetro de fazer a medição das vazões dos fluidos testados, é por isso que nem todos os testes apresentam a mesma faixa de funcionamento. Muitos destes testes apresentam também valores de GLR, determinados fundamentalmente pela vazão que foi possível medir no rotâmetro. O valor utilizado para caracterizar o tamanho de gota é o D_{32} , mas para comparar os valores com o valor

predito pela equação de Wigg (valor teórico) também será medido o D_{MMD} . Para avaliar o efeito da variação dos valores da viscosidade e tensão superficial na equação de Wigg, foi analisada sua influência para variações de +10% e -10% no Apêndice B onde mostra que a influência da viscosidade é maior que da tensão superficial tendo, uma variação de até 8,69 μm entre os valores máximos e mínimos (+10% e -10%) para o óleo de soja.

7.3.1 Testes com injetor Y e óleo de soja, com a quantidade de ar do projeto.

Primeiramente foi testado o injetor em aço com um fluido de elevada viscosidade, o óleo de soja, este fluido foi determinado e mencionado anteriormente e também suas propriedades foram determinadas experimentalmente, os resultados dos testes e cálculos são mostrados na Tabela 7. 3. Com este líquido a vazão volumétrica medida no rotâmetro foi muito menor que o dos outros fluidos, isto foi explicado anteriormente, e tem relação com a alta viscosidade do óleo de soja.

Tabela 7. 3 Resultados do tamanho médio de gota (MMD) dos testes com o injetor Y em aço, com a quantidade de ar do projeto (6,4 l/min).

ÓLEO DE SOJA				
$m_{\text{comb}}(\text{g/s})$	0,34	0,27	0,21	0,12
$m_{\text{ar}}(\text{g/s})$	0,13	0,13	0,13	0,13
GLR	0,38	0,47	0,63	1,08
P_{ar}	3,47	3,47	3,48	3,48
P_{comb}	0,31	0,11	-0,03	-0,16
Teórico	62,54	56,69	50,38	41,14
D_{32}	23,43	19,57	18,89	18,27
D_{MMD}	50,69	44,48	46,33	44,88

A seguir os gráficos nas Figura 7. 10 e Figura 7. 11, mostram o comportamento das pressões e o tamanho de gota. A Figura 7. 11, mostra a diferença entre os valores teóricos de tamanho de gota do projeto, onde foi considerado somente o efeito da vazão do ar como gás ideal com o valor obtido com o laser Spraytec. No primeiro teste verifica-se uma grande diferença entre a pressão do combustível e a pressão do ar, notando-se que o combustível é arrastado pelo fluxo de ar chegando a ter pressões negativas no óleo de soja, mas tem-se que notar neste teste, que as relações GLR são altas, devido ao limitante da vazão de combustível, já que não foi possível utilizar maiores quantidades de combustível, e com isto diminuir o valor da GLR.

A Figura 7. 11, mostra uma pequena diferença entre os valores calculados teoricamente segundo a equação (5. 20) e os valores determinados experimentalmente na bancada construída para esta dissertação e que foi descrita no Capítulo 6.

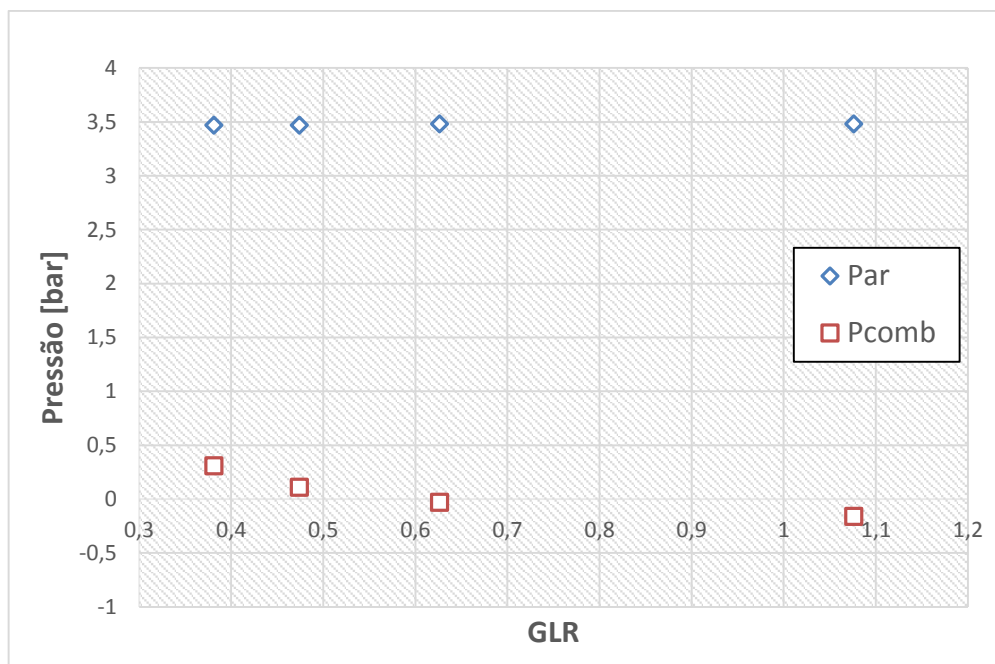


Figura 7. 10. Pressões nas linhas do injetor Y em aço, com a quantidade de ar do projeto.

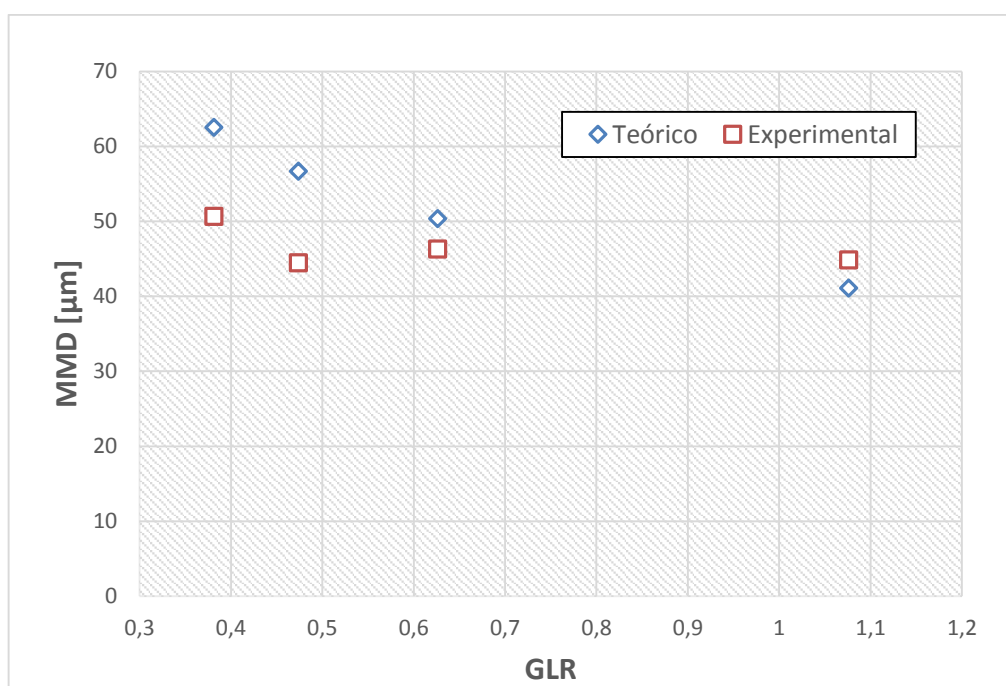
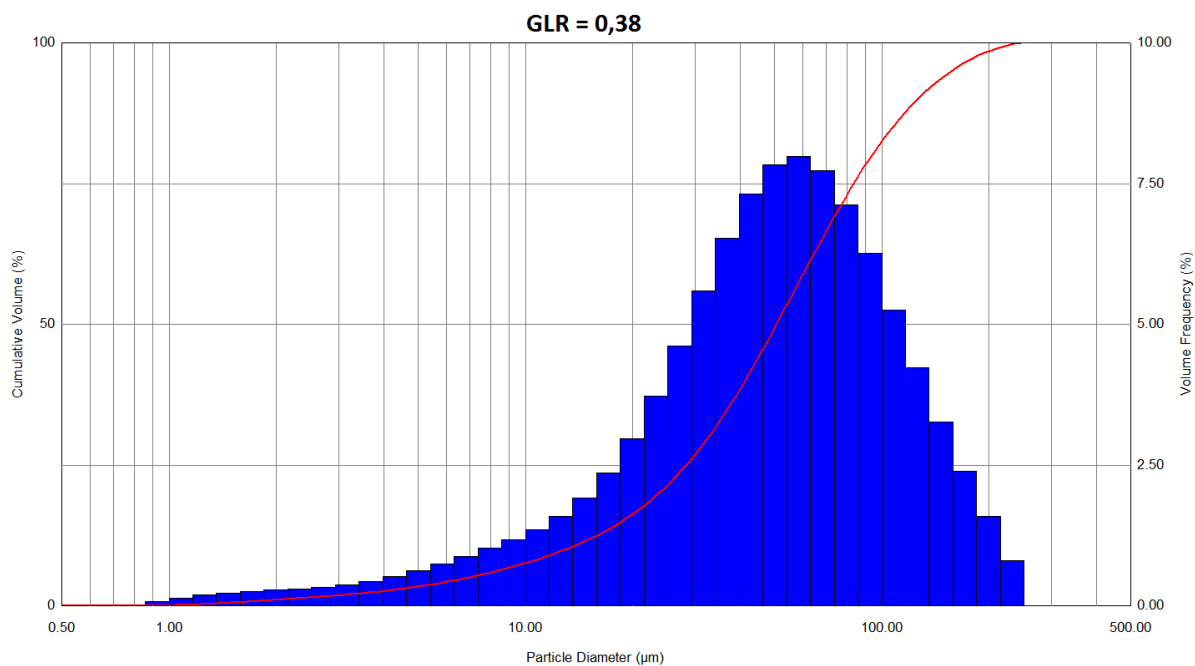
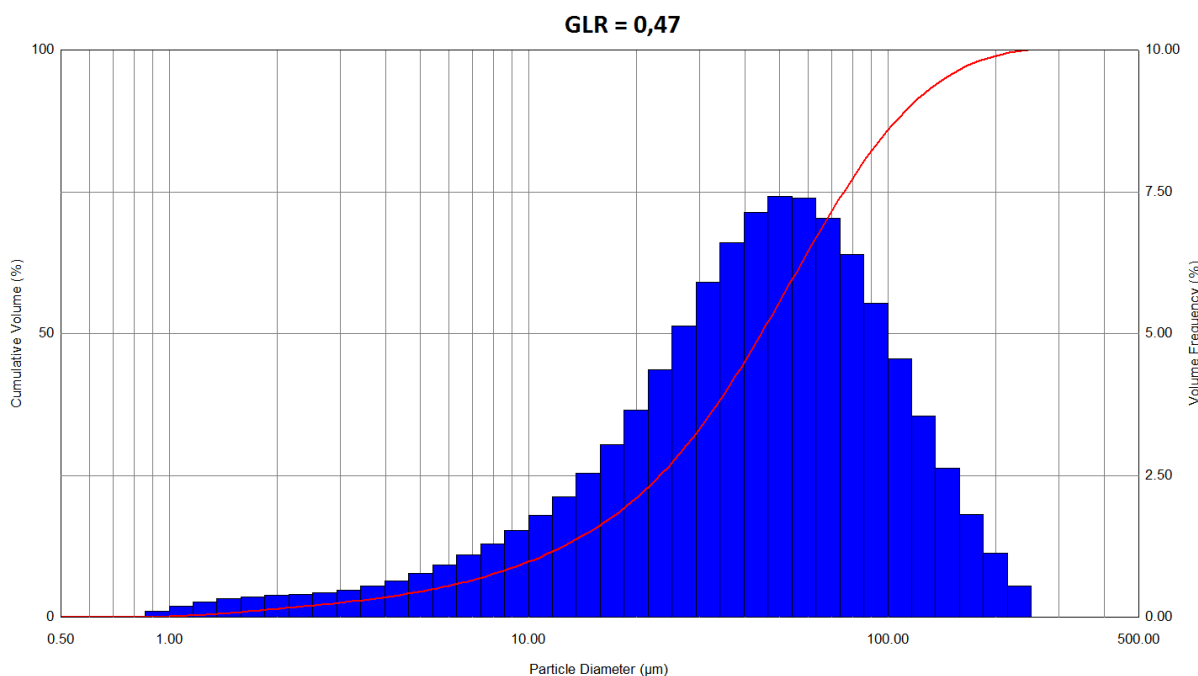


Figura 7. 11. Comparação do tamanho médio de gota (MMD) teórico e experimental, para o óleo de soja

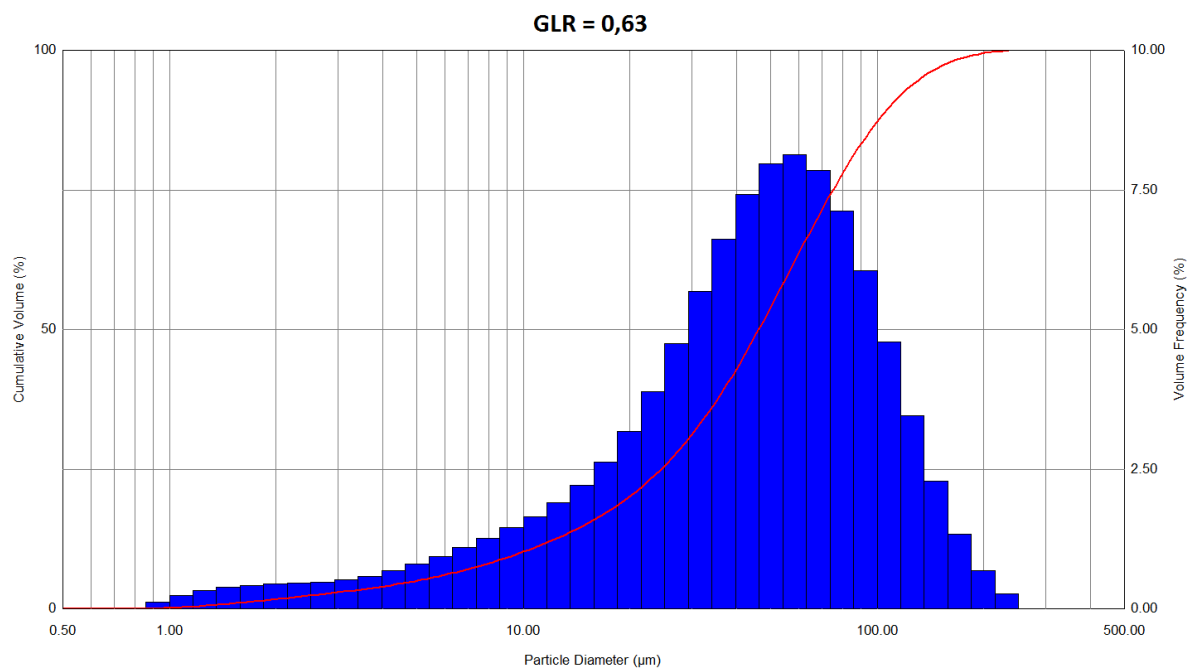
As distribuições em volume dos tamanhos das partículas medidas pelo laser no Spray de óleo de soja são mostradas na Figura 7. 12. Estas distribuições em geral apresentam um comportamento similar e regular com a tendência a um tamanho de gota dominante.



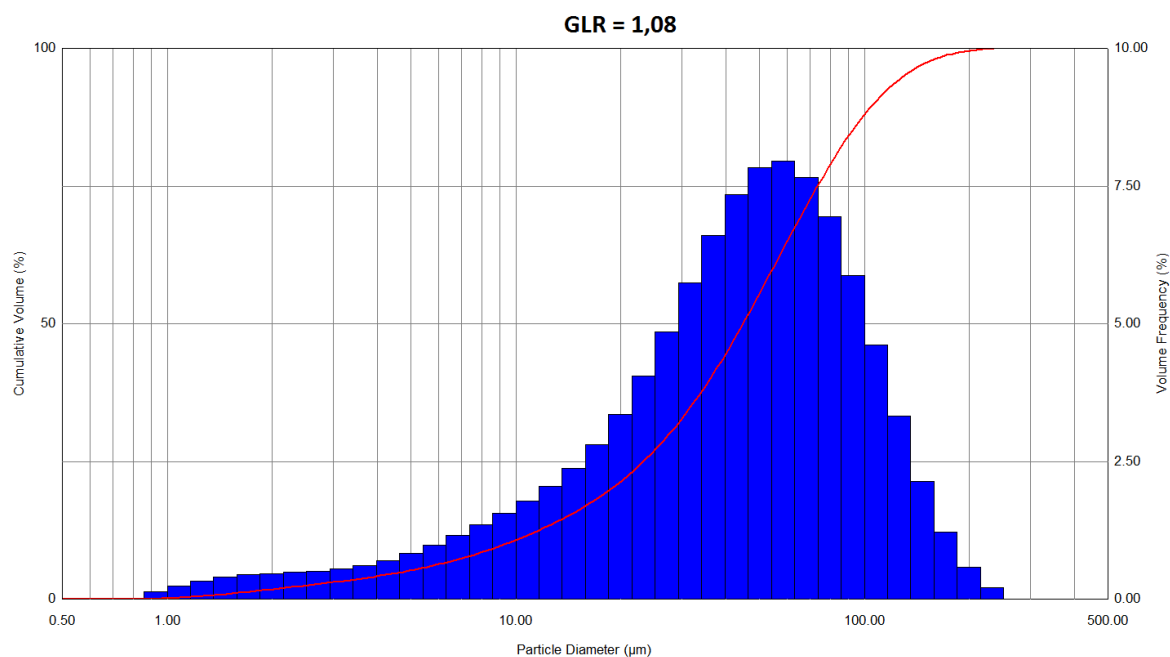
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7. 12. Distribuição de tamanho de partícula com respeito à GLR, (a) GLR=0,38 (b) GLR=0,47 (c) GLR=0,63 (d) GLR=1,08 em sprays de óleo de soja.

7.3.2 Testes com injetor Y e óleo de soja, com 3,5 l/min de ar.

No teste anterior, a faixa de operação foi restrita pelo rotâmetro, é por isto, para testar outras relações GLR, foi necessário diminuir a quantidade de ar no injetor, e com isto conseguir uma melhor faixa de operação, já que ao diminuir a quantidade de ar, diminuía-se também a quantidade de líquido e, por conseguinte podia-se trabalhar em uma faixa mais ampla de

operação, Estes detalhes podem ser visualizados na Tabela 7. 4 e a Figura 7. 13 e Figura 7. 14, na primeira delas, mostra uma menor pressão na linha de líquido, valor menor ao valor de projeto (3 bar), isto é gerado pela diminuição da vazão do líquido. Nesta figura (Figura 7. 13), mostra uma concordância do comportamento com o teste anterior, mostrando uma aproximação entre as pressões para baixas relações GLR.

Tabela 7. 4 Resultados do tamanho de gota, com a metade da quantidade de ar do projeto.

ÓLEO DE SOJA					
m_{comb}(g/s)	0,40	0,34	0,27	0,21	0,14
m_{ar}(g/s)	0,070	0,07	0,07	0,07	0,07
GLR	0,17	0,21	0,26	0,34	0,50
P_{ar}	1,77	1,67	1,68	1,68	1,68
P_{comb}	0,53	0,23	0,09	0,01	-0,12
Teórico	86,81	79,11	70,86	61,90	51,92
D₃₂	34,97	31,52	25,48	22,64	19,91
D_{MMD}	61,86	59,73	50,39	45,41	42,98



Figura 7. 13. Pressões nas linhas do injetor Y em aço, com 3,5 l/min de ar e óleo de soja.

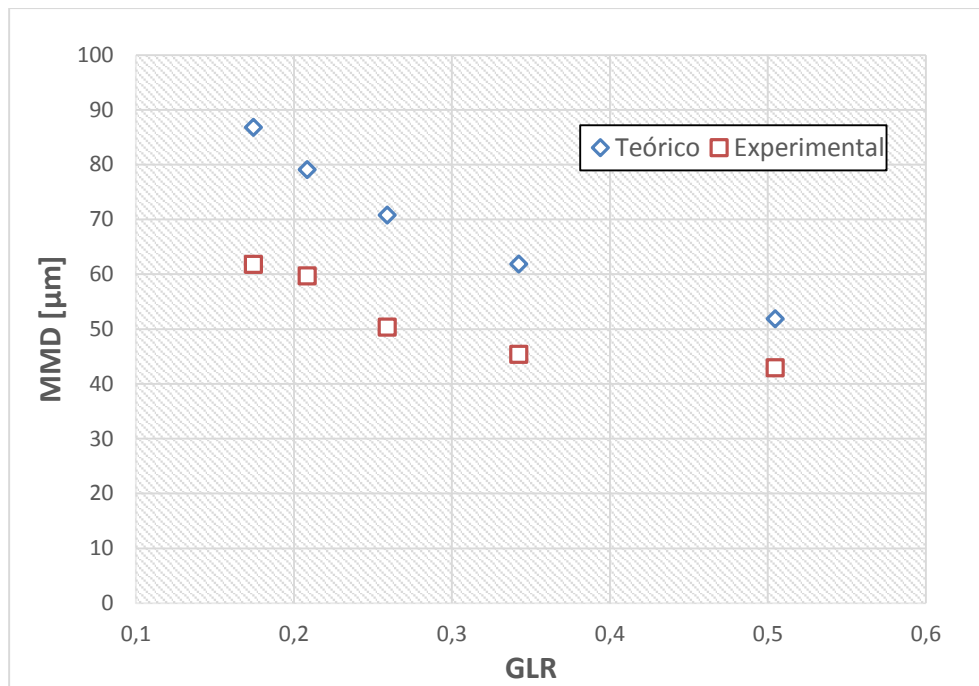
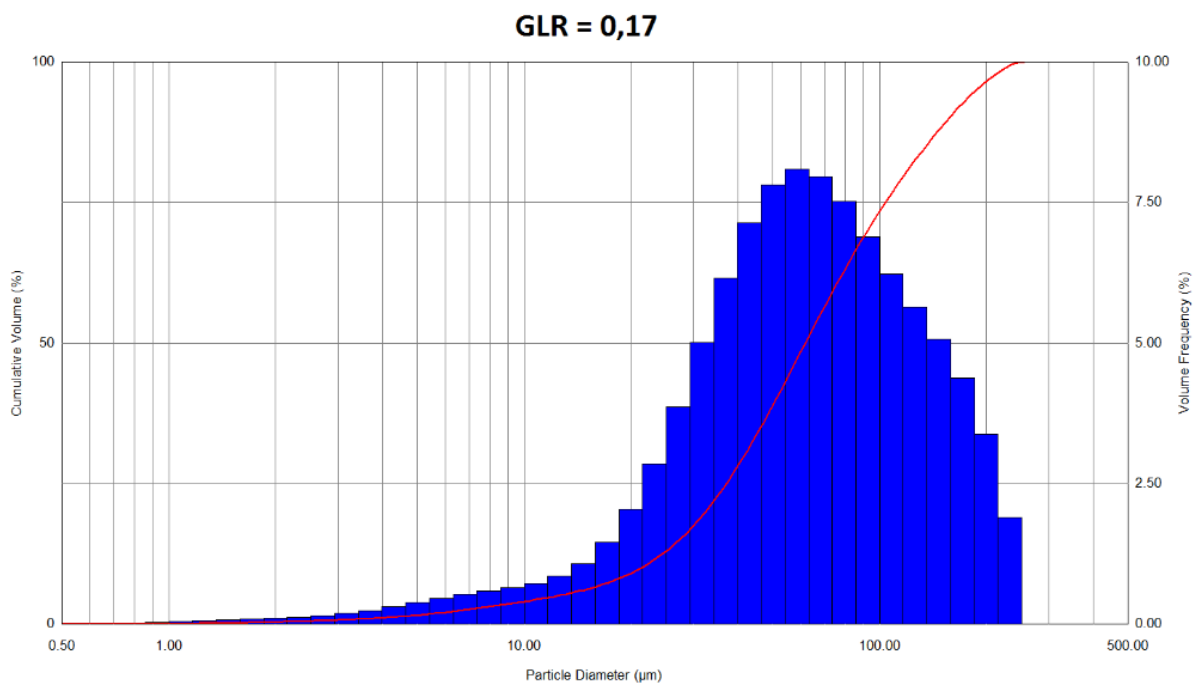


Figura 7. 14. Comparação do tamanho médio (MMD) de gota teórico e experimental para o óleo de soja com 3,5 l/min de ar.

O comportamento mostrado na Figura 7. 14 é similar ao teste anterior, com quantidades similares entre os valores teóricos e os valores determinados experimentalmente.

As distribuições de tamanho de gota são mostrados na Figura 7. 15 e no Apêndice C B.1, tendo um comportamento similar ao caso anterior.



