

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE FULIGEM EM CHAMAS DE GÁS NATURAL

por

Diego Soares

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Novembro de 2013

ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE FULIGEM EM CHAMAS DE GÁS NATURAL

por

Diego Soares

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Juan Pablo Raggio Quintas
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Prof. Dr. Nattan Roberto Caetano

Comissão de Avaliação:

Prof.

Prof.

Prof.

Porto Alegre, 14 de Novembro de 2013.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Nattan Roberto Caetano pela cordial e prestativa forma de orientar esse trabalho. Independente do dia da semana ou horário, sempre esteve disposto nos momentos de dúvidas.

Aos meus pais, Edgar e Cleny, e minha irmã, Rosane, por me manterem focados na realização deste feito.

À minha namorada, Suzie, pelos momentos de carinho e afeto que me confortaram nas situações mais difíceis, além da compreensão pelos inúmeros momentos de ausência.

À família, aos amigos e colegas que fizeram desse período uma inesquecível experiência que valeu a pena ser vivida.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pelo ensino público de excelência e pela possibilidade de compartilhar experiências e usufruir dos conhecimentos de um dos maiores centros de educação do país.

SOARES, D. **Análise da produção de fuligem em chamas gás natural**. 2013. 18. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

RESUMO

A emissão de fuligem tem sido foco de diversos estudos, devido às aplicações na indústria, assim como aos efeitos nocivos causados ao meio ambiente. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é analisar a produção de fuligem em um queimador capaz de produzir chamas planas pré-misturadas utilizando gás natural e ar. Essas chamas possuem características unidimensionais, as quais permitem a comparação direta para validação de modelos. As medições