(a)

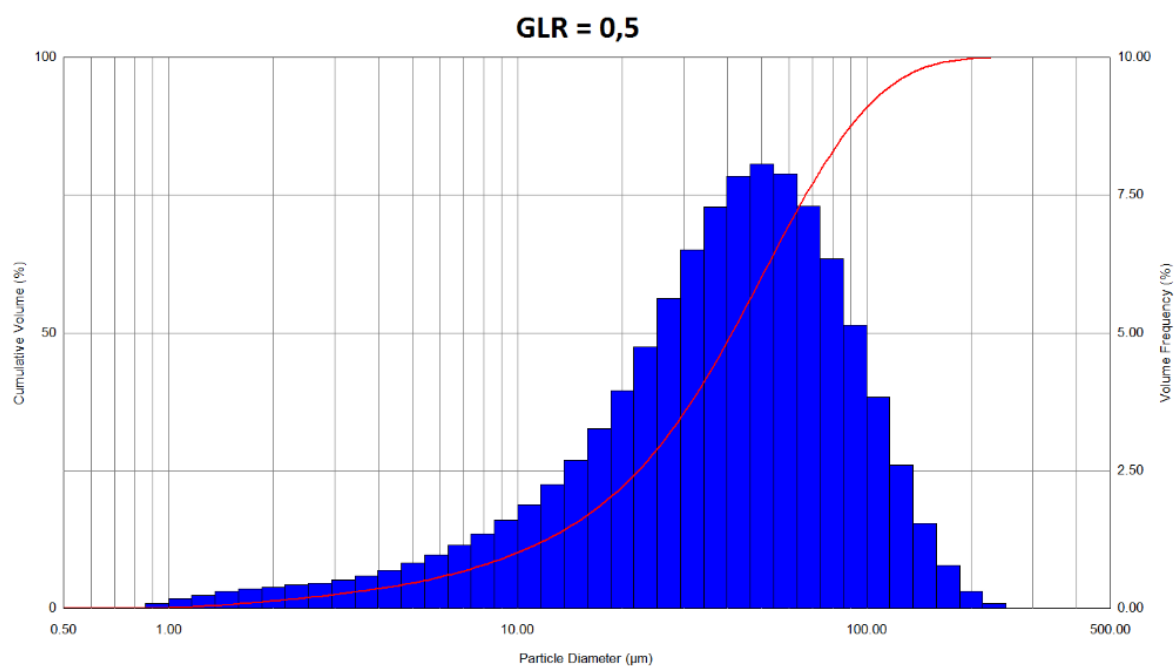
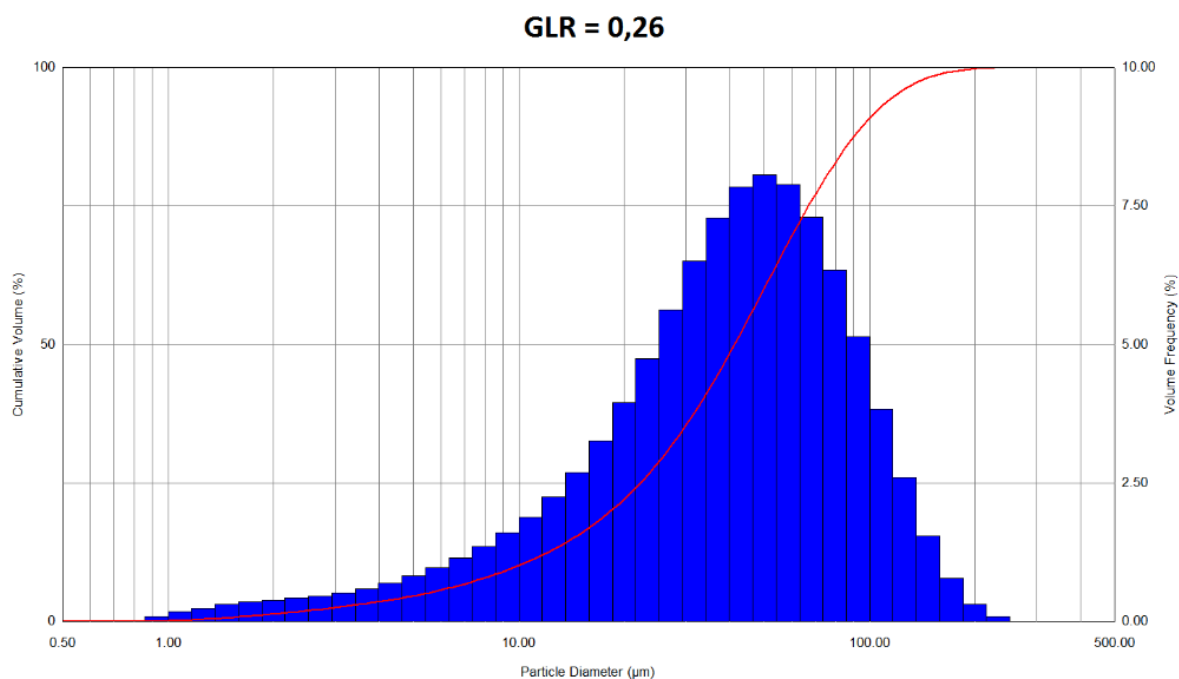


Figura 7. 15. Distribuição de tamanho de partícula com respeito à GLR para óleo de soja 3,5 l/min de ar (a) GLR=0,17 (b) GLR=0,26 (c) GLR=0,5

7.3.3 Testes com injetor Y e OPPU, com os parâmetros do projeto.

Nesta seção foi testado o injetor Y segundo os parâmetros do projeto, e foi realizada a comparação dos resultados experimentais e os cálculos teóricos de tamanho de gota (Tabela 7. 5) assim como a comparação das pressões no injetor (Figura 7. 16 e Figura 7. 17).

Tabela 7. 5 Resultados do tamanho de gota, dos testes com o injetor Y em aço, utilizando OPPU.

OPPU					
m_{comb}(g/s)	2,63	1,75	1,32	1,05	0,88
m_{ar}(g/s)	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
GLR	0,05	0,075	0,10	0,125	0,15
P_{ar}	3,60	3,46	3,46	3,47	3,46
P_{comb}	5,70	2,05	1,16	1,14	0,56
Teórico	64,46	51,14	43,53	38,51	34,90
D₃₂	40,51	33,30	29,00	28,16	24,25
D_{MMD}	55,27	67,42	56,16	56,22	48,85

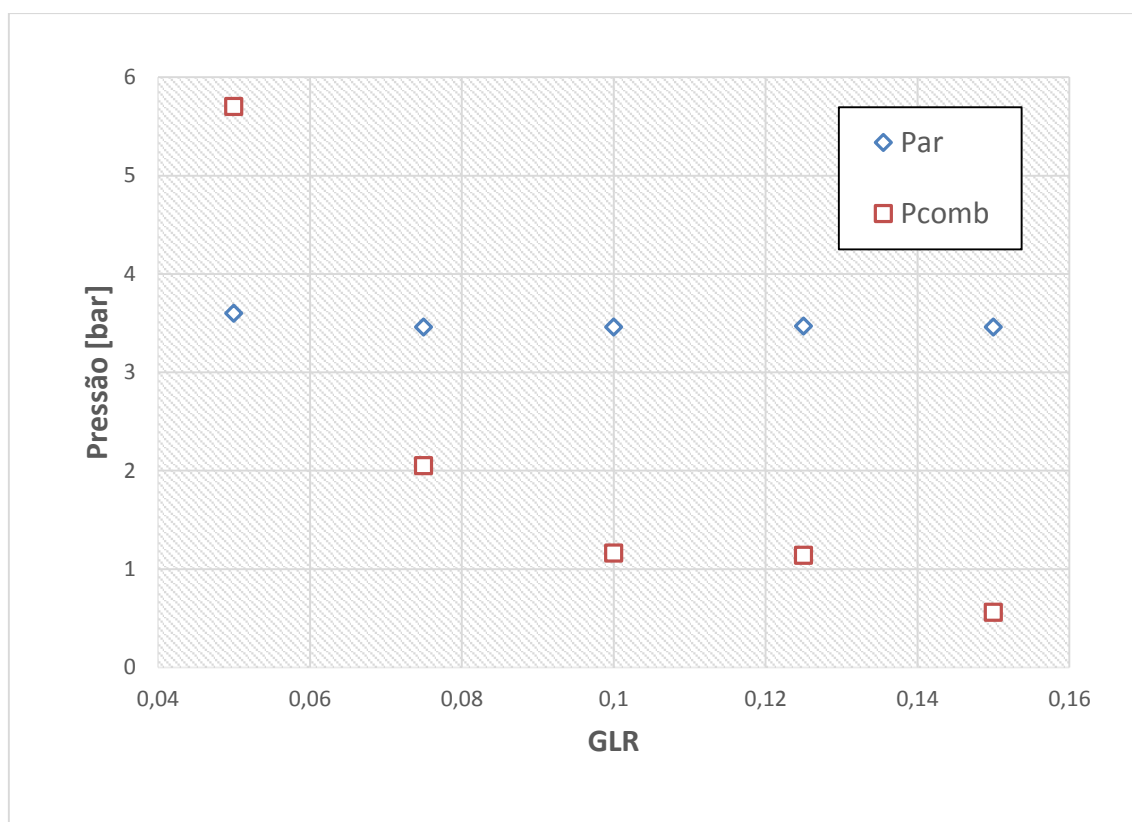


Figura 7. 16. Pressões nas linhas do injetor Y em aço com OPPU.

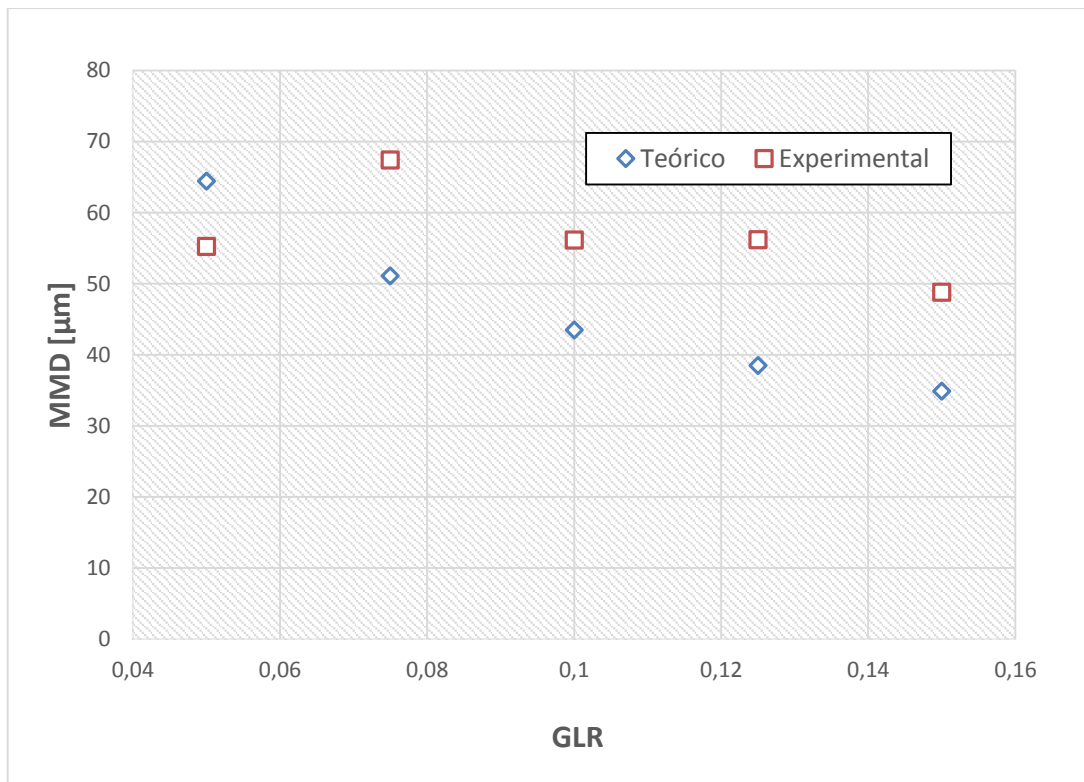


Figura 7. 17. Comparação do tamanho de gota teórico e experimental, para o OPPU, com os parâmetros de projeto.

Neste teste foi observado um fenômeno interessante, que se mostra na Figura 7. 18, onde tendo em consideração o mostrado na Figura 7. 16, percebe-se, que uma melhor distribuição de gota é obtida quando a pressão na linha de combustível é maior que a pressão na linha de ar, esta situação só é observável para relações GLR baixas, sendo a pressão de ar maior que a pressão do combustível nas demais relações GLR. A predição teórica do tamanho de gota é próxima à tamanho de gota determinado experimentalmente nos teste na bancada. Outro fenômeno interessante observado nos testes e que pode ser confirmada mediante a observação dos gráficos de distribuição de tamanho de partícula no jato, é a formação de gotas grandes, como mostram os lados direitos das figuras mencionadas, representando a tendência da formação em menor medida de outro tamanho de gota predominante (Figura 7. 18 e Apêndice C.2).

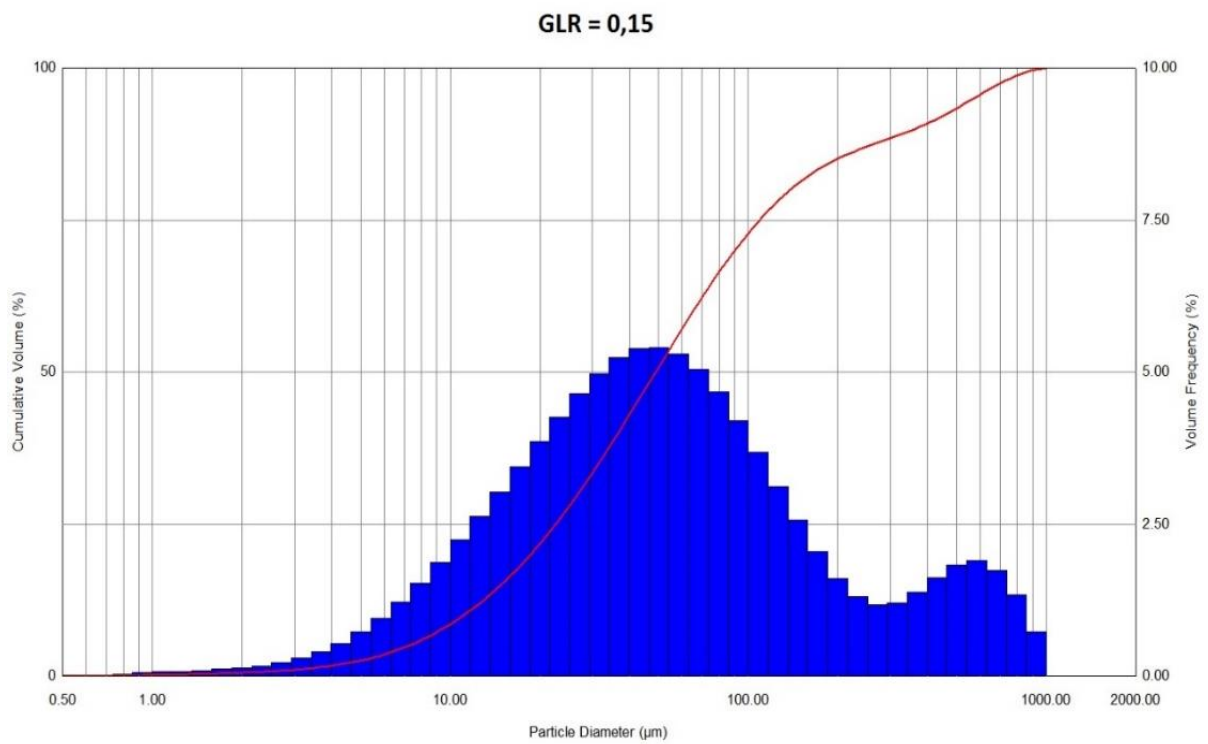
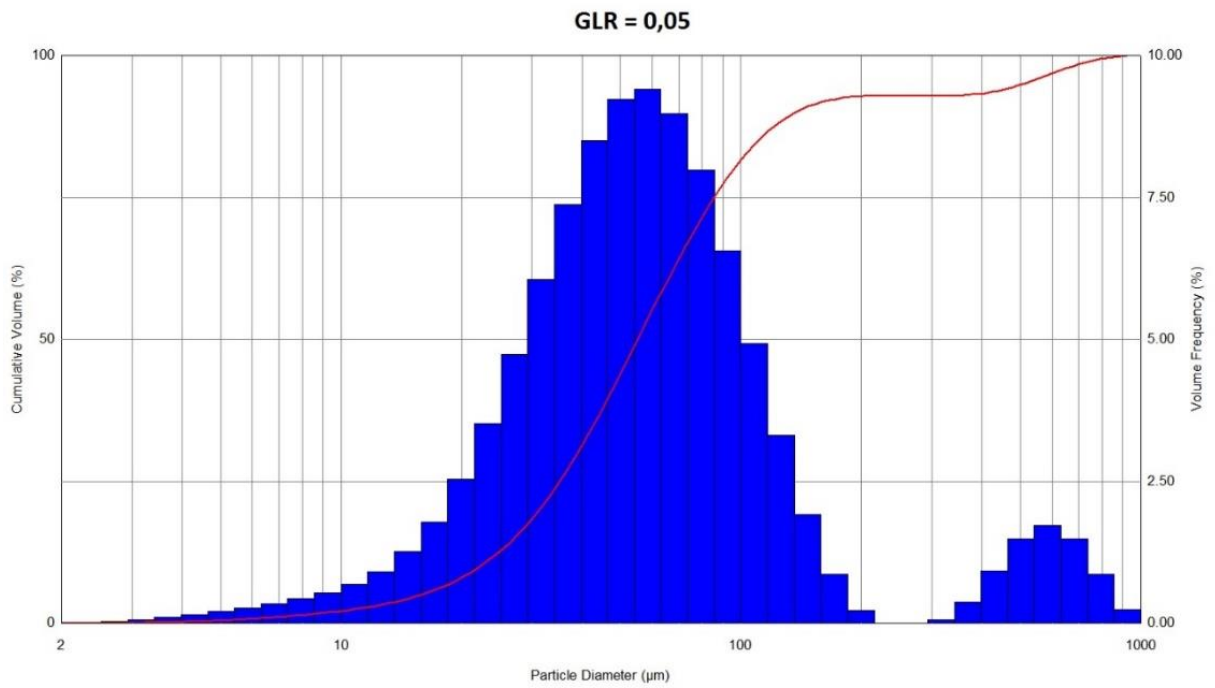


Figura 7. 18. Comparação das distribuições de tamanho de gota para os valores extremos de GLR, para OPPU a) GLR=0,05; b) GLR=0,15.

7.3.4 Testes com injetor Y com mistura Diesel-OPPU, com 2% de OPPU em massa.

O OPPU também foi testado com misturas em peso de 2% OPPU e o resto com Diesel, os resultados de cada um dos testes são apresentados resumidamente na Tabela 7. 6, as pressões no injetor mostradas na Figura 7. 19 e a comparação dos resultados experimentais e teóricos mostrados na Tabela 7. 6, e na Figura 7. 20.

Para as misturas com Diesel foi utilizado o combustível comercial Diesel Shell Evolux S-10, combustível de acordo com a RESOLUÇÃO ANP Nº 50, DE 23.12.2013 - DOU 24.12.2013 (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2016).

Tabela 7. 6 Resultados do tamanho de gota (μm) dos testes com o injetor Y em aço, utilizando uma mistura de Diesel-OPPU, com um 2% de OPPU.

	2% OPPU					
m_{comb}(g/s)	2,26	1,73	1,28	1,05	0,90	0,37
m_{ar}(g/s)	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
GLR	0,06	0,08	0,10	0,125	0,15	0,35
P_{ar}	4,18	3,47	3,44	3,44	3,44	3,44
P_{comb}	4,88	2,98	1,57	1,38	1,08	-0,01
Teórico	39,84	34,23	28,88	25,94	23,85	15,22
D₃₂	32,85	41,64	34,79	33,80	31,94	23,87
D_{MMD}	44,65	65,21	51,77	49,07	45,76	31,25

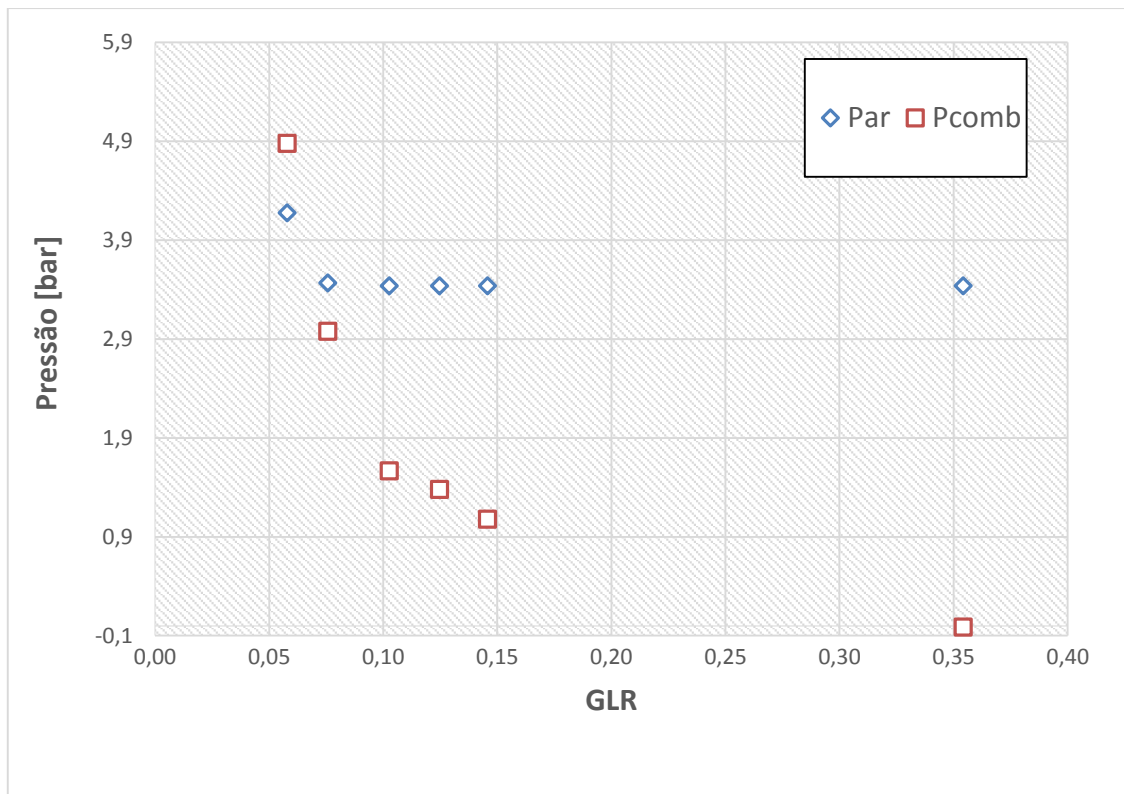


Figura 7. 19. Pressões nas linhas do injetor Y em aço com mistura Diesel-OPPU, com 2% de OPPU em massa.

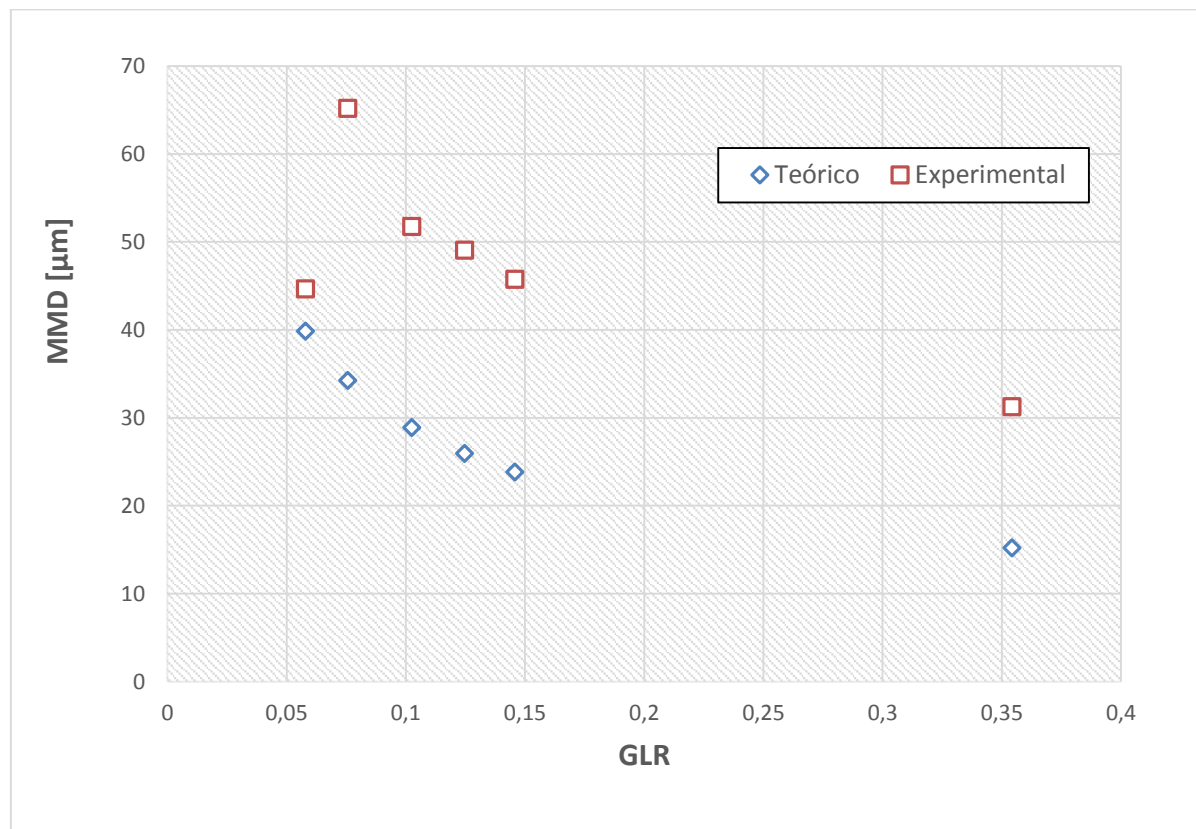


Figura 7. 20. Comparação do tamanho de gota teórico e experimental, para o injetor Y com mistura Diesel-OPPU, com 2% de OPPU em massa.

7.3.5 Testes com injetor Y com mistura Diesel-OPPU, com 5% de OPPU em massa.

Foram feitos os testes com de OPPU – Diesel, com 5% OPPU em massa, os resultados de cada um dos testes são apresentados na Tabela 7. 7, as pressões no injetor mostradas na Figura 7. 21 e a comparação dos resultados experimentais e teóricos mostrados na Tabela 7. 7, e mostrados na Figura 7. 22.

Tabela 7. 7 Resultados do tamanho de gota dos testes com o injetor Y em aço, utilizando uma mistura de Diesel-OPPU, com um 5% de OPPU.

5% OPPU						
m_{comb}(g/s)	2,26	1,73	1,28	1,05	0,90	0,37
m_{ar}(g/s)	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
GLR	0,06	0,08	0,10	0,125	0,15	0,35
P_{ar}	4,18	3,45	3,44	3,44	3,43	3,43
P_{comb}	5,03	1,99	1,76	1,52	1,03	0,01
Teórico	40,09	34,44	29,06	26,10	24,00	15,31
D₃₂	32,12	32,20	31,60	29,38	25,79	15,17
D_{MMD}	43,46	57,82	57,73	54,80	46,54	28,74

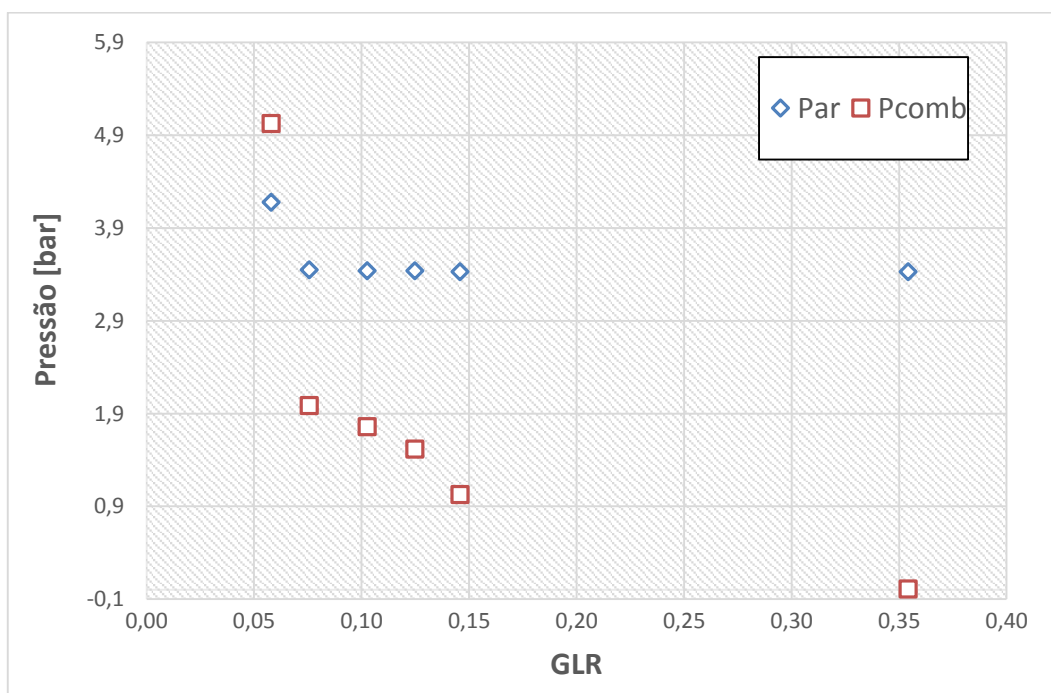


Figura 7. 21. Pressões nas linhas do injetor Y em aço com mistura Diesel-OPPU, com 5% de OPPU em massa.

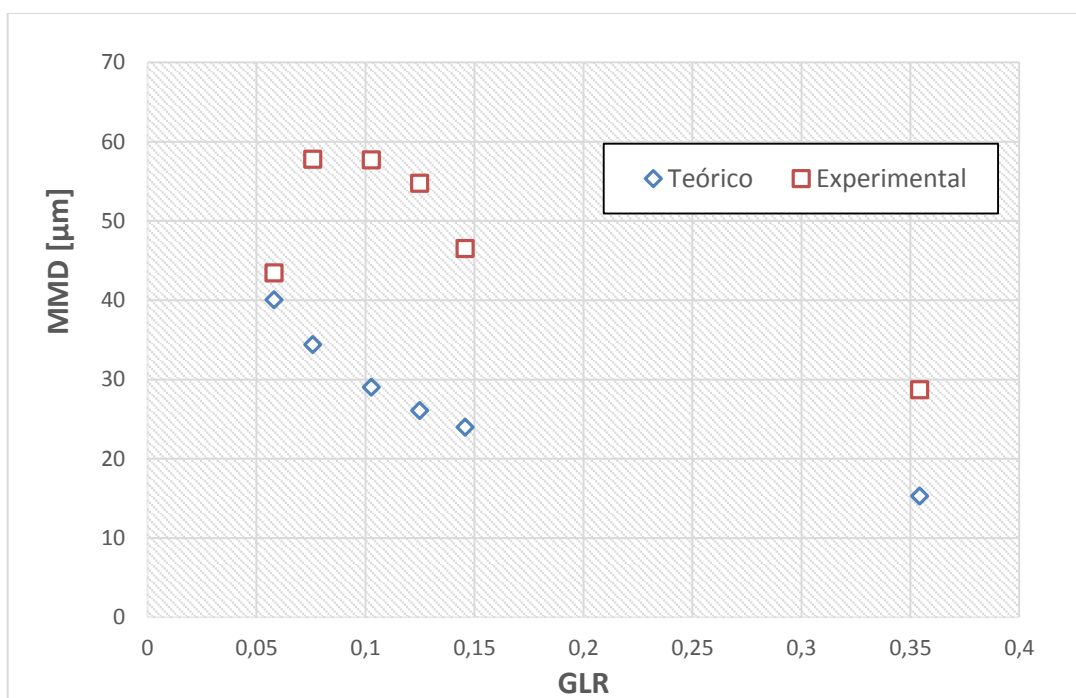


Figura 7. 22. Comparação do tamanho de gota teórico e experimental, para o injetor Y com mistura Diesel-OPPU, com 5% de OPPU em massa.

7.3.6 Testes com injetor Y com mistura Diesel-OPPU, com 10% de OPPU em massa.

Também foram feitos testes com misturas de OPPU – Diesel, com 5% OPPU em massa, os resultados de cada um dos testes são apresentados na Tabela 7. 8, as pressões no injetor mostradas na Figura 7. 23 e a comparação dos resultados experimentais e teóricos mostrados na Tabela 7. 8, e mostrados na Figura 7. 24.

Tabela 7. 8 Resultados do tamanho de gota dos testes com o injetor Y em aço, utilizando uma mistura de Diesel-OPPU, com um 10% de OPPU.

10% OPPU						
m_{comb}(g/s)	2,26	1,73	1,28	1,05	0,90	0,37
m_{ar}(g/s)	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
GLR	0,06	0,08	0,10	0,125	0,15	0,35
P_{ar}	4,19	3,62	3,52	3,52	3,52	3,52
P_{comb}	4,93	2,93	1,83	1,31	0,85	-0,03
Teórico	39,91	34,29	28,93	25,98	23,89	15,24
D₃₂	35,44	37,55	30,76	29,74	24,14	14,09
D_{MMD}	48,88	72,88	57,45	54,57	44,19	26,56

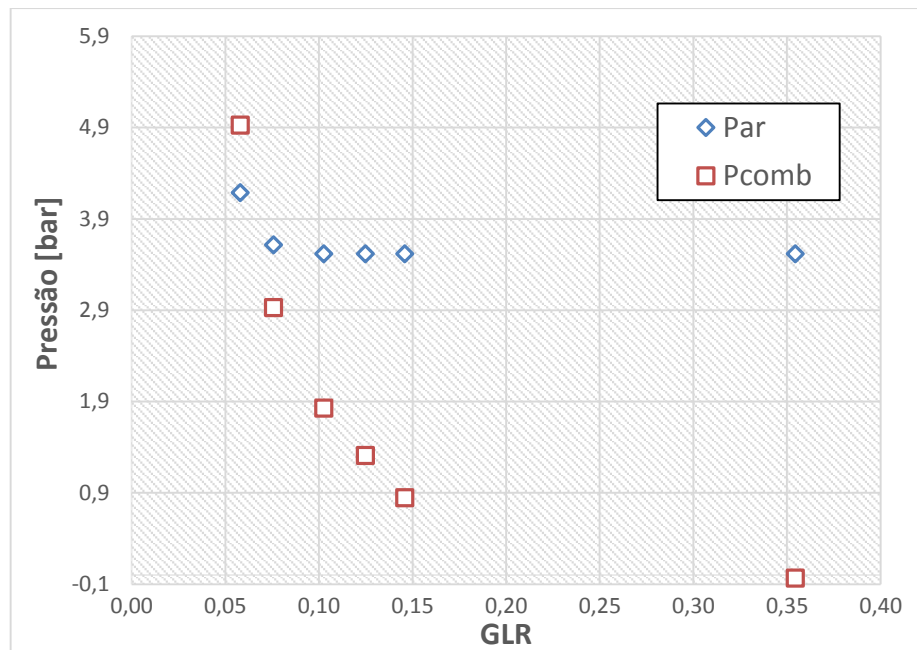


Figura 7. 23. Pressões nas linhas do injetor Y em aço com mistura Diesel-OPPU, com 10% de OPPU em massa.

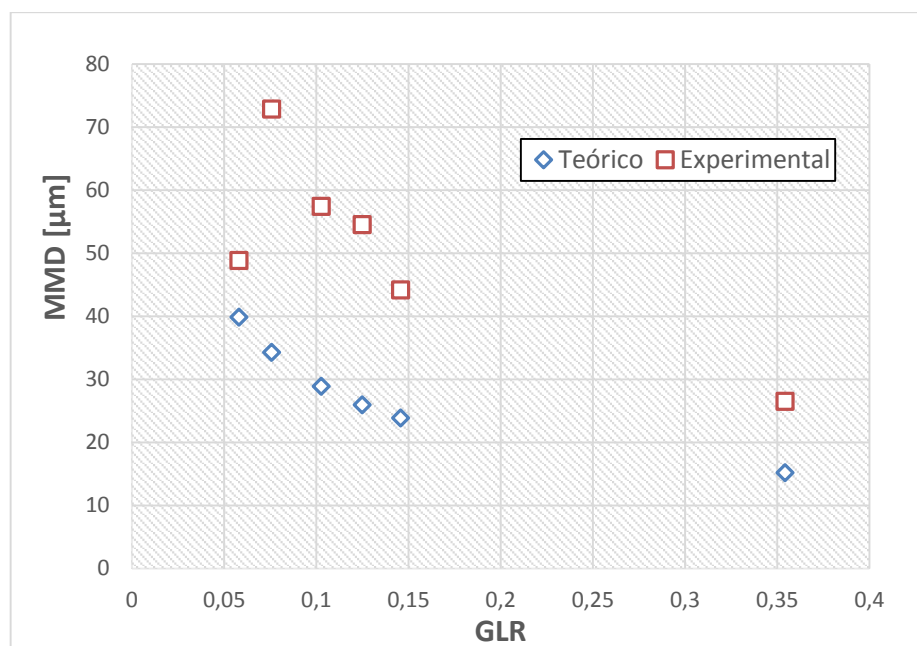
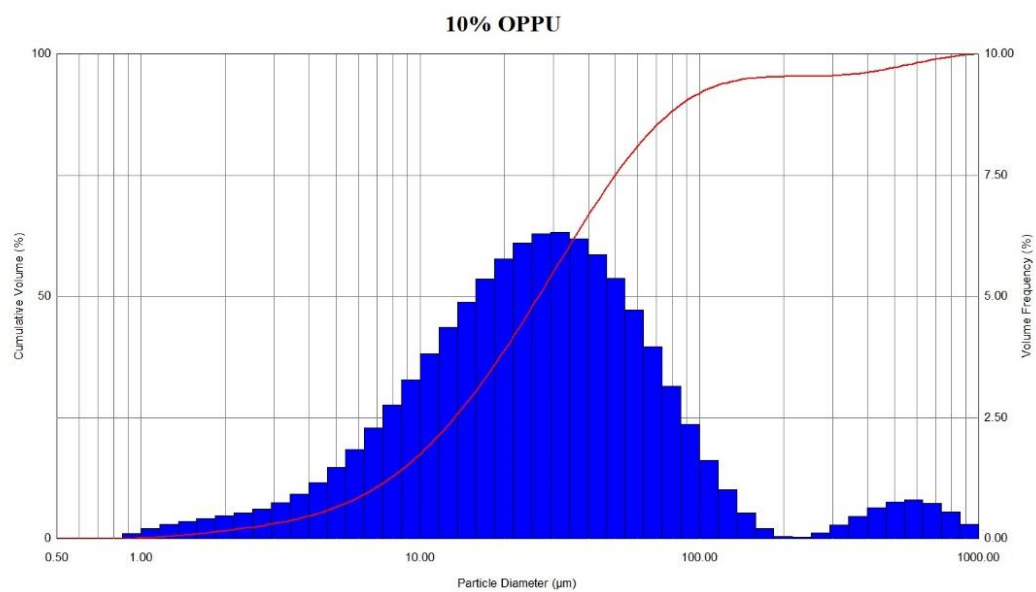
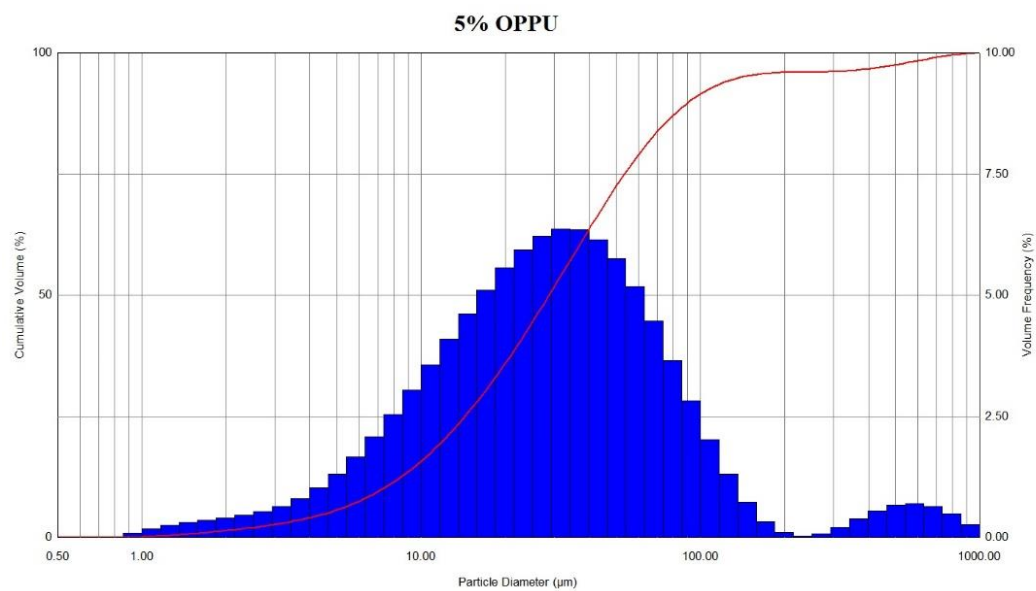
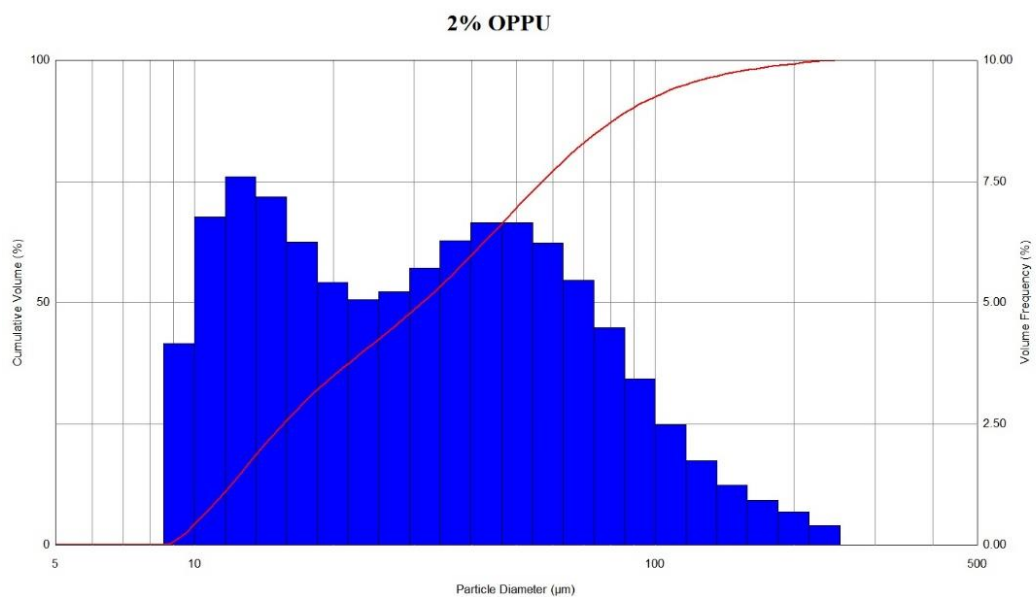


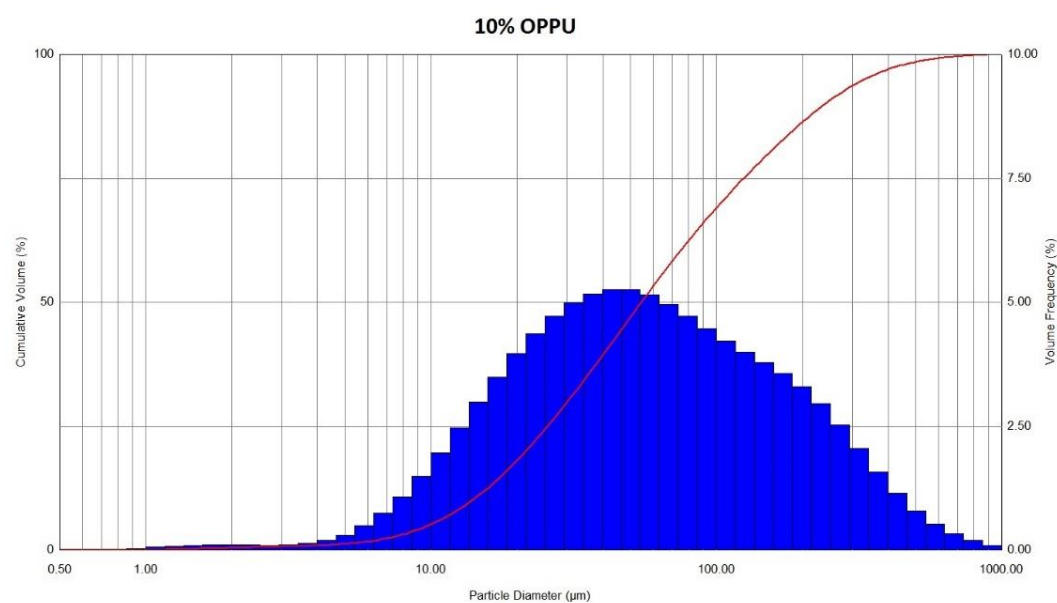
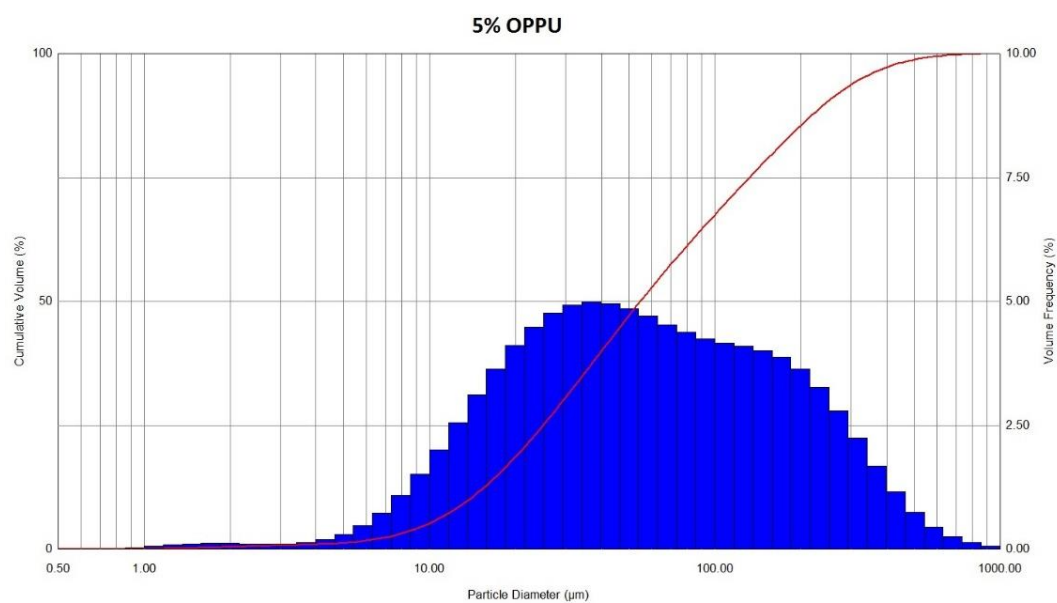
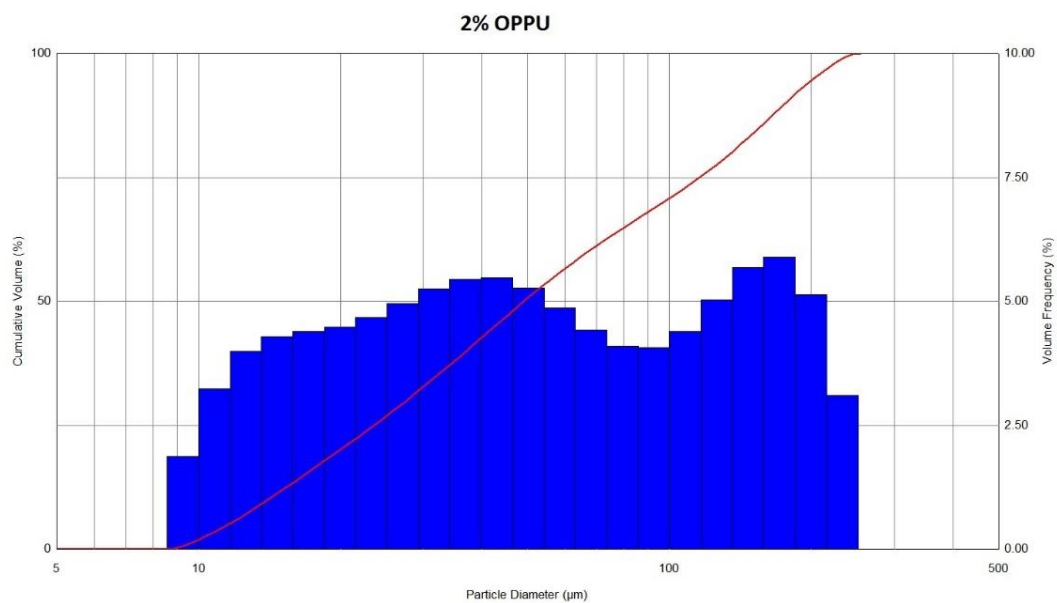
Figura 7. 24. Comparação do tamanho de gota teórico e experimental, para o injetor Y com mistura Diesel-OPPU, com 10% de OPPU em massa.

A análise é feita para todos os testes de mistura com 2%, 5% e 10%.

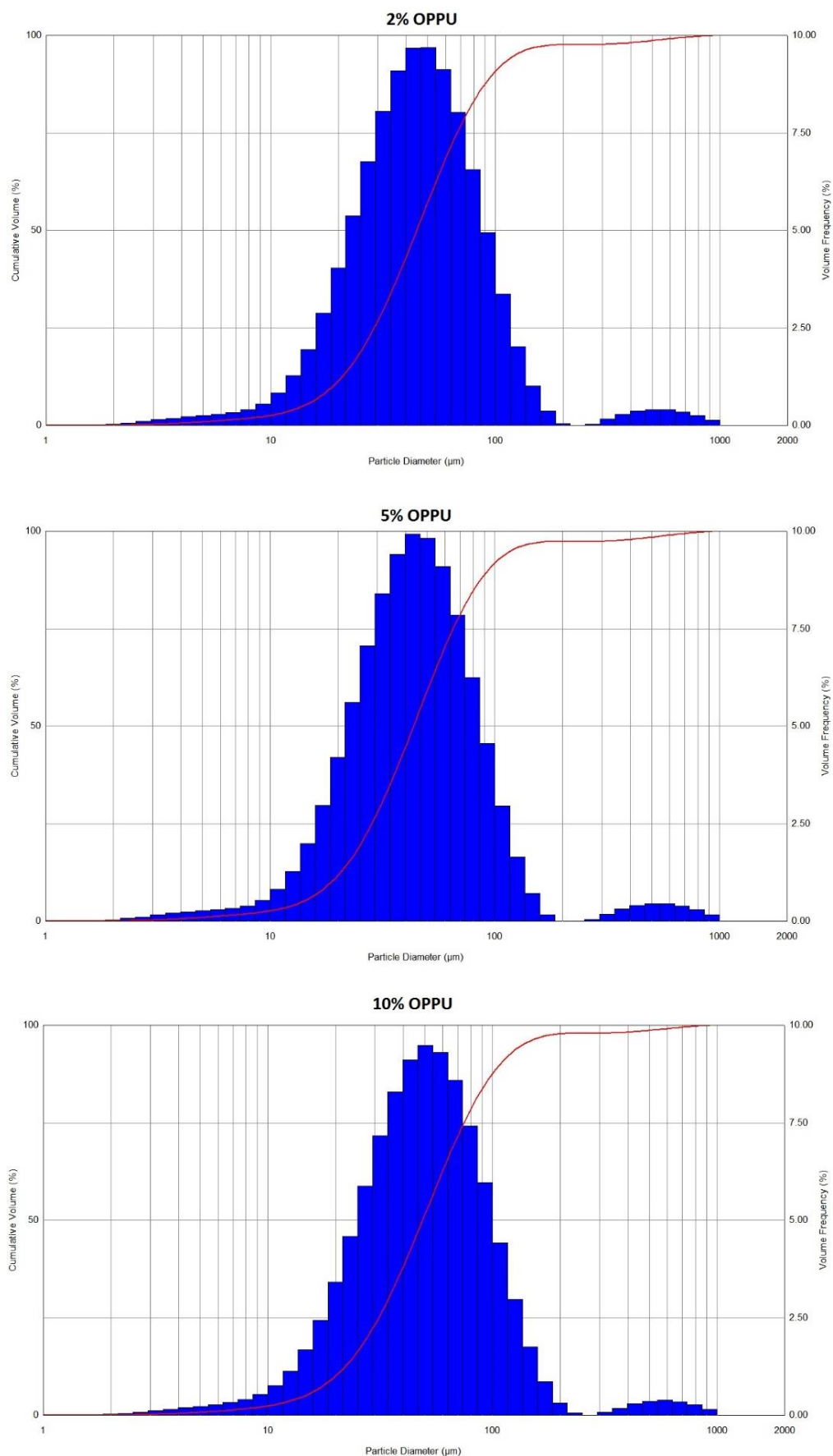
Com relação às pressões, as misturas apresentam o mesmo comportamento que mostrou o OPPU, obtendo-se o que acontece um momento onde a pressão de combustível é maior que a pressão do ar, isto acontece nos três casos para relações GLR baixas, e quase as mesmas que para o OPPU puro (Figura 7. 19, Figura 7. 21, Figura 7. 23)



(a)



(b)



(c)

Figura 7. 25. Comparação da distribuição do tamanho das partículas para diferentes composições (a) GLR=0,35; (b) GLR=0,125 e (c) GLR=0,06

Para a distribuição do tamanho de gota nas misturas, para valores altos de GLR, tem-se uma distribuição uniforme dos tamanhos das gotas, em outras palavras o jato tem muita variedade e tamanho de gota sim ter uma preponderante, e tendo para 2% de OPPU uma formação isolada de gotas pequenas enquanto para as misturas de 5% e 10% há uma formação isolada de gotas maiores (vide Figura 7. 25 e Apêndices C.3-C.5). Para uma relação GLR media, o comportamento começa a ter um tamanho de gota dominante na distribuição, comportamento que melhora com o aumento da quantidade de OPPU na mistura como se pode ver na Figura 7. 25. No caso da relação GLR menor, o tamanho de gota tem um valor dominante para todas as misturas, com a formação menor de algumas gotas grandes, este fenômeno acontece, quando a pressão do combustível é maior que a pressão do ar no injetor.

7.4 Testes no injetor efervescente

Segundo o modelo teórico o injetor efervescente utilizando a configuração projetada para trabalhar com OPPU mas utilizando água, não alcançaria o regime borbulhante, devido as propriedades do fluido, neste caso tensão superficial viscosidade e massa específica.

O regime observado no injetor efervescente com água, não foi possível identificar totalmente o régimen borbulhante, devido à velocidade dos fluidos dentro da câmara de mistura, apresentando fios alongados de ar dentro da água, sem apresentar uma separação regular entre as gotículas salientes dos furos de aeração na câmara de mistura.

Depois de testar o injetor com água, foi testado com o óleo de soja, isto foi feito devido à viscosidade do óleo de soja que apresenta maior viscosidade respeito à água e OPPU.

Tabela 7. 9 Resultados do tamanho de gota dos testes com o injetor efervescente em PMMA.

m_{ar} (g/s)	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060
m_{comb} (g/s)	0,139	0,205	0,271	0,337	0,403	0,469
GLR	0,43	0,29	0,22	0,18	0,15	0,13
P_{ar} (bar)	2	2,16	2,28	2,58	2,66	2,9
P_{comb} (bar)	2,01	2,18	2,31	2,64	2,74	2,98
D_{32} [μ m]	14,82	16,57	18,49	19,95	22,93	45,66

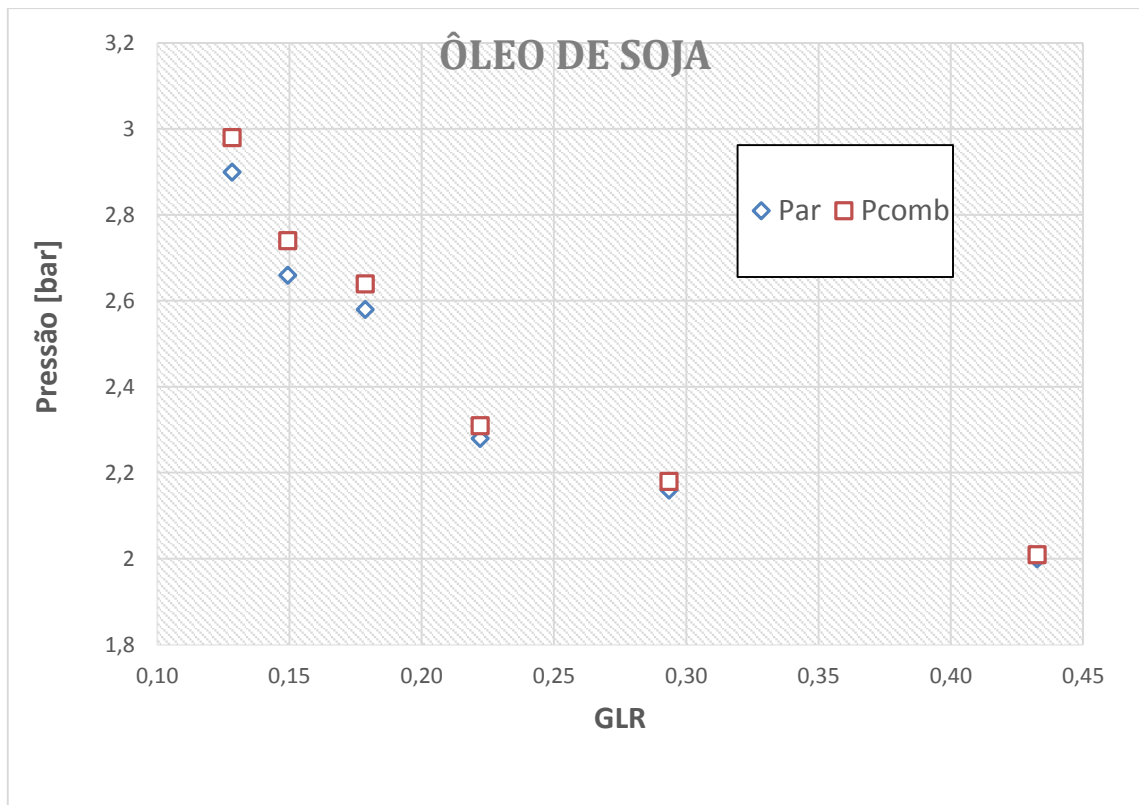


Figura 7. 26. Pressões nas linhas do injetor efervescente em acrílico com óleo de soja

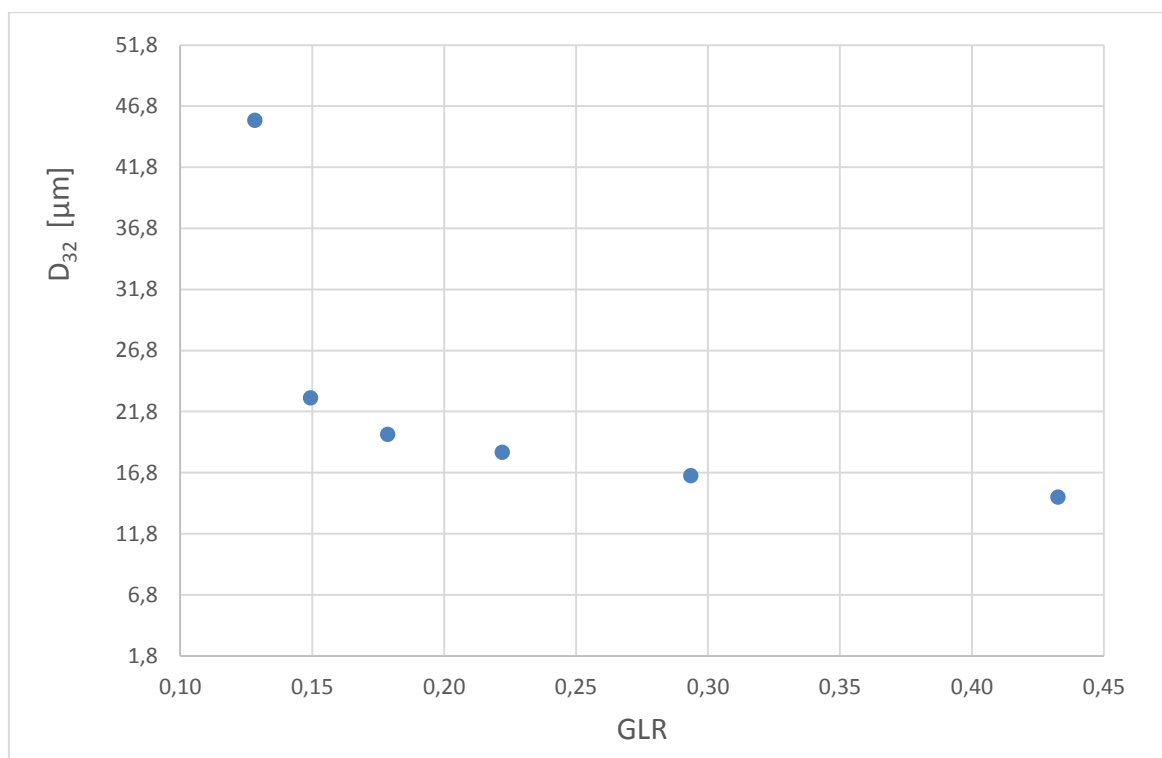
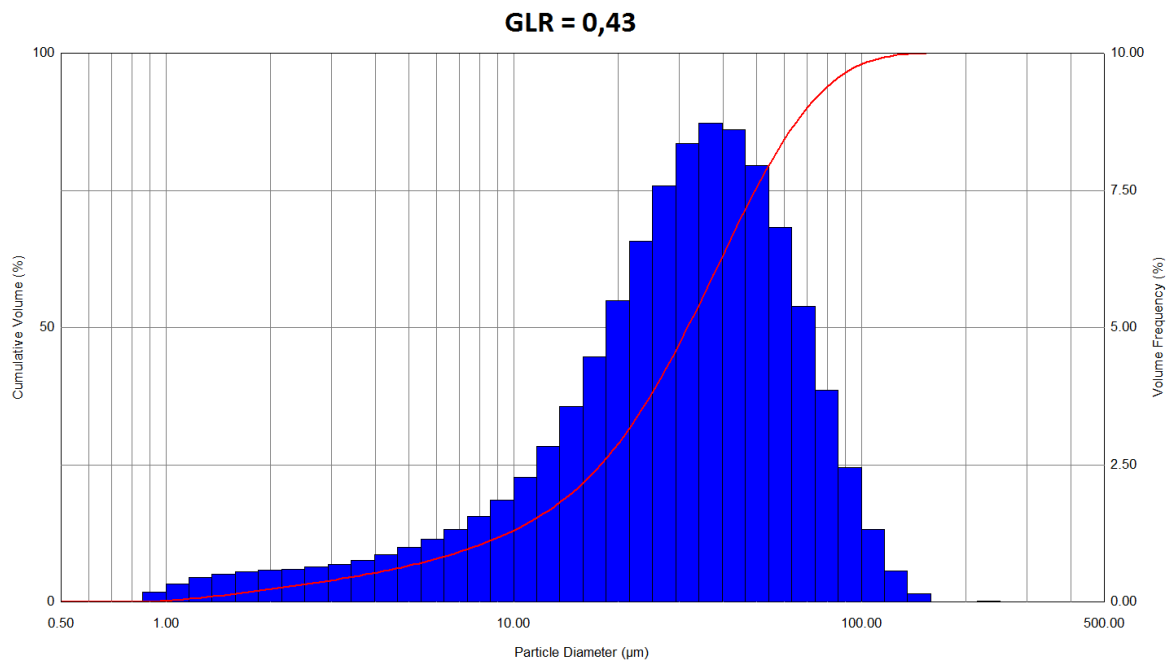
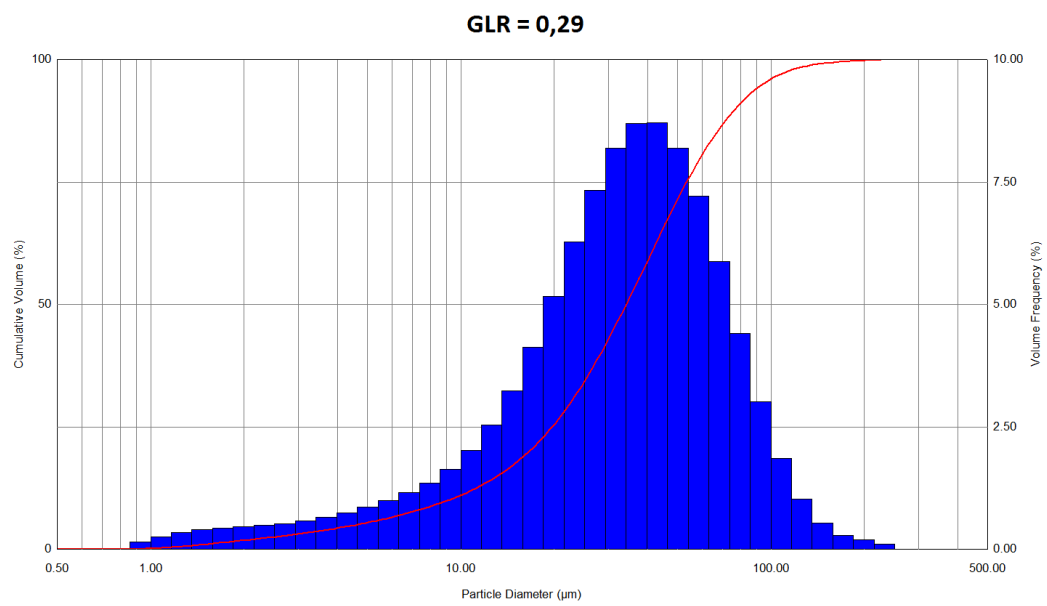


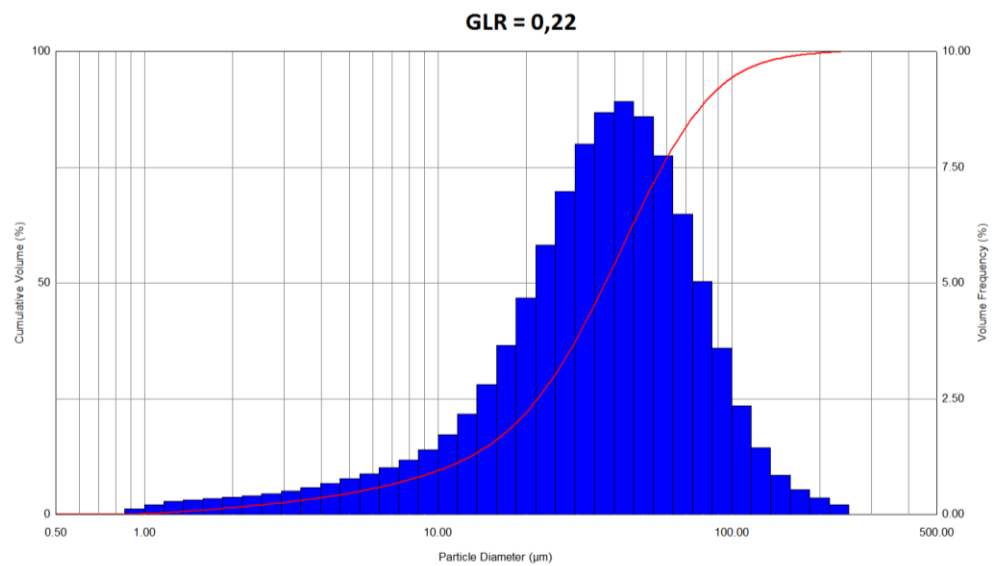
Figura 7. 27. Tamanho de gota experimental, para o injetor efervescente com óleo de soja



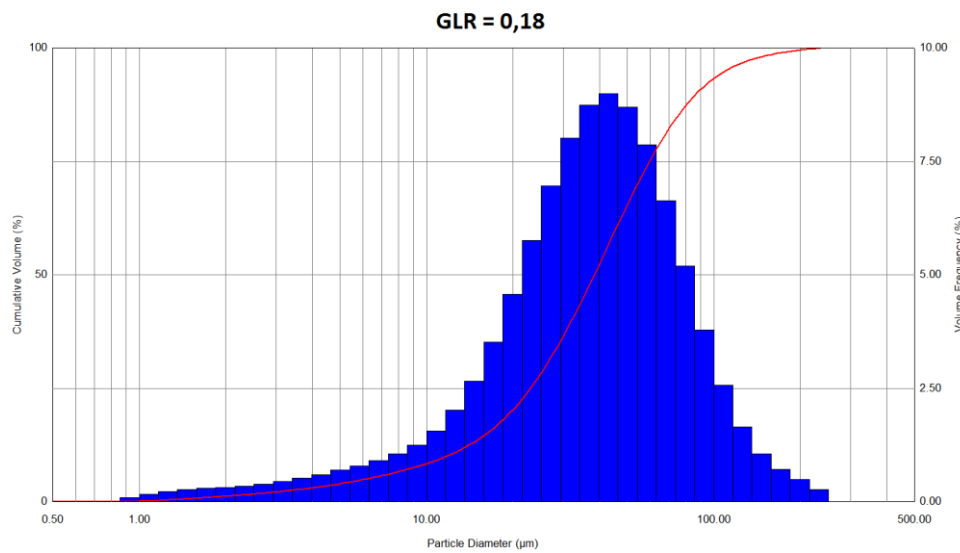
(a)



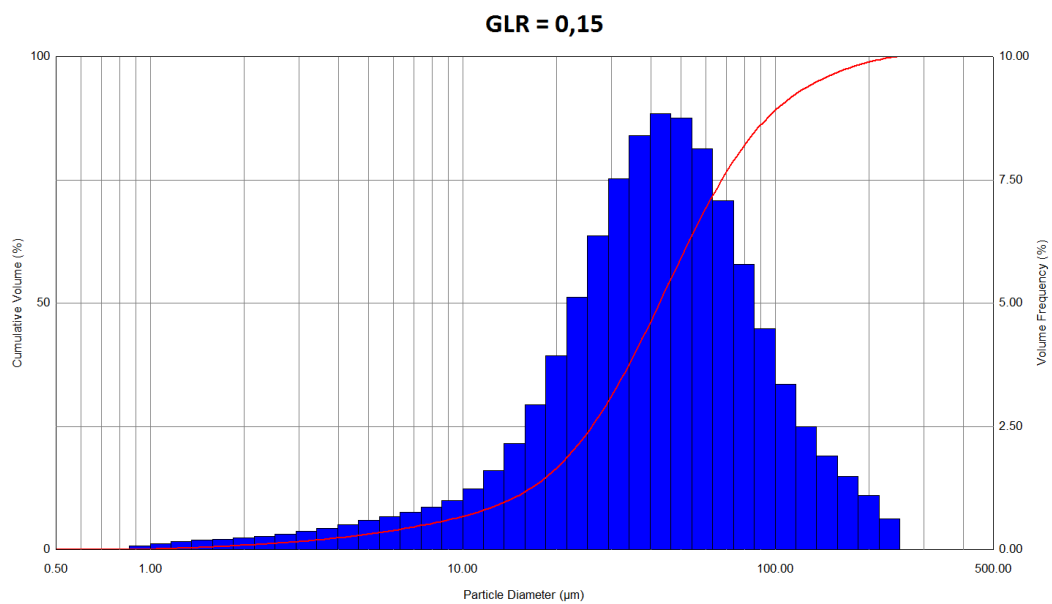
(b)



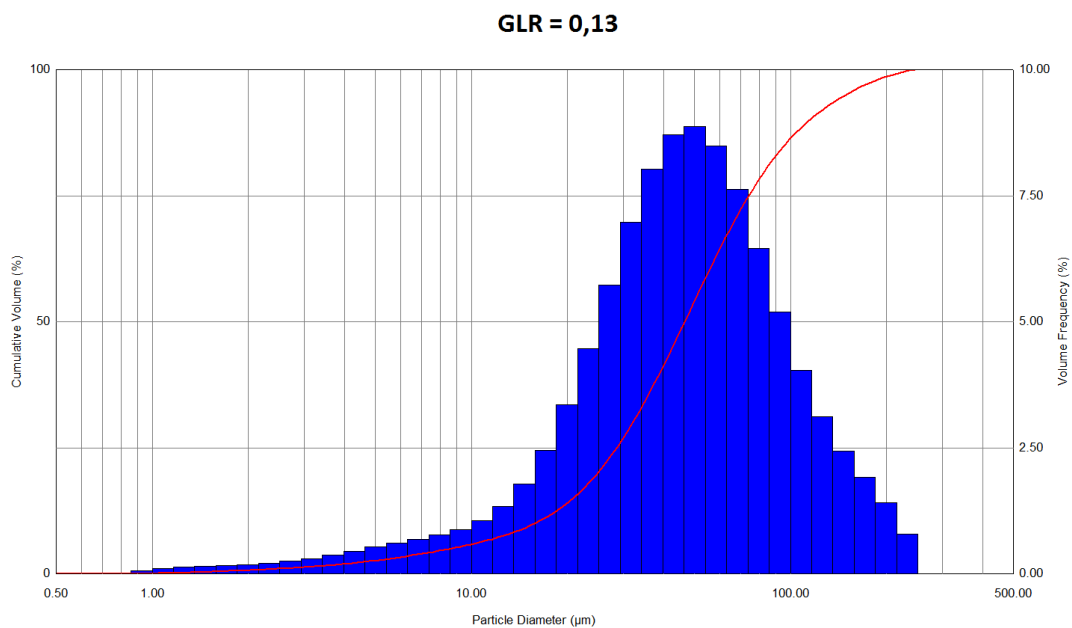
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 7. 28. Distribuição do tamanho das partículas para diferentes valores de GLR a) GLR=0,43; b) GLR=0,29; c) GLR=0,22; d) GLR=0,18 ;e) GLR=0,15 ;f) GLR=0,13.

No injetor efervescente a pressão do líquido é maior que a pressão na linha de gás, e a diferença entre as duas linhas é menor, sendo em alguns casos mínima em comparação com a diferença das pressões observadas no injetor Y. Em geral as pressões utilizadas no injetor efervescente são menores que as utilizadas no injetor Y. A distribuição do tamanho de gota no injetor efervescente nas condições testadas é mais estável que nos testes do injetor Y (vide Figura 7. 28)

Capítulo 8

CONCLUSÕES

A pesquisa desenvolvida neste trabalho consistiu na caracterização e estudo da atomização do óleo pirolítico de pneus usados (OPPU) puro e em mistura com Diesel numa bancada de ensaios de atomização construída como parte da pesquisa.

Como parte da pesquisa foi realizada uma revisão bibliográfica dos processos termoquímicos, a situação atual do descarte dos pneus no Brasil: produção e tipos de descarte com ênfases no aproveitamento energético.

Foi realizado o projeto dos injetores tipo Y e tipo Efervescente, e logo foram usinados em aço inoxidável e Polimetil-metacrilato (PMMA) segundo as metodologias encontradas e sugeridas na literatura científica, o PMMA reagiu com o OPPU, fazendo impossível o teste do injetor efervescente puro ou em misturas com o OPPU por motivo do tempo de usinagem dos injetores.

Para a realização dos testes foi construída uma bancada experimental de atomização móvel, a qual foi construída no Laboratório de Aplicações em Combustão e Gaseificação (LACG) pertencente ao Instituto de pesquisas espaciais (INPE), em Cachoeira Paulista, SP, com as características necessárias e particulares para a realização dos testes com OPPU e em geral com qualquer outro combustível ou biocombustível.

A reciclagem de pneus é um problema devido aos compostos presentes na composição destes, o volume que ocupam, a queima acidental, e também podem constituir criadouros de

mosquitos que transmitem a febre amarela, dengue chikungunya, zika, etc. Os processos permitidos para um correto descarte dos pneus usados no Brasil são o co-processamento, granulação laminada, industrialização do Xisto e a Pirólise, sendo o processo mais utilizado o co-processamento com 47% do total dos pneus e a pirolise o menos utilizado com apenas um 0,07% dos pneus usados reciclados e é realizado pela empresa brasileira, SENERGEM.

Foram levados a cabo os testes dos injetores mediante a medição do tamanho de gota do spray em cada um dos injetores, para o caso do injetor Y foi testado com água (com o injetor feito em PMMA), óleo de soja, OPPU puro e em misturas de 2% OPPU - 98% Diesel, 5% OPPU - 95% Diesel e 10% OPPU - 90% Diesel (com o injetor feito em aço). Para o caso do injetor efervescente só foi testado com óleo de soja.

No teste do OPPU puro e em misturas se observou um fenômeno interessante que acontecia quando o valor de GLR atingia um valor aproximado de 0,06, em todos os casos acontecia um intercambio nas posições dos valores das pressões do líquido e gás. Para valores maiores a este ponto a pressão do ar é maior que a pressão do combustível, mas para valores menores de GLR, a pressão do ar fica menor que a pressão do combustível (devido ao aumento da quantidade do combustível) e neste ponto acontece que o tamanho de gota determinado experimentalmente diminui até um valor próximo ao valor teórico, sendo para valores maiores de GLR sempre maior o valor experimental do valor teórico calculado com a equação de Wigg. Além destes dois fenômenos, acontece outra consequência com a distribuição do tamanho de gota, o tamanho de gota para valores menores a 0,06 tem uma melhor concentração dos tamanhos de gotas em um valor só (tamanho de gota uniforme), embora sendo o tamanho de gota maior.

No caso do injetor efervescente testado com óleo de soja, os melhores resultados foram obtidos para valores da GLR acima de 0,15, a distribuição do tamanho é mais uniforme, mas similar enquanto à distribuição obtida com o injetor Y. A diferencia com o injetor Y, está nas pressões dos fluidos, as quais não apresentam as diferenças que existe no injetor Y e são ao contrário similares.

Para realizar o projeto dos injetores foi necessário a realização da caracterização dos líquidos que foram testados nos injetores, desta maneira, para cada um dos líquidos utilizados nos testes foram medidas as suas principais propriedades, como são, composição química, poder calorífico, massa específica, viscosidade e tensão superficial. As 3 últimas foram as mais

importantes para realização do projeto dos injetores e a predição do tamanho de gota no caso do injetor Y.

Os injetores desenvolvidos são de elevada potência térmica, no caso do injetor Y, uma potência menor resulta em dutos muito pequenos, o que faz difícil a usinagem e favorece o entupimento nos dutos fazendo necessário algum tipo de filtrado para o caso de combustíveis com partículas ou aquecimento para o caso de combustíveis muito viscosos.

Em geral os tamanhos de gota utilizando o D_{32} em todos os testes foram menores a $45\ \mu\text{m}$ sendo considerada por tanto uma atomização eficiente, onde os melhores resultados obtidos com o óleo de soja, e menor nas misturas de OPPU-diesel que com OPPU puro. Com os valores de D_{MMD} , só foram obtidos valores maiores a $60\ \mu\text{m}$ em 4 pontos, onde 3 de estes valores estão na faixa onde a pressão do combustível excede a pressão do gás atomizador.

A bancada de atomização está 90% finalizada e o próximo passo é a obtenção da patente devido a particularidade do equipamento. Assim esta bancada permitiria realizar testes com outras misturas além do diesel, como por exemplo biodiesel mas as condições de projeto dos injetores foram para as características do OPPU.

Na maior parte dos testes, o modelo matemático para a predição do tamanho de gota é próximo aos dados experimentais. Finalmente os produtos desta dissertação de mestrado são: Bancada experimental de atomização para combustíveis renováveis e não renováveis, 01 injetor Y em aço inox e acrílico, 01 injetor efervescente em acrílico.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Simulação dinâmica fluido computacional do escoamento bifásico nos injetores construídos.
- É possível a adição de uma linha de filtragem para o combustível além de um aquecedor para o uso de outros combustíveis e misturas, baixo outras condições de temperatura.
- Poderá ser construída uma câmara de combustão para a potência atingida pelos injetores e fazer testes de combustão. Para isto será necessário adicionar uma linha de ar de combustão

para controlar a quantidade de ar a ser utilizado, para isto também pode se usar o injetor efervescente com câmara de refrigeração.

- Construção de um injetor efervescente em aço inox.
- Para o teste do injetor efervescente, este pode ser projetado em três partes, para poder modificar o diâmetro da câmara, o tamanho dos furos de aeração com o espalhamento entre eles e por último o orifício de saída deste injetor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Araújo Costa, F., & da Silva, R. (2005). Pneus inservíveis: análise das leis ambientais vigentes e processos de destinação final adequados. *XXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, (pp. 5227-5234). Porto Alegre. Fonte:
http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2005_Enegep1004_1123.pdf
- Lacava Teixeira, P., & Martins Aparecida, C. (2010). *Métodos experimentais de análise aplicados à combustão*. Papel Brasil.
- Quaak, P., Knoef, H., & Stassen, H. (1999). *Energy form biomass, A Review of combustion and gasification technologies*. Washington: The World Bank.
- Scagliusi, S. R. (2011). *Reciclagem de Pneus Inservíveis Alternativa Sustentável à Preservação do Meio Ambiente*. Acesso em 26 de May de 2014, disponível em Faculdade Fundetec:
http://faculdadefundetec.com.br/img/revista_academica/pdf/artigo_sandra_scagliuse.pdf
- Agência Nacional do Petróleo, gás natural e biocombustíveis. (2016). *RESOLUÇÃO ANP Nº 50, DE 23.12.2013*. Acesso em 06 de 05 de 2016, disponível em ANP :
http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2013/dezembro/ranp%2050%20-%202013.xml
- Andrietta, A. J. (2002). Pneus e medio Ambiente: Um grande problema requer uma grande solução. Fonte: <http://www.reciclarepreciso.hpg.ig.com.br/recipneus.htm>
- ANIP. (2013). *ANIP*. (Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos) Acesso em 9 de May de 2014, disponível em <http://www.anip.com.br/>:
http://www.anip.com.br/index.php?cont=conteudo&area=32&titulo_pagina=Produ%E7%E3o
- ANIP. (2013). *Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos*. Acesso em 28 de May de 2014, disponível em
http://www.anip.com.br/?cont=conteudo&area=32&titulo_pagina=Produ%E7%E3o
- António, N. N. (2007). *Estudo dos mecanismos de despolimerização térmica do Poli(metacrilato de metilo), escolha de solventes compatíveis com PMMA*. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Química, Instituto Superior Técnico Universidade Técnica de Lisboa. Fonte:
<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137437426/Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>

- Antoniou, N., & Zabaniotou, A. (2013). Features of an efficient and environmentally attractive used tyres pyrolysis with energy and material recovery. *Renewable and sustainable Energy reviews*, 539-558.
- Apaza, R. (2011). *Desenvolvimento de um Injetor Centrífugo Dual para Biocombustíveis Líquidos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Combustão e Propulsão, INPE, São José dos Campos.
- Associação Brasileira de Cimento Portland. (2014). *abcp*. Acesso em 26 de May de 2014, disponível em Associação Brasileira de Cimento portland: <http://coprocessamento.org.br/estatisticas>
- Aydin, H., & İlkiliç, C. (2012). Optimization of fuel production from waste vehicle tires by pyrolysis and resembling to diesel fuel by various desulfurization methods. *Fuel*, 102, 605-612.
- Banar, M., Akyildiz, V., Özkan, A., Çokaygil, Z., & Onay, Ö. (2012). Characterization of pyrolytic oil obtained from pyrolysis of TDF (Tire Derived Fuel). *Energy Conversion and Management*, 62, 22-30.
- Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory*. Elsevier.
- Baukal, C., & Schwartz, R. (Eds.). (2001). *The John Zink Combustion Handbook*. CRC Press.
- Baxter, L., Jenkins, B., & Winter, F. (1995). *Baseline Nox Emissions during Combustion of Wood derived Pyrolysis Oils*. Reporte, Sandia National Laboratories Technical Library, Albuquerque.
- Beér, J., & Chigier, N. (1983). *Combustion Aerodynamics*. Malabar: Robert E. Krieger Publishing Company .
- Carvalho, J. A., & Queiroz, M. M. (2007). *Princípios de Combustão Aplicada*. Florianópolis: Editora da UFSC.
- Çengel, Y., & Boles, M. (2009). *Termodinâmica* (6ª ed.). The McGraw-Hill/Interamericana.
- Chen, D., Yin, L., Wang, H., & He, P. (2014). Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. *Waste Management*, 34, pp. 2466-2486.
- Chigier, N. (1976). The atomization and burning of liquid fuel Sprays. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2, 97-114.
- Chin, J., & Lefebvre, A. (1993). A Design Procedure for efervescent atomizers. *International Ge Congress and expositionas Turbine and Aeroengin*. Cincinnati.
- Coronado R., C. (2016). *Estudo da Atomização e caracterização de injetores utilizando óleo pirolítico de pneus usados e em misturas com diesel convencional e/ou biodiesel de óleo de soja*. Universidade federal de Itajubá.
- Crocker, M. (Ed.). (2010). *Thermochemical Conversion of Biomass to Liquid Fuels and Chemicals*. RSC Publishing.
- de Lacerda P., L. (2001). *Pneus descartados no Brasil - Subsídios para uma reflexão sobre o problema na Bahia*. Monografia, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia.

- de Oliveira, O. J., & de Castro, R. (2007). *Estudo da destinação e da reciclagem de pneus inservíveis no Brasil*. Acesso em 15 de May de 2014, disponível em Abepro: http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2007_tr650481_0291.pdf
- Engvall, K., Liliedahl, T., & Dahlquist, E. (2013). *Technologies for Converting Biomass to Useful Energy, Combustion, gasification, pyrolysis torrefaction and fermentation*. (E. Dahlquist, Ed.) CRC Press.
- EPA. (14 de 04 de 2015). *Overview of Greenhouse Gases*. Fonte: <http://www.epa.gov/climatechange/ghgemissions/gases/co2.html>
- ETRMA. (2011). *End of life tyres*. Acesso em 8 de May de 2014, disponível em <http://www.etrma.org/>: <http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/brochure-elt-2011-final.pdf>
- ETRMA. (2013). *Sustainable? ETRMA Annual Report 2012-2013*. Acesso em 15 de May de 2014, disponível em http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/etrma_annualreport-2012-2013.pdf
- Galvagno, S., Casu, S., Casabianca, T., Calabrese, A., & Cornacchia, G. (2002). Pyrolysis process for the treatment of scrap tyres: preliminary experimental results. *Waste management*, 22, 917-923.
- Garcia, R. (2013). *Combustíveis e Combustão Industrial* (2ª ed.). Rio de Janeiro: Editora Interciência.
- Gebara, D. (2006). *Desempenho de um reator aeróbio de leito fluidizado no tratamento de esgoto sanitário*. Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Gonçalves, C. (2013). *Desenvolvimento de um sistema compacto de combustão sem chama visível utilizando um injetor blurry para queima de biocombustíveis*. Tese de doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Combustão e Propulsão, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- Graziadio, M. (1987). Atomization of Coal-Water fuels by pneumatic internal mixing nozzle, Part I- Two-phase flow inside the nozzle. *atomization and Spray Technology*, 3, 187-208.
- Green, D., & Perry, R. (2008). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (8ª ed.). McGraw-Hill Companies,.
- Gurjar, B., Molina, L., & Ojha, C. (2010). *Air Pollution Health and Environmental Impacts*. Boca Raton: CRC Press.
- Hall, D. (1991). Biomass Energy. *Energy Policy*(37), pp. 711-737.
- Harker, J. H., & Backhurst, J. R. (1981). *Fuel and Energy*. London: Academic Press.
- Hester, R. E., & Harrison, R. M. (Eds.). (2013). *Waste as a Resource*. Cambridge: The Royal Society of Chemistry.
- Higman, C., & Van der Burgt, M. (2008). *Gasification* (2ª ed.). Gulf Professional Publishing.

- IBAMA. (2013). *Relatório de Pneumáticos 2013 - Resolução CONAMA n° 416/09*. Ministério do Meio Ambiente.
- Islam, M., Haniu, H., & Beg, M. (2008). Liquid fuels and chemicals from pyrolysis of motorcycle tire waste: Product yields, compositions and related properties. *Fuel*, 87, 3112-3122.
- Jedelsky, J., Jicha, M., Jaroslav, S., & Otahal, J. (2009). Development of an effervescent atomizer for industrial burners. *Energy & Fuels*, 23, 6121-6130.
- Kirubakaran, V., Sivaramakrishnan, V., Nalini, R., Sekar, T., Premalatha, M., & Subramanian, P. (2009). A review on gasification of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(13), pp. 179-186.
- Kuo, K. (2005). *Principles of Combustion* (2ª ed.). Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Laborne M., L. M., Monteiro, M. A., Ferreira, R. H., & Salgado Penido, R. C. (2009). *Gerenciamento integrado de resíduos Pneumáticos*. Fundação Estadual do Meio Ambiente(FEAM), Belo Horizonte. Fonte: http://www.feam.br/images/stories/minas_sem_lixoes/2010/pneus.pdf
- Lacava, P., Carvalho, J., & McQuay, M. (1998). Metodología para el diseño de atomizadores de tipo "Y". 9(6), 283-288.
- Lacava, P., Pimenta, A., & Carvalho, J. A. (2004). Atomizador tipo "Y-Jet" - projeto, Características do Spray e combustão. *Proceedings of the 10° Brazilian Congress of thermal Sciences and Engineering - ENCIT 2004*. Rio de Janeiro.
- Lackner, M., Palotás, Á., & Winter, F. (2013). *Combustion From Basics to Applications*. Wiley-VCH.
- Lamas de Queiroz, W., Palau Fortes, J., & de Camargo, J. (Maio de 2013). Waste materials co-processing in cement industry: Ecological efficiency of waste reuse. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 200-207.
- Lefebvre, A. (1989). *Atomization and Sprays*. Taylor & Francis.
- Lehto, J. (2007). *Development and Characterization of test Reactor with Results of Its Application to Pyrolysis Kinetics of Peat and Biomass Fuels*. Tese para obtenção do grau de Doutor em Tecnologia, Tampere University of Technology.
- Leung, D. C., Yin, X. L., Zhao, Z. L., Xu, B. Y., & Chen, Y. (2002). Pyrolysis of tire powder: influence of operation variables on the composition and yields of gaseous product. *Fuel Processing Technology*, 141-155.
- Li, S.-Q., Yao, Q., Chi, Y., Yan, J.-H., & Cen, K.-F. (2004). Pilot-scale pyrolysis of scrap tires in a continuous rotary kiln reactor. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 43, 5133-5145. doi:10.1021/ie030115m
- Liu, H. (2000). *Science and Engineering of Dropets*. Noyes Publications.
- Malvern Instruments. (2007). *Spraytec User manual*. Malvern Instruments, Malvern. Fonte: <http://www.malvern.com/Assets/Spraytec-user-manual-English-MAN0368-3-0.pdf>

- Marshall, A. (2013). *Commercial Application of Pyrolysis Technology in Agriculture*. Ontario Federation of Agriculture. Fonte: <http://www.ofa.on.ca/uploads/userfiles/files/pyrolysis%20report%20final.pdf>
- Martínez, J. D., Lapuerta, M., García-Contreras, R., Murillo, R., & García, T. (2013). Fuel properties of tire pyrolysis liquid and blends with diesel fuel. *Energy&Fuels*, 27, 3296-3305.
- Martínez, J. D., Murillo, R., García, T., & Arauzo, I. (2014). Thermodynamic analysis for syngas production from volatiles released in waste tire pyrolysis. *Energy and Conversion and Management*, 338-353.
- Martínez, J. D., Puy, N., Murillo, R., García, T., Navarro, M. V., & Mastral, A. M. (2013). Waste tyre Pyrolysis- A review. *Renewable and Sustainable*(23), 179-213.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2013). *Princípios de termodinâmica para engenharia* (7 Edição ed.). Rio de Janeiro: Jon wiley & Sons.
- Mullinger, P., & Chigier, N. (1974). The design and performance of internal mixing multijet twin fluid atomizers. *Journal of the institute of fuel*, 47, pp. 251 - 261.
- Murugan, S., Ramaswamy, M., & Nagarajan, G. (2008). The use of tyre pyrolysis oil in diesel engines. *Waste Management*, 28, 2743-2749.
- Murugan, S., Ramaswamy, M., & Nagarajan, G. (2009). Assessment of pyrolysis oil as an energy source for diesel engines. *Fuel Processing Technology* , 90, 67-74.
- Nicolini, J. (2011). *Avaliação do impacto ambiental de solos de área experimental da Embrapa Clima Temperado onde foram aplicados subprodutos do xisto da Petrobras-SIX como condicionadores de solo*. Tese apresentada para obtenção do grau de Doutor em Química, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- NNFCC. (2009). *Review of Technologies for Gasification of Biomass and Wastes*. Final Report, The Bioeconomy Consultants. Fonte: <http://www.ecolateral.org/gasificationnnf090609.pdf>
- Nsafu, F., Görgens, J., & Knoetze, J. (2013). Comparison of combustion and pyrolysis for energy generation in a sugarcane mills. *Energy Conversion and Management*, 74, pp. 524-534.
- Oosthuizen, P., & Carcscallen, W. (2014). *Introduction to Compressible Fluid Flow* (2ª ed.). (C. Press, Ed.)
- Paradela Ramos, F. M. (2012). *Estudo da pirolis de misturas de resíduos de plásticos, pneus e biomassa*. Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Química e Bioquímica, Universidade Nova de Lisboa.
- Parra V., C., do Nascimento B., A., & Ferreira L., M. (2010). *Reutilização e reciclagem de Pneus, e os problemas causados por sua destinação incorreta*. Universidade do Vale do Paraíba. XIV Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e X Encontro Latino Americano de Pós-Graduação.
- Pereira, E. G., da Silva, N. J., de Oliveira, J. L., & Machado, C. (2012). Sustainable Energy: A review of gasification technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(16), pp. 4753-4762.

- Pessoa de Lacerda, L. (2001). *Pneus descartados no Brasil - Subsídios para uma reflexão sobre o problema na Bahia*. Monografia, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia.
- PETROBRAS. (2009). *11 milhões de pneus reaproveitados*. Acesso em 25 de May de 2014, disponível em Programa Petrobras Ambiental : <http://sites.petrobras.com.br/minisite/ambiental/noticias/11-milhoes-de-pneus-reaproveitados/>
- Qian, L., & Lin, J. (2011). Modeling on effervescent atomization: A review. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 54(12), 2109-2129.
- Quispe, C. A. (2013). *Investigação de injetores tipo Y e efervescentes para atomização da mistura de Glicerina e Etanol*. Tese apresentada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.
- Quispe, C. A., Carvalho, J. A., & Costa, F. S. (2011). Análise do Escoamento em Regime Subsônico e Influência no Diâmetro Médio das Gotas para Injetores de Mistura Interna Tipo Y. *10º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica*. Porto.
- Reciclanip. (2013). *Reciclanip*. (ANIP) Acesso em 9 de May de 2014, disponível em <http://www.reciclanip.org.br/v3/>
- Resende Lima , E. (2004). *Canal de Distribuição Reverso na Reciclagem de Pneus: Estudo de Caso*. Disertación de Maestría, Pontificia Universidade Católica Do Rio de Janeiro.
- Rezaiyan, J., & Cheremisinoff, N. P. (2005). *Gasification Technologies A primer for Engineers and Scientists*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Ringer, M., Putsche, V., & Scahill, J. (2006). *Large-Scale Pyrolysis production: A Technology Assessment and Economic Analysis*. Relatório técnico, National Renewable Energy Laboratory.
- Roy, C., Chaala, A., & Darmstadt, H. (1999). The vacuum pyrolysis of used tires end-uses for oil and carbon black products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 51, 201-221.
- Scatolim Rombaldo, C. F. (2008). *Síntese de Carvão Ativado e Óleo Combustível a Partir da Borracha de Pneu Usado*. Disertación de Maestría, Universidade Estadual Campinas, Campinas.
- Schaschke, C. (2014). *A Dictionary of Chemical Engineering*. Oxford: Oxford University Press.
- Senado federal. (2014). *Constituição Federal da República Federativa do Brasil*. Acesso em 15 de May de 2014, disponível em http://www.senado.gov.br/legislacao/const/con1988/CON1988_11.02.2014/art_225_.shtm
- SENERGEM. (2011). Acesso em 03 de June de 2014, disponível em Senergen-Energia Renovável: <http://www.senergen.com.br/reator-cbt.aspx>
- Shrestha, G., Traina , S., & Swanston, C. (s.d.). Black Carbon's Properties and Role in the Environment: A Comprehensive Review. *Sustainability*(2), 294-320.
- Siva, M., Onenc, S., Uçar, S., & Yanik, J. (2013). Influence of oily wastes on the pyrolysis of scrap tire. *Energy Conversión and Management*, 75, 474-481.

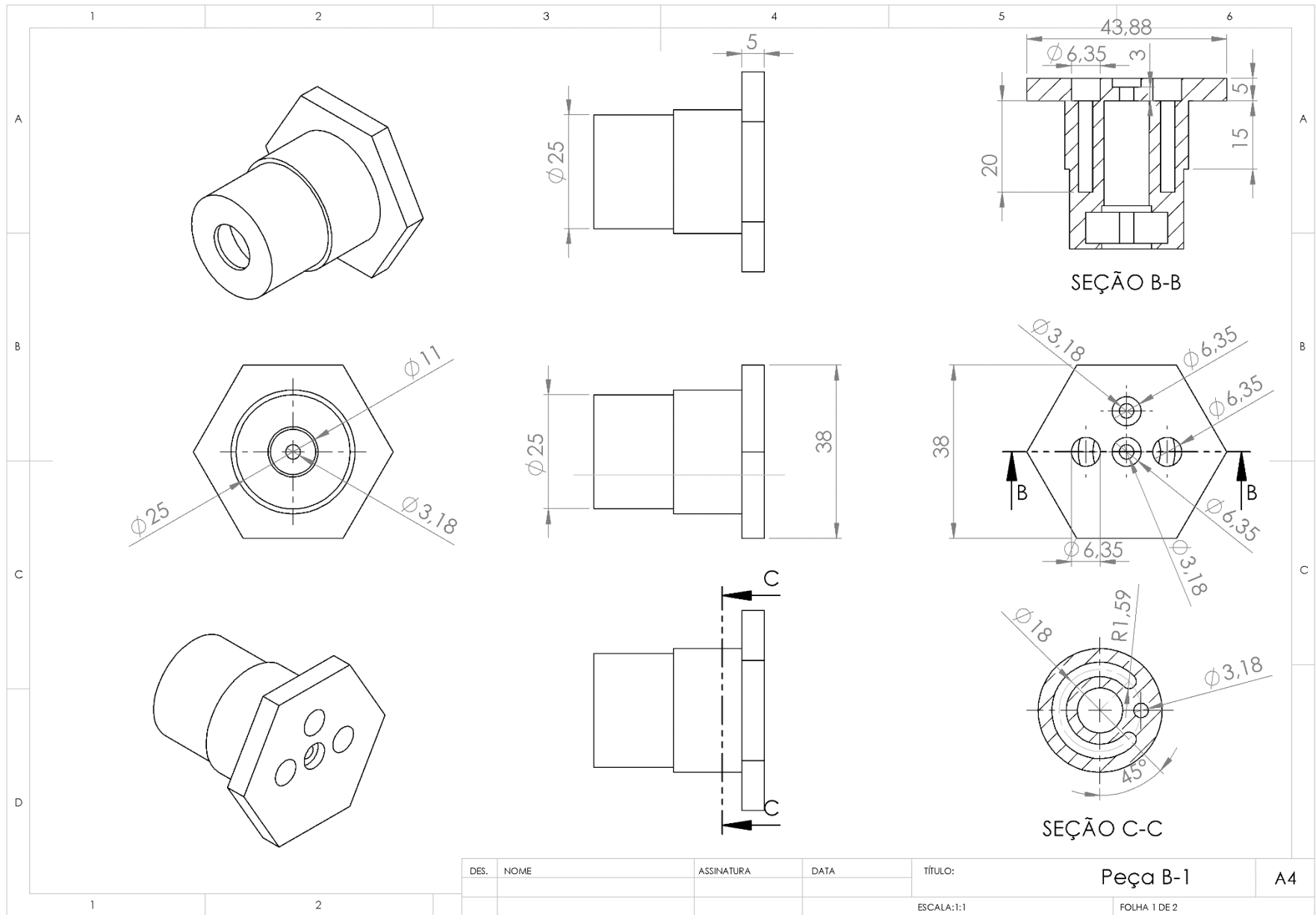
- Smith, P., & Scott, J. (2005). *Dictionary of water and waste management*. Elsevier Butterworth-Heinemann & IWA Publishing.
- Song, S., & Lee, S. (1996). Study of atomization mechanism of gas/liquid mixtures flowing through Y-Jet atomizers. *Atomization and Sprays*, 6, pp. 193 - 209.
- Sovani, S., Sojka, P., & Lefebvre, A. (2001). Effervescent atomization. *Progress in Energy and Combustion Science*, 27, 483-521.
- The Goodyear Tire & Rubber Company. (2014). Acesso em 13 de October de 2014, disponível em <http://www.goodyear.com.br/pneus-carro/conservando-pneu/lendo-pneu/>
- Turns, S. R. (2013). *Introdução à Combustão Conceitos e aplicações* (3ª ed.). Porto Alegre: McGraw-Hill.
- Ultra Plas. (2016). *acrilico-y-policarbonato.com*. Acesso em 26 de Março de 2016, disponível em <http://www.acrilico-y-policarbonato.com/acrilico-propiedades.html>
- Undri, A., Meini, S., Rosi, L., Frediani, M., & Frediani, P. (2013). Microwave pyrolysis of polymeric materials: Waste tires treatment and characterization of the value-added products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 103, 149-158.
- Warnatz, J., Maas, U., & Dibble, R. (2006). *Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation* (Quarta ed.). Berlin: Springer.
- Williams, P. (2013). Pyrolysis of waste tyres: A review. *Waste management*(33), 1714-1728.
- Williams, P. T., Bottrill, R., & Cunliffe, A. (November de 1998). Combustion of tyre pyrolysis oil. *Trans IChemE*, 76, 291-301.
- Wissmiller, D. (2009). *Pyrolysis oil combustion characteristics and exhaust emissions in a swirl-stabilized flame*. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy, Iowa state University, Ames. Fonte: <http://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1923&context=etd>
- Wojtkowiak, J., & Popiel, C. (Setembro de 1996). Viscosity correction factor for rotameter. *Journal of fluids engineering*, 118, 569 - 573.
- Zajec, L. (2009). *Slow pyrolysis in a rotary kiln reactor: Optimization and experiment*. Master's Thesis, School for Renewable Energy Science, Akureyri.
- Zhou, Y., Zhang, M., Yu, J., Zhu, X., & Peng, J. (2010). Experimental investigation and model improvement on the atomization performance of sinle-hole Y-jet nozzle with high liquid flow rate. *Powder Technology*, 199, pp. 248-255.
- Zucrow, M., & Hoffman, J. (1976). *Gas dynamics* (Vol. I). John Wiley & Sons, Inc.

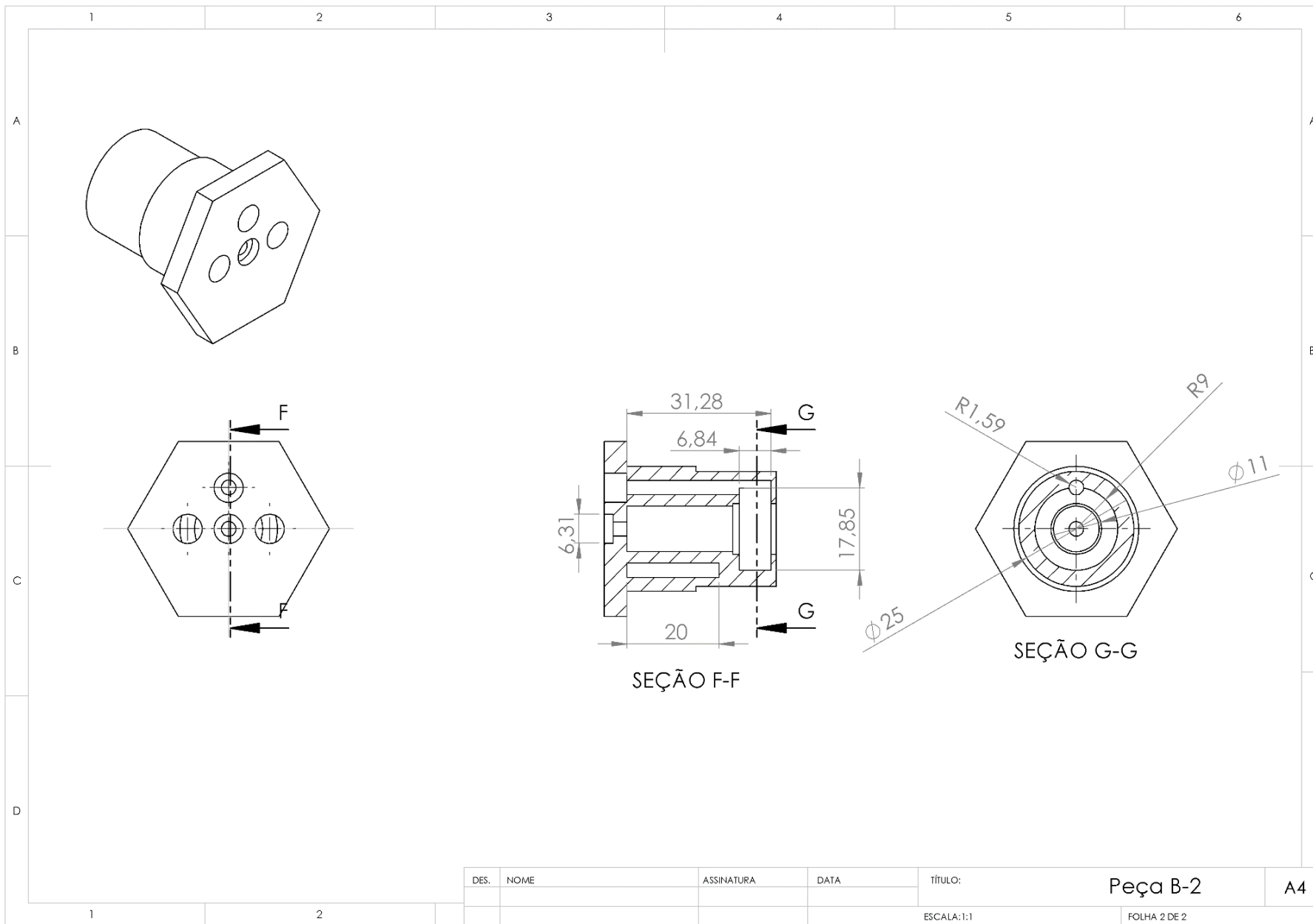
APÊNDICES

A. PLANOS DE CONSTRUÇÃO DOS INJETORES

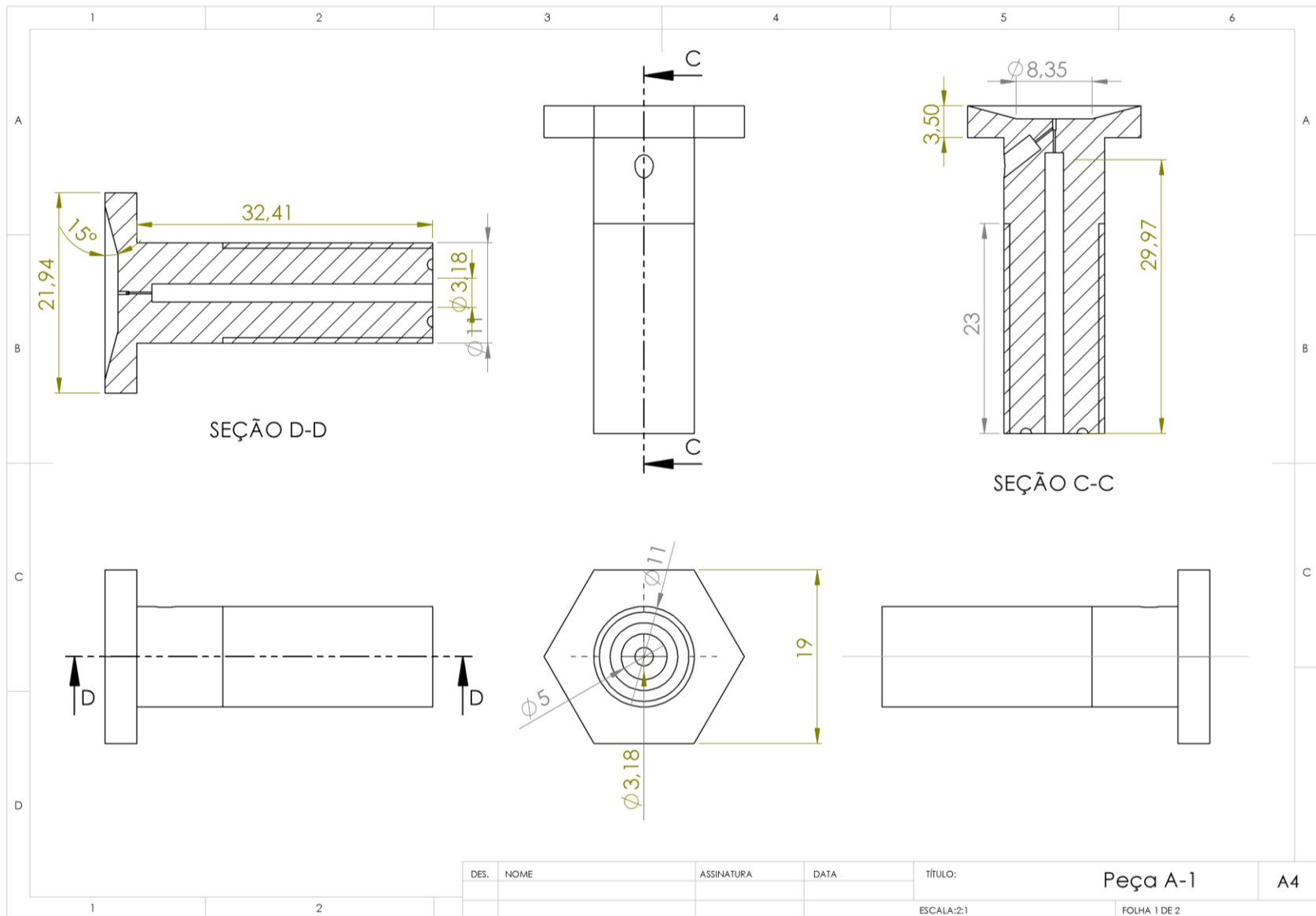
Nesta parte do Apêndice, são mostrados os planos utilizados para a fabricação dos injetores

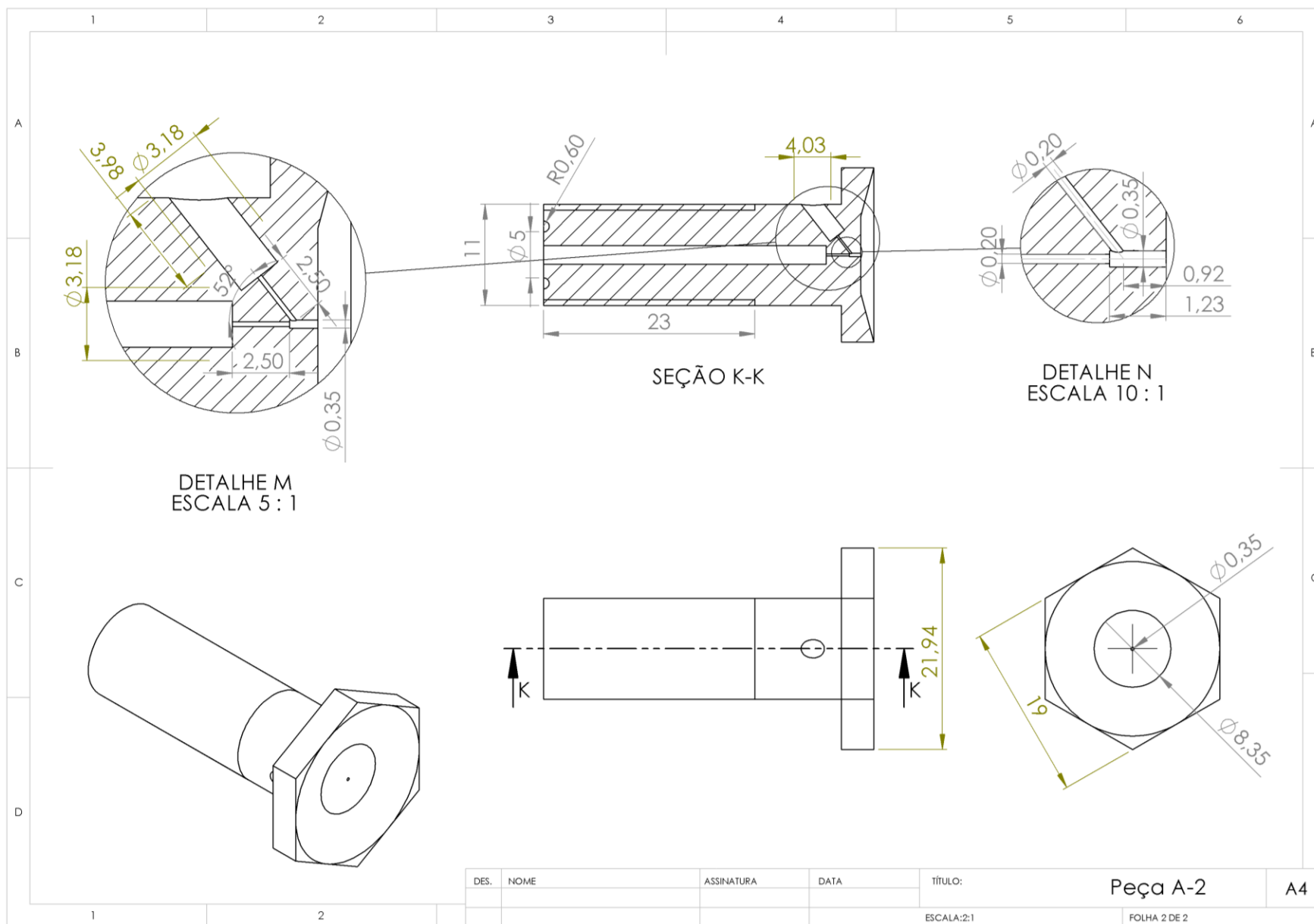
A.1 Carcaça para os injetores Y de 7 kW e 35 kW



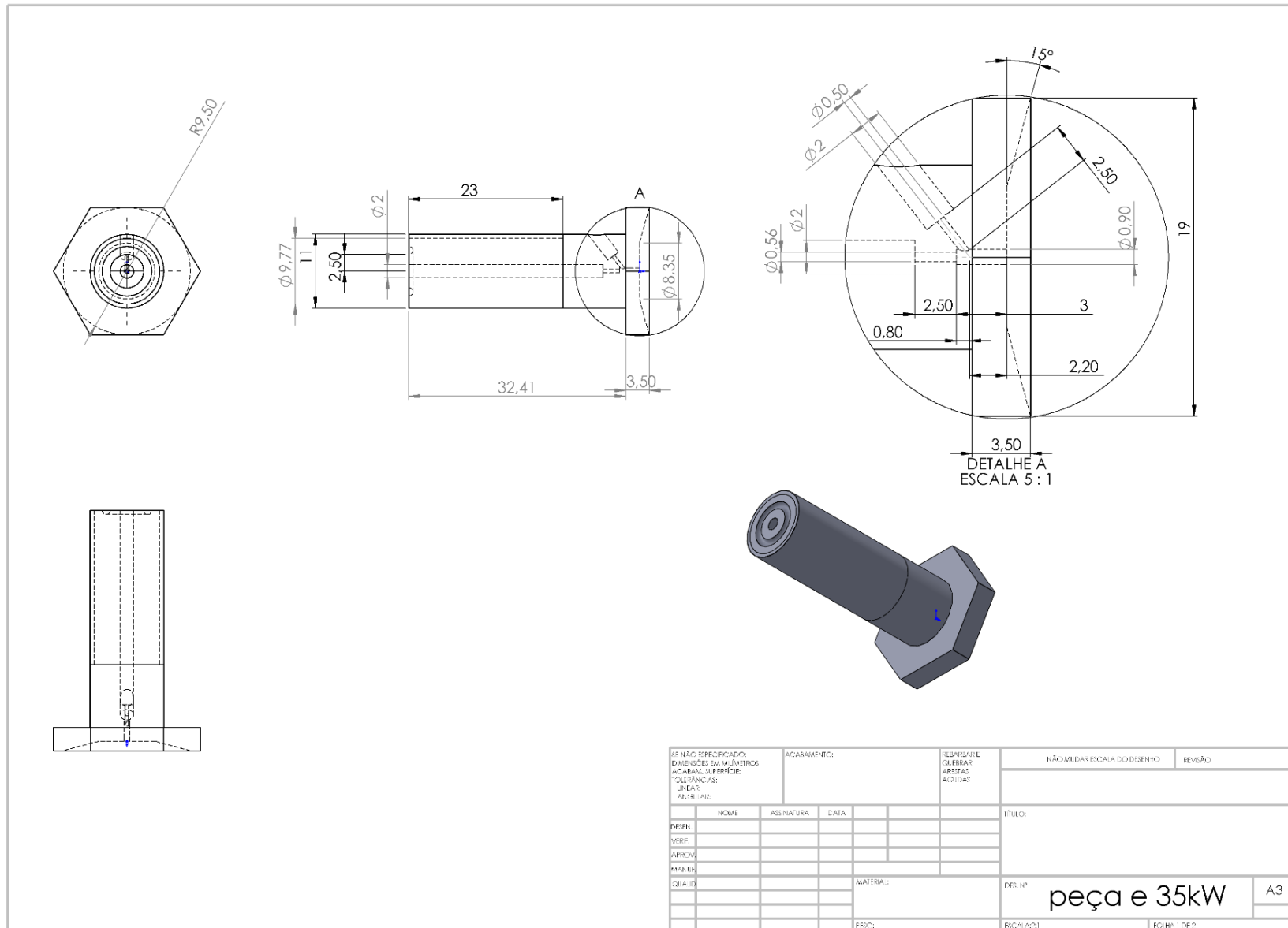


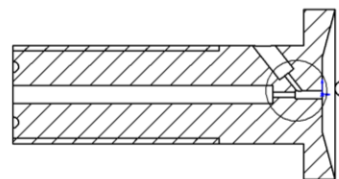
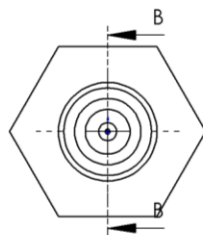
A.2 Bico do injetor de 7 kW



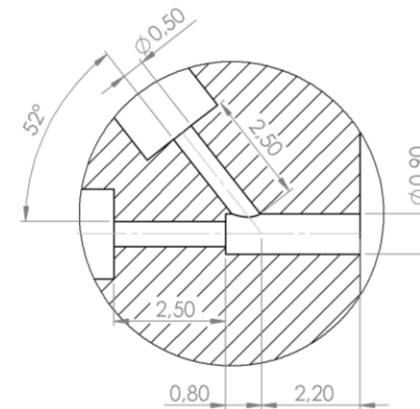


A.3 Bico do injetor de 35 Kw

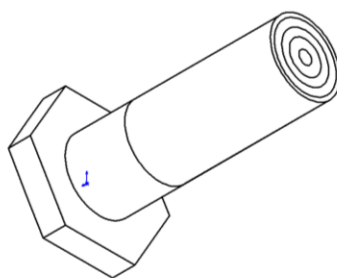




SEÇÃO B-B

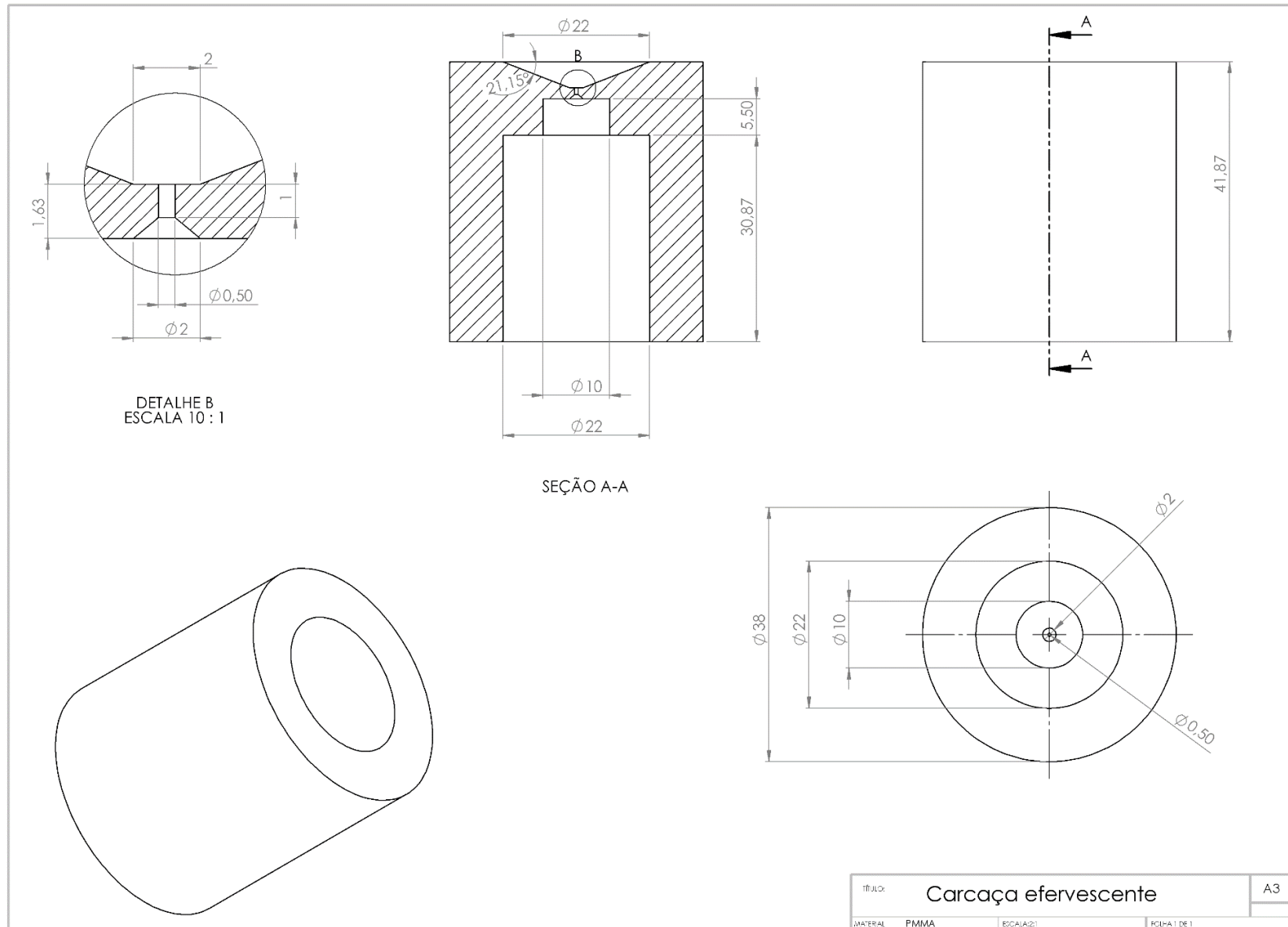


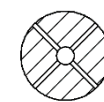
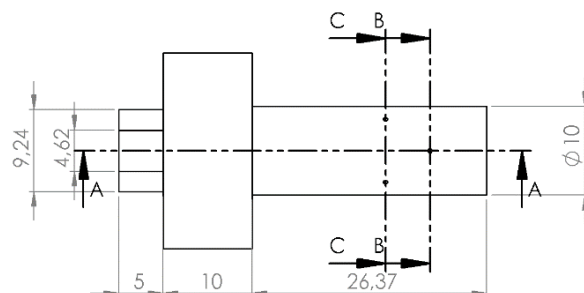
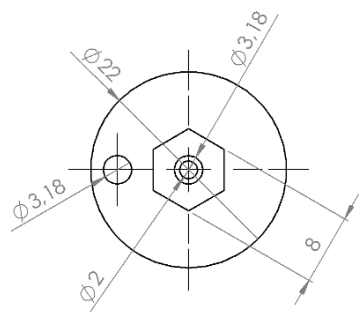
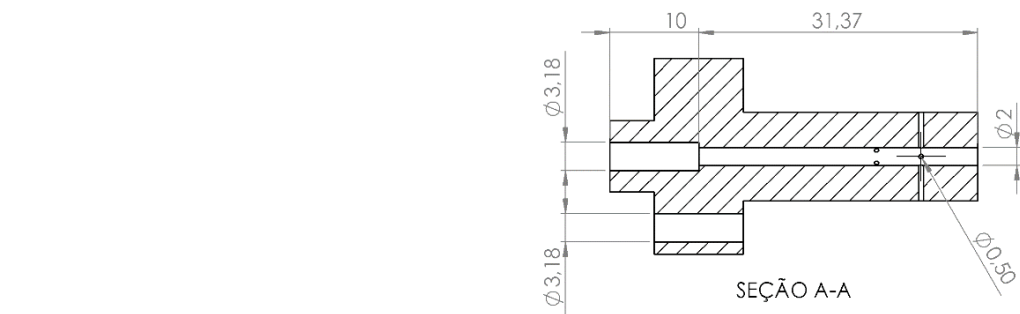
DETALHE C
ESCALA 10 : 1



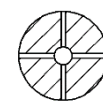
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:				ACABAMENTO:		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS		NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO		REVEÃO	
DESENH.				NOME		ASSINATURA		DATA		TÍTULO:	
VERIF.											
APROV.											
MANUF.											
QUALID.											
								MATERIAL:		DES. Nº	
										peça e 35kW	
								PESO:		A3	
								ESCALA:2:1		FOLHA 2 DE 2	

A.4 Carcaça e bico do injetor efervescente

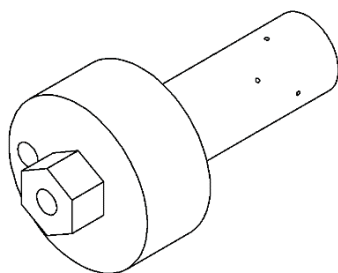




SEÇÃO C-C



SEÇÃO B-B



TÍTULO:	Bico efervescente		A3
MATERIAL:	PMMA	ESCALA: 2:1	FOLHA 1 DE 1

B. INFLUÊNCIA DA VISCOSIDADE E A TENSÃO SUPERFICIAL NA PREDIÇÃO DO TAMANHO DE GOTA NA EQUAÇÃO DE WIGG NO INJETOR Y

B.1 Óleo de Soja com a quantidade de ar do projeto

Viscosidade

GLR	0,38	0,47	0,63	1,08
+10%	65,60	59,46	52,84	43,14
+5%	64,09	58,09	51,62	42,15
-5%	60,96	55,26	49,10	40,09
-10%	59,33	53,78	47,79	39,02
0%	62,54	56,69	50,38	41,14
Max- Min	6,26	5,68	5,04	4,12

Tensão superficial

GLR	0,38	0,47	0,63	1,08
+10%	63,75	57,78	51,35	41,93
+5%	63,16	57,25	50,87	41,54
-5%	61,90	56,12	49,86	40,72
-10%	61,24	55,51	49,33	40,28
0%	62,54	56,69	50,38	41,14
Max- Min	1,20	1,09	0,97	0,79

B.2 Óleo de Soja com 3,5 l/min de ar

Viscosidade

GLR	0,17	0,21	0,26	0,34	0,50
+10%	91,05	82,97	74,32	64,92	54,46
+5%	88,96	81,06	72,61	63,43	53,21
-5%	84,61	77,11	69,07	60,33	50,61
-10%	82,36	75,05	67,22	58,72	49,26
0%	86,81	79,11	70,86	61,90	51,92
Max- Min	8,69	7,92	7,09	6,20	5,20

Tensão superficial

GLR	0,17	0,21	0,26	0,34	0,50
+10%	88,48	80,63	72,22	63,09	52,92
+5%	87,66	79,88	71,56	62,50	52,43
-5%	85,93	78,30	70,14	61,27	51,39
-10%	85,00	77,46	69,38	60,61	50,84
0%	86,81	79,11	70,86	61,90	51,92
Max- Min	1,67	1,52	1,36	1,19	1,00

B.3 Óleo pirolítico de Pneu usado (OPPU)

Viscosidade

GLR	0,05	0,075	0,1	0,125	0,15
+10%	67,61	53,64	45,65	40,38	36,60
+5%	66,05	52,40	44,61	39,46	35,76
-5%	62,83	49,85	42,43	37,53	34,01
-10%	61,15	48,52	41,30	36,53	33,11
0%	64,46	51,14	43,53	38,51	34,90
Max- Min	6,45	5,12	4,36	3,86	3,49

Tensão superficial

GLR	0,05	0,075	0,1	0,125	0,15
+10%	65,70	52,12	44,37	39,25	35,57
+5%	65,09	51,64	43,96	38,88	35,24
-5%	63,80	50,62	43,09	38,11	34,54
-10%	63,12	50,07	42,62	37,70	34,17
0%	64,46	51,14	43,53	38,51	34,90
Max- Min	1,24	0,98	0,84	0,74	0,67

B.4 Mistura Diesel-OPPU, com 2% de OPPU em massa

Viscosidade

GLR	0,06	0,08	0,10	0,12	0,15	0,35
+10%	41,79	35,90	30,29	27,21	25,01	15,96
+5%	40,83	35,08	29,59	26,58	24,44	15,59
-5%	38,84	33,37	28,15	25,28	23,25	14,83
-10%	37,80	32,48	27,40	24,61	22,63	14,44
0%	39,84	34,23	28,88	25,94	23,85	15,22
Max- Min	3,99	3,43	2,89	2,60	2,39	1,52

Tensão superficial

GLR	0,06	0,08	0,10	0,12	0,15	0,35
+10%	40,61	34,89	29,44	26,44	24,31	15,51
+5%	40,23	34,57	29,16	26,20	24,08	15,37
-5%	39,44	33,88	28,59	25,68	23,61	15,06
-10%	39,01	33,52	28,28	25,40	23,35	14,90
0%	39,84	34,23	28,88	25,94	23,85	15,22
Max- Min	0,77	0,66	0,56	0,50	0,46	0,29

B.5 Mistura Diesel-OPPU, com 5% de OPPU em massa

Viscosidade

GLR	0,06	0,08	0,10	0,12	0,15	0,35
+10%	42,04	36,12	30,48	27,37	25,17	16,06
+5%	41,08	35,29	29,77	26,74	24,59	15,69
-5%	39,07	33,57	28,32	25,44	23,39	14,92
-10%	38,03	32,67	27,57	24,76	22,76	14,53
0%	40,09	34,44	29,06	26,10	24,00	15,31
Max- Min	4,01	3,45	2,91	2,61	2,40	1,53

Tensão superficial

GLR	0,06	0,08	0,10	0,12	0,15	0,35
+10%	40,86	35,10	29,62	26,60	24,46	15,61
+5%	40,48	34,78	29,34	26,36	24,23	15,46
-5%	39,68	34,09	28,76	25,83	23,75	15,16
-10%	39,25	33,72	28,45	25,56	23,50	14,99
0%	40,09	34,44	29,06	26,10	24,00	15,31
Max- Min	0,77	0,66	0,56	0,50	0,46	0,29

B.6 Mistura Diesel-OPPU, com 10% de OPPU em massa

Viscosidade

GLR	0,06	0,08	0,10	0,12	0,15	0,35
+10%	41,86	35,96	30,34	27,25	25,06	15,99
+5%	40,89	35,14	29,64	26,63	24,48	15,62
-5%	38,90	33,42	28,20	25,33	23,28	14,86
-10%	37,86	32,53	27,44	24,65	22,66	14,46
0%	39,91	34,29	28,93	25,98	23,89	15,24
Max- Min	4,00	3,43	2,90	2,60	2,39	1,53

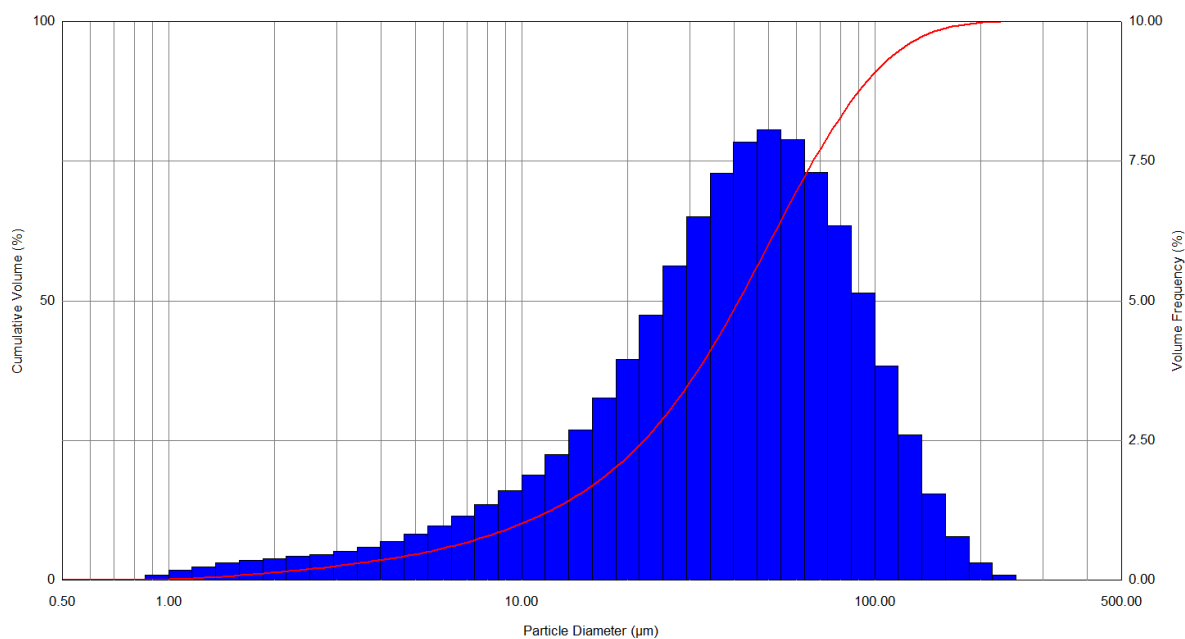
Tensão superficial

GLR	0,06	0,08	0,10	0,12	0,15	0,35
+10%	40,68	34,95	29,49	26,48	24,35	15,54
+5%	40,30	34,63	29,21	26,24	24,12	15,39
-5%	39,50	33,94	28,63	25,72	23,65	15,09
-10%	39,08	33,57	28,33	25,44	23,39	14,93
0%	39,91	34,29	28,93	25,98	23,89	15,24
Max- Min	0,77	0,66	0,56	0,50	0,46	0,29

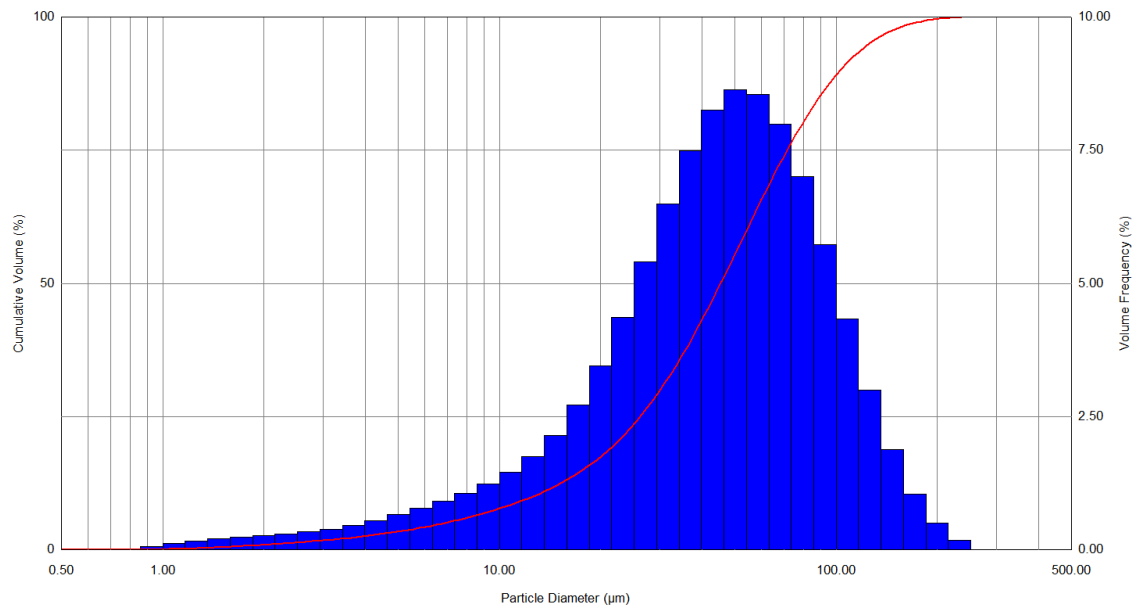
C. DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GOTA

C.1 Testes com injetor Y e óleo de soja, com 3,5 l/min de ar

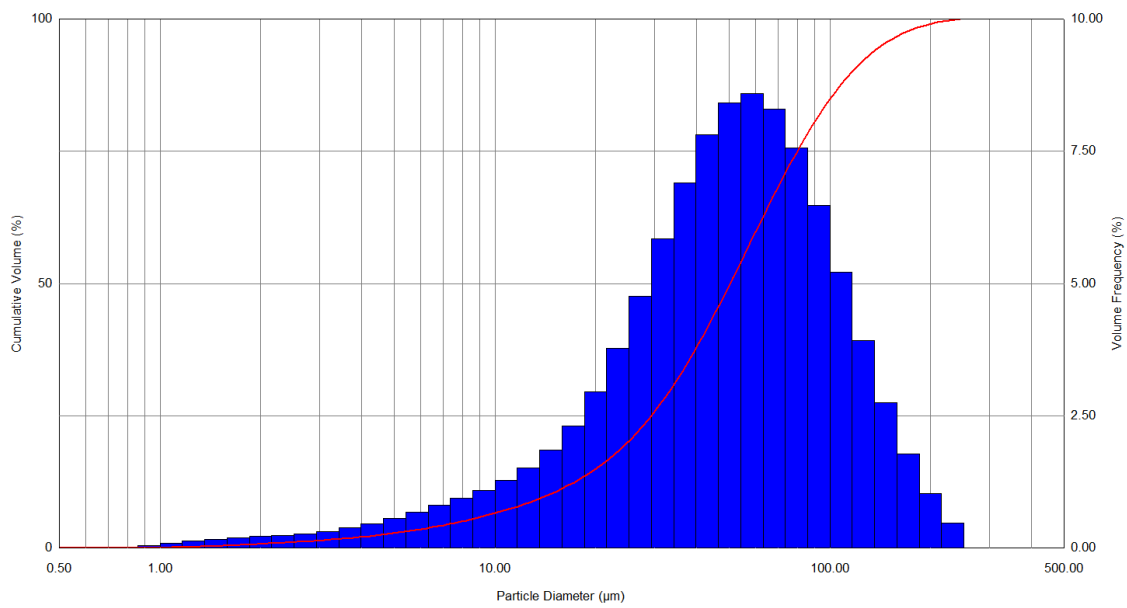
GLR: 0,5



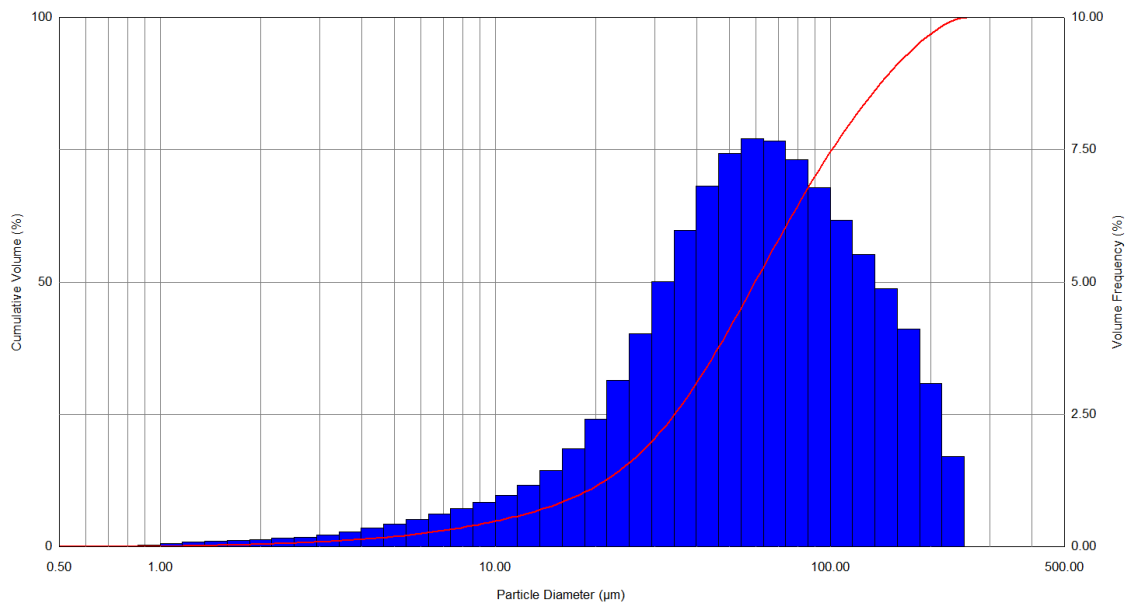
GLR: 0,34



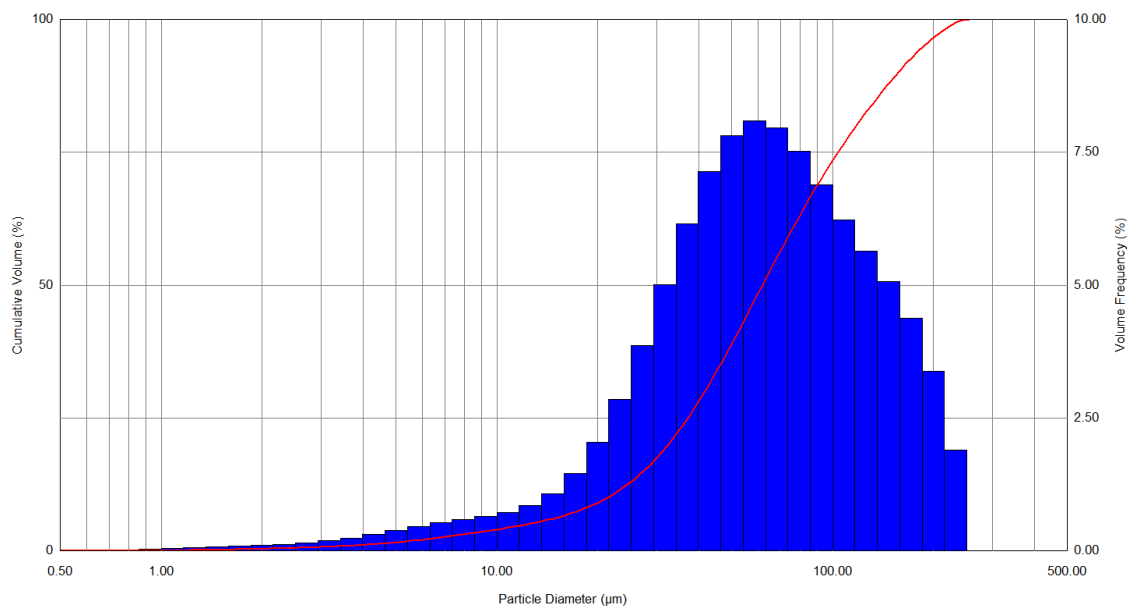
GLR: 0,26



GLR: 0,21

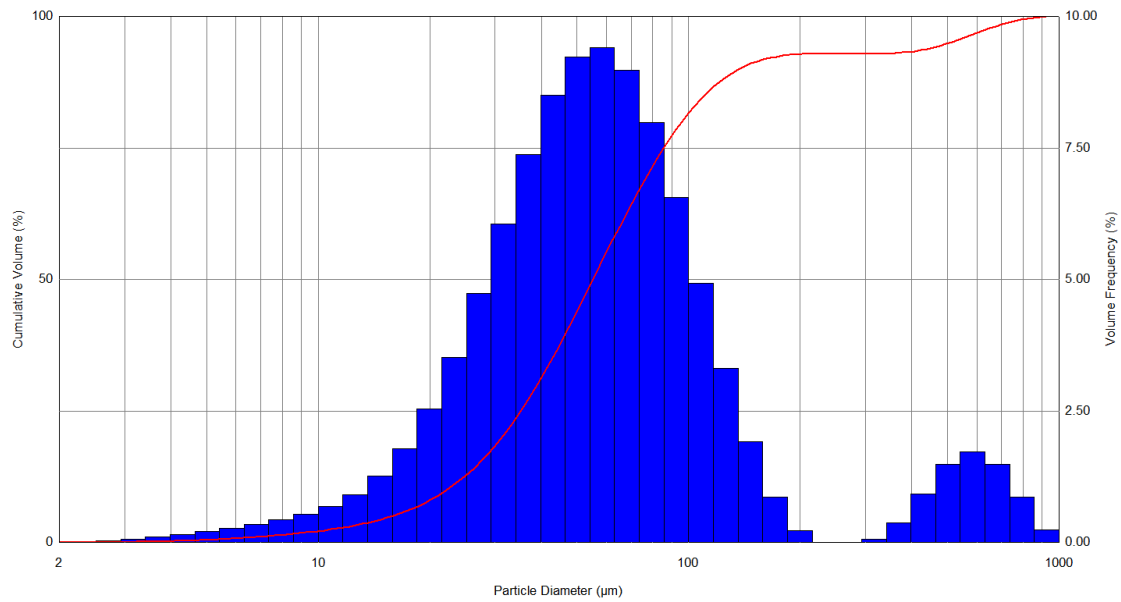


GLR: 0,17

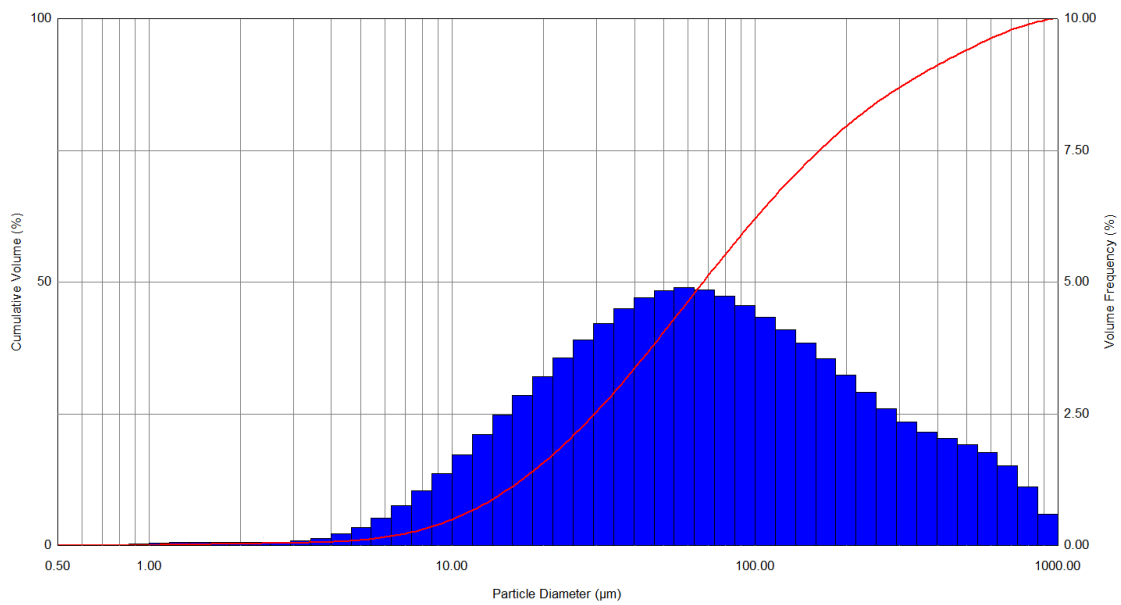


C.2 Testes com injetor Y e OPPU, com os parâmetros do projeto.

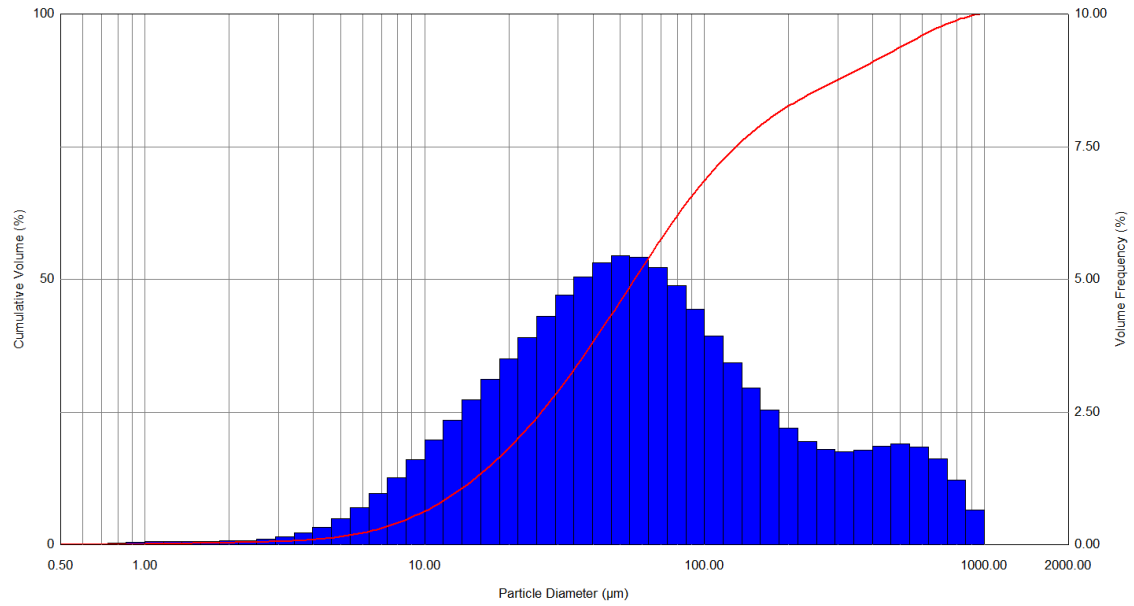
GLR: 0,05



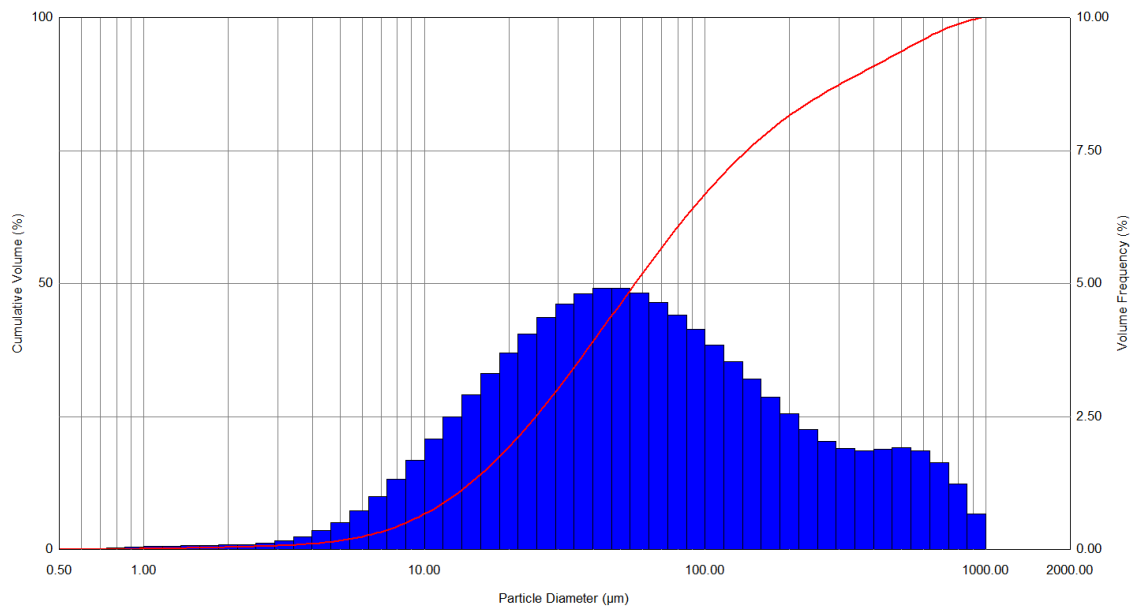
GLR: 0,075



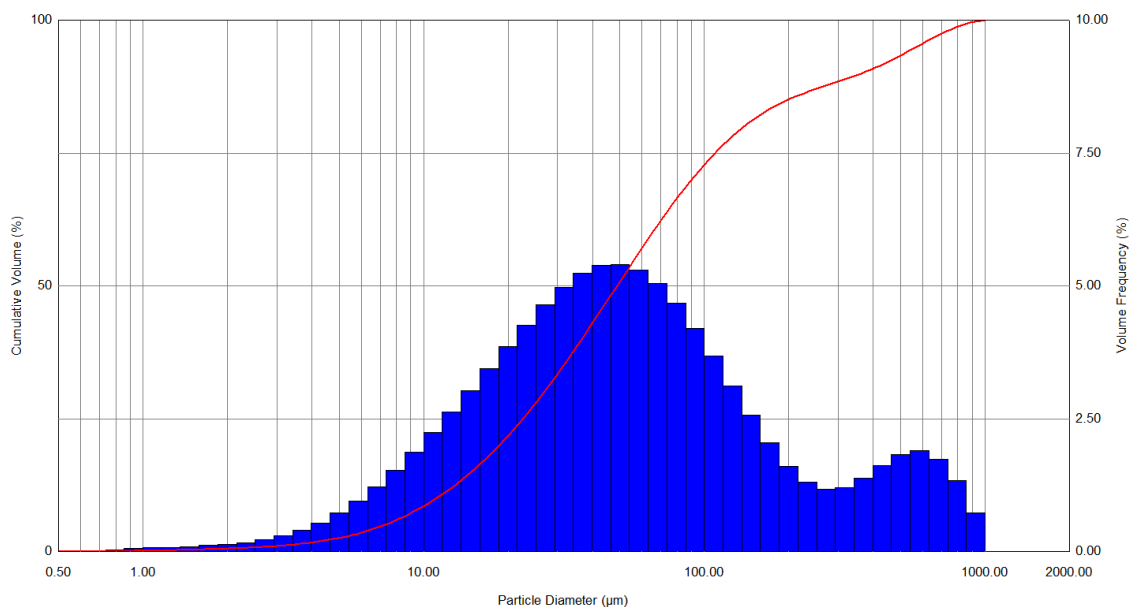
GLR: 0,1



GLR: 0,125

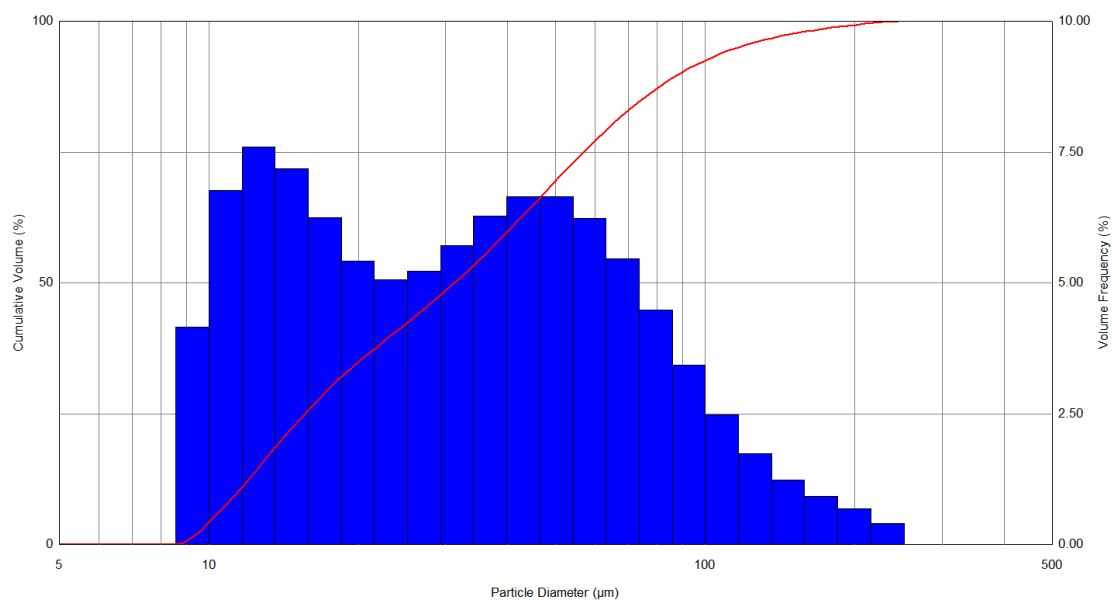


GLR: 0,15

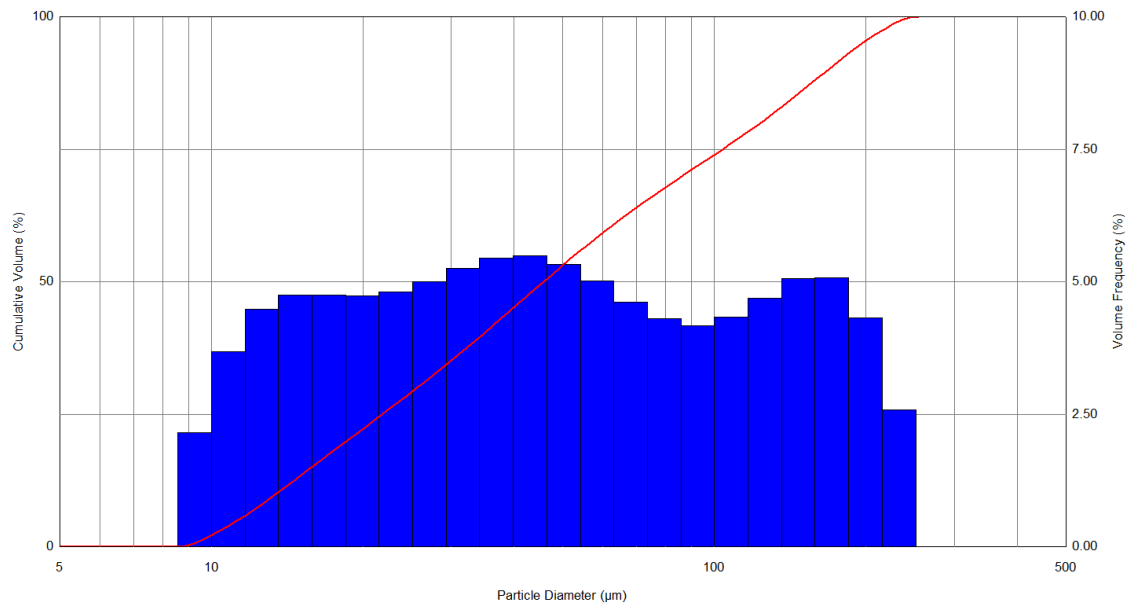


C.3 Testes com injetor Y com mistura Diesel-OPPU, com 2% de OPPU em massa.

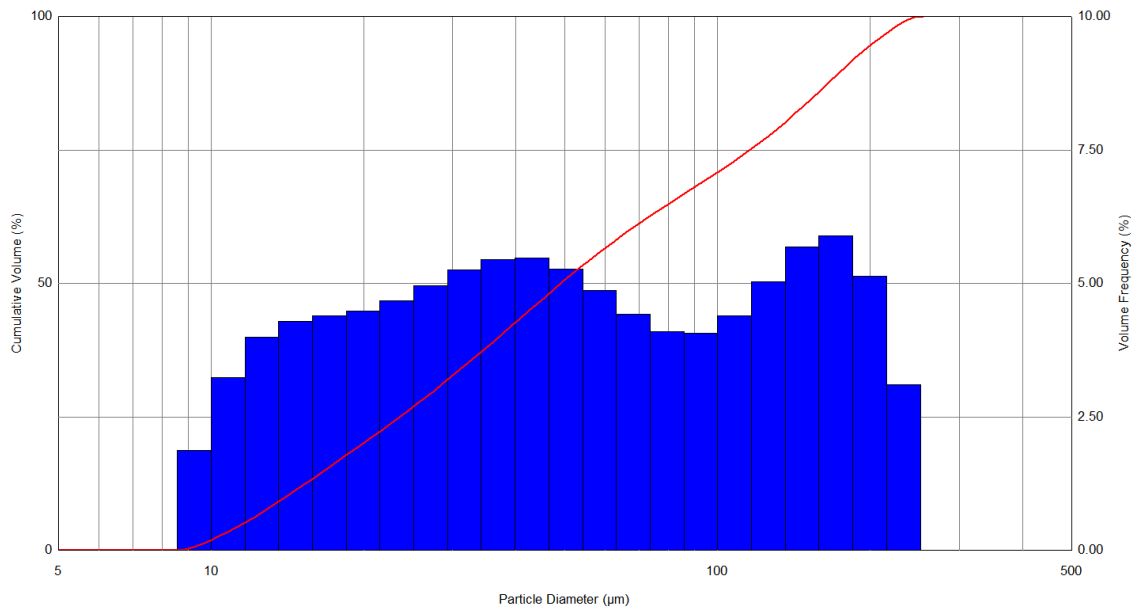
GLR: 0,35



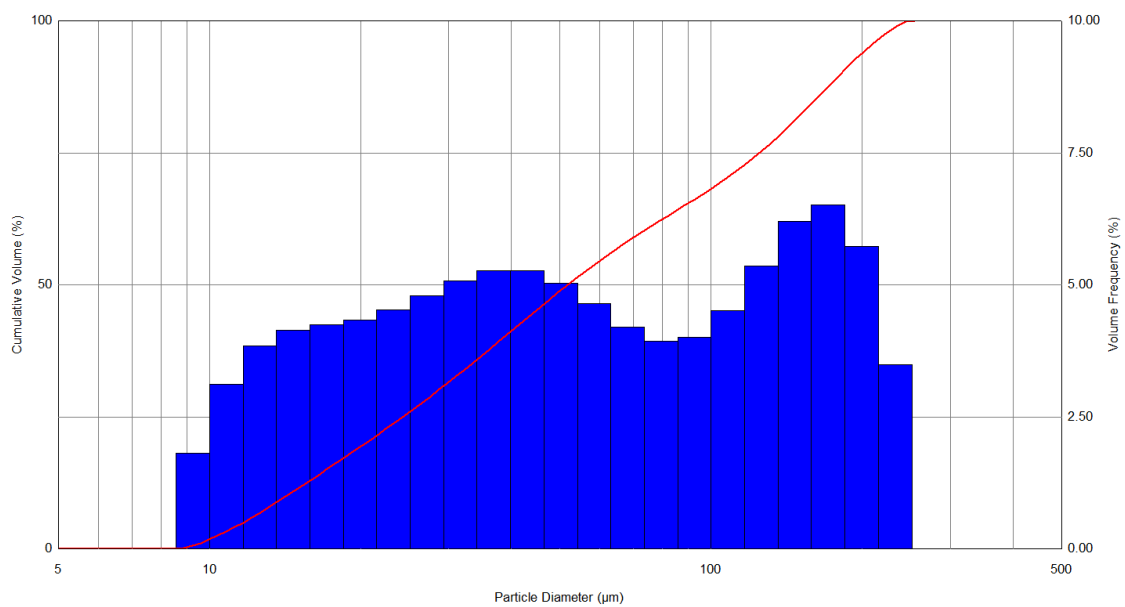
GLR: 0,15



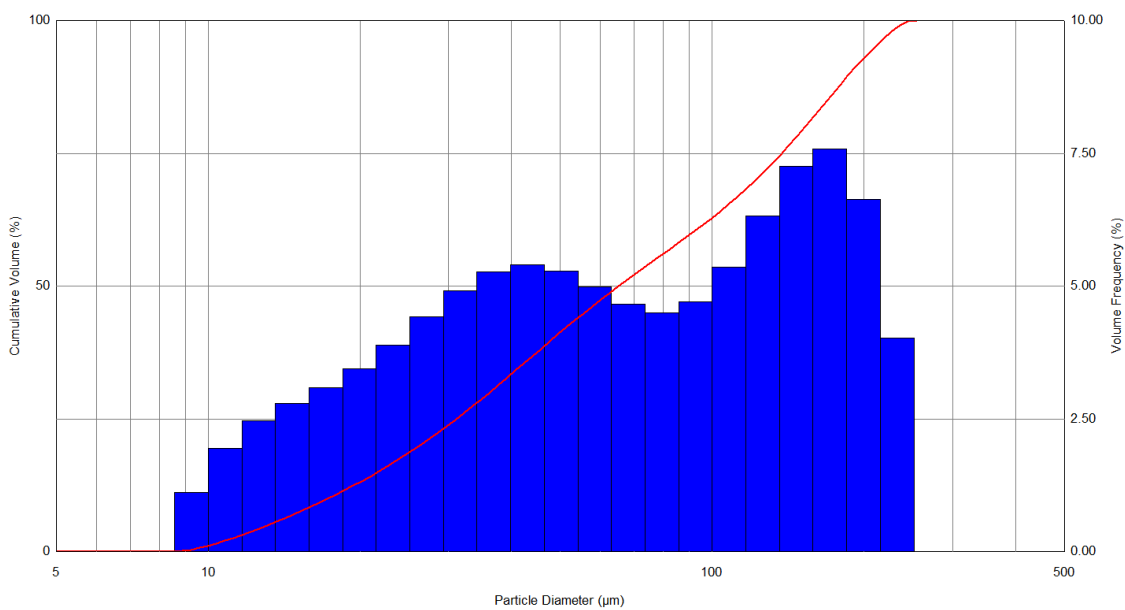
GLR: 0,12



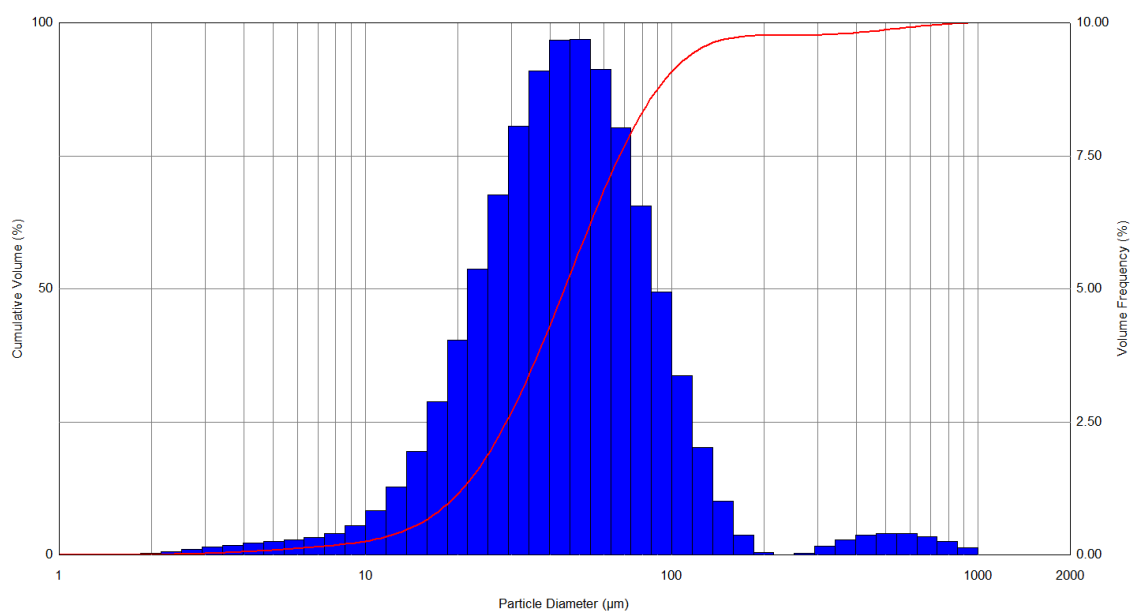
GLR: 0,10



GLR: 0,08

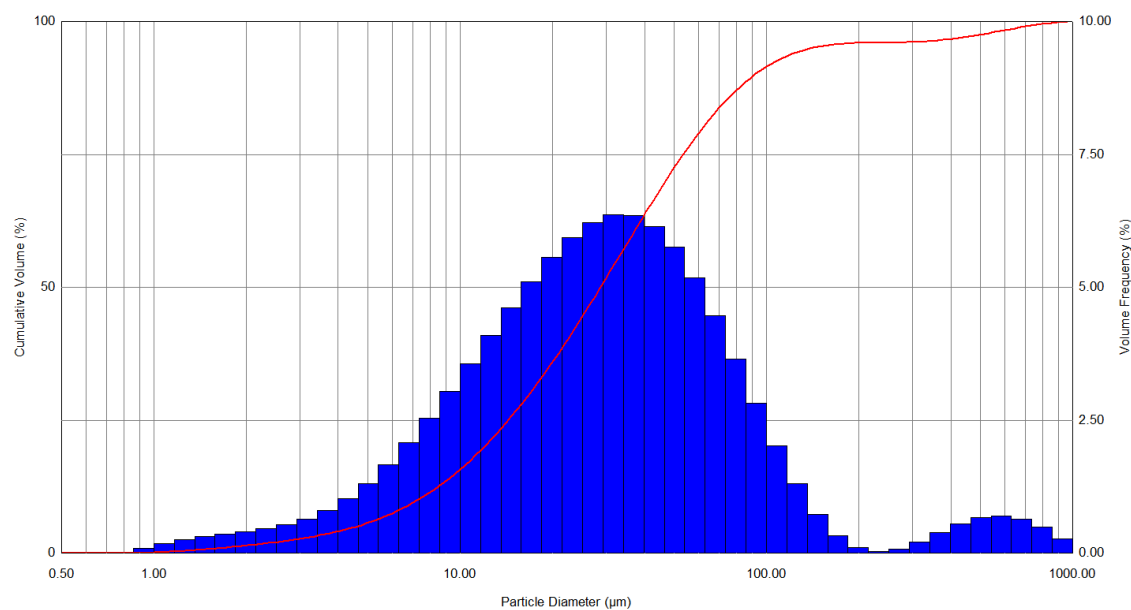


GLR: 0,06

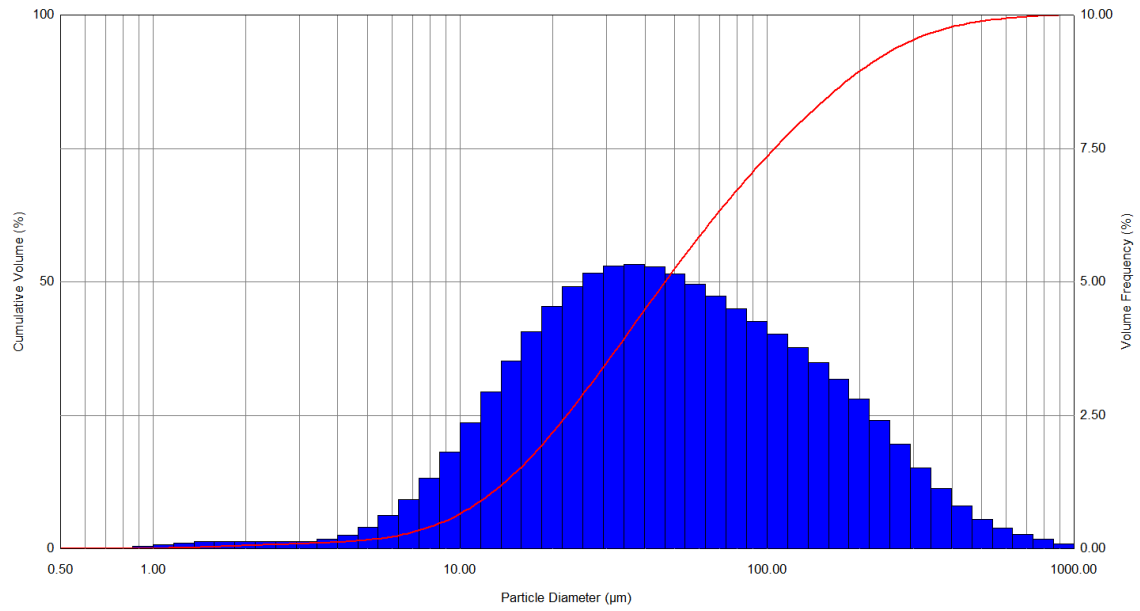


C.4 Testes com injetor Y com mistura Diesel-OPPU, com 5% de OPPU em massa.

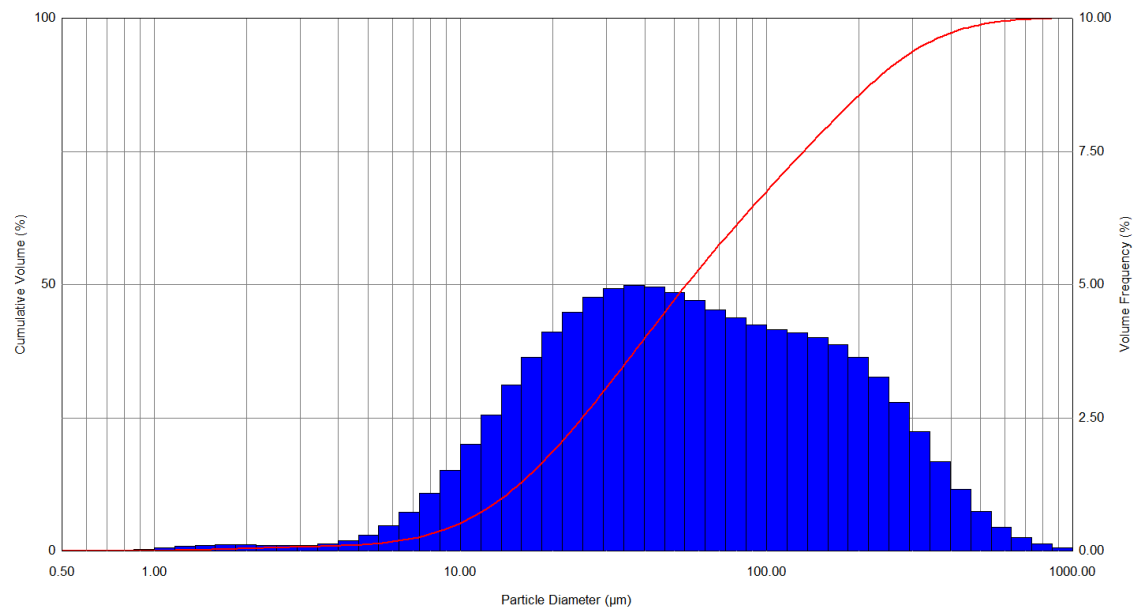
GLR: 0,35



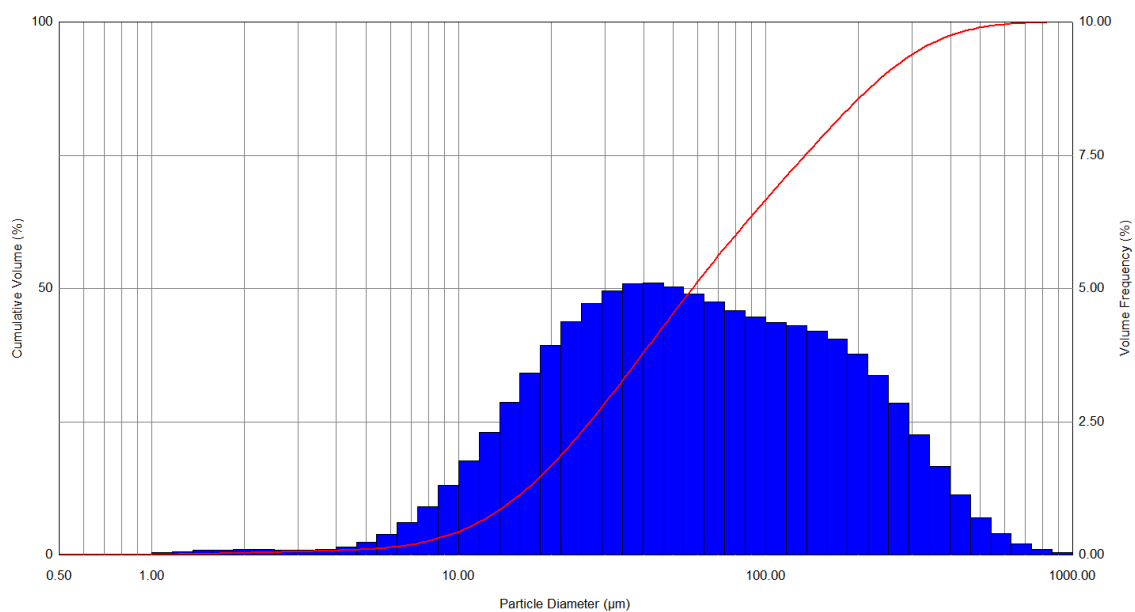
GLR: 0,15



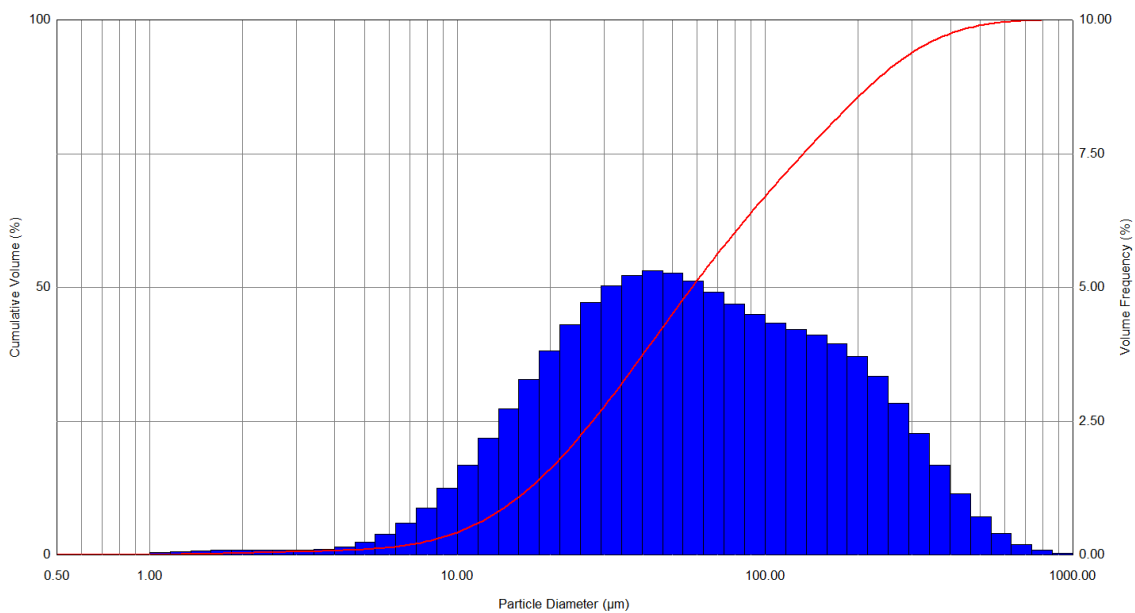
GLR: 0,12



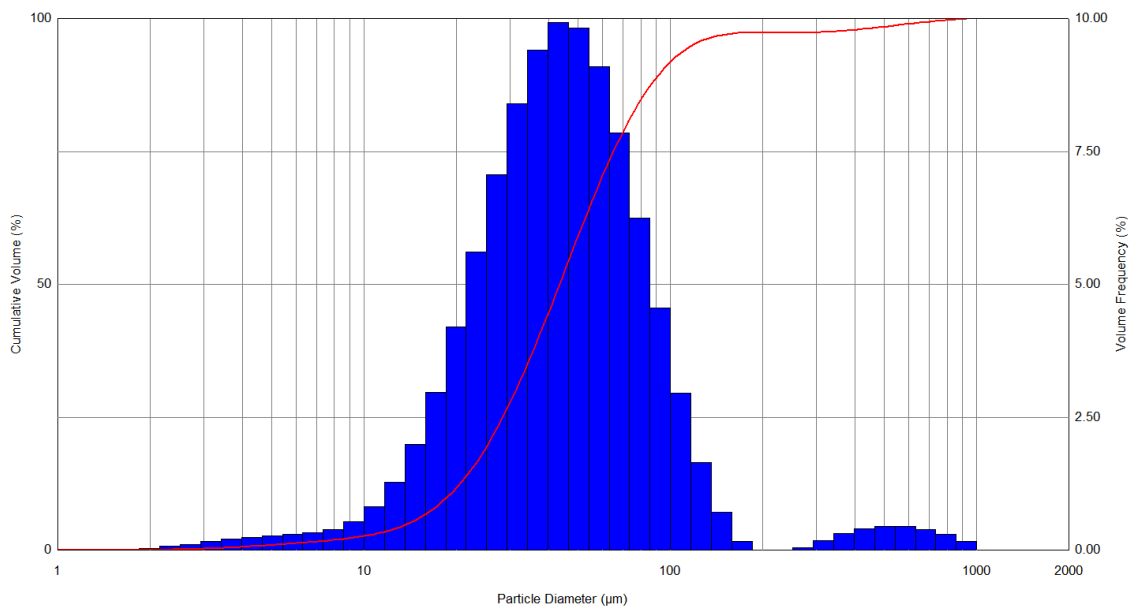
GLR: 0,10



GLR: 0,08

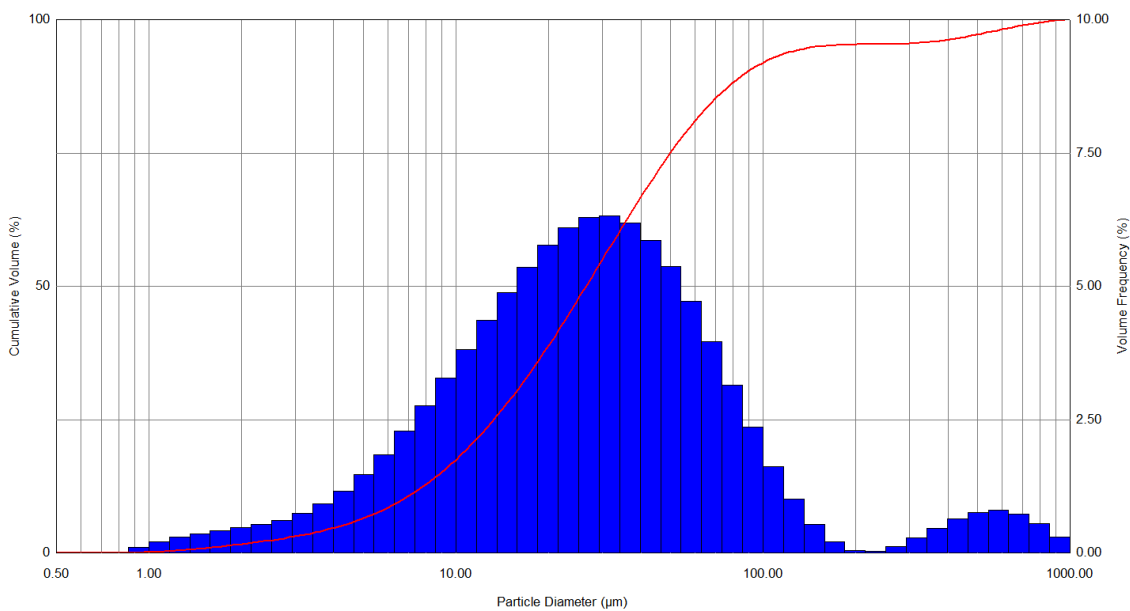


GLR: 0,06

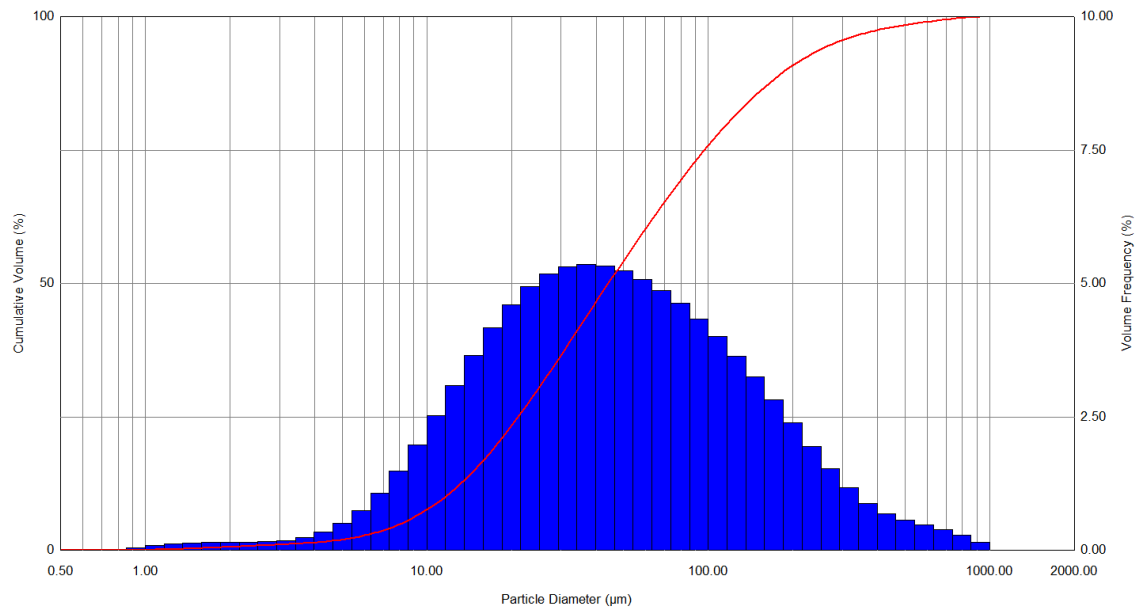


C.5 Testes com injetor Y com mistura Diesel-OPPU, com 10% de OPPU em massa.

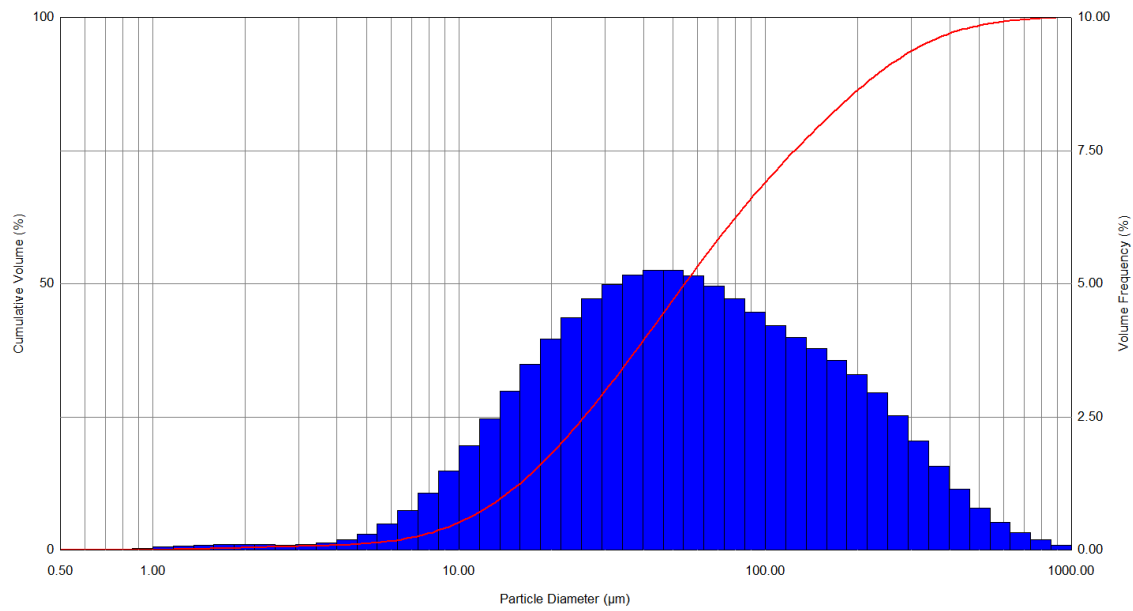
GLR: 0,35



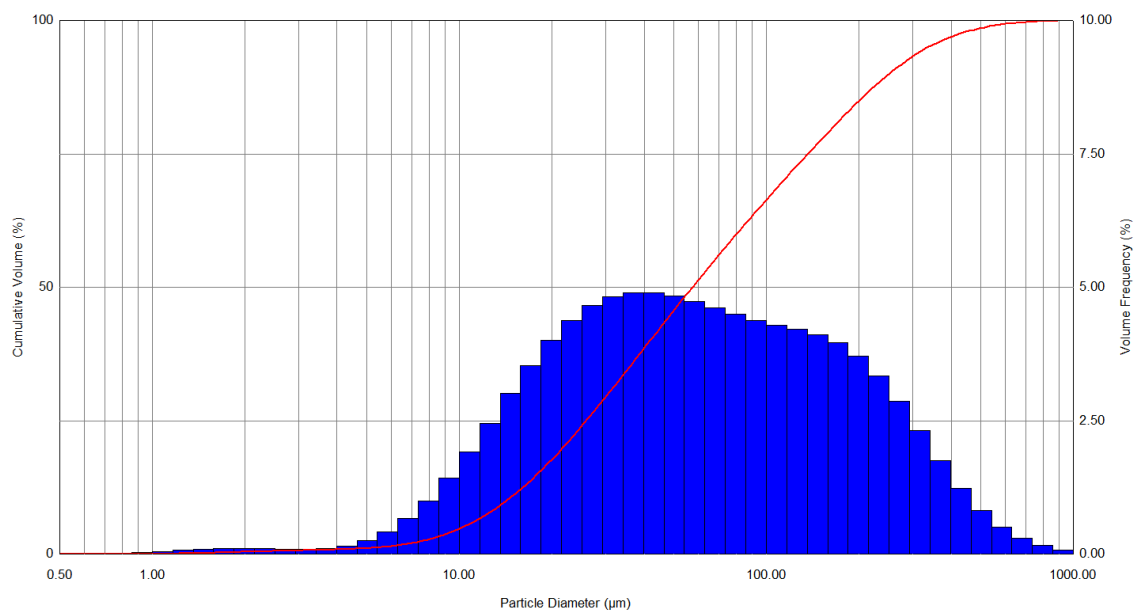
GLR: 0,15



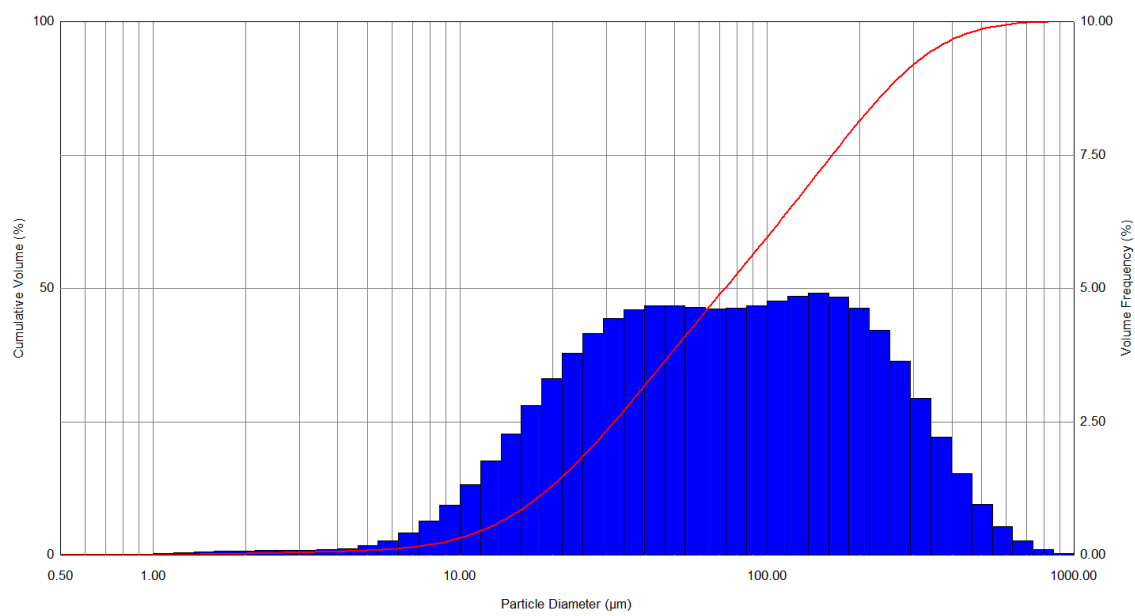
GLR: 0,12



GLR: 0,10



GLR: 0,08



GLR: 0,06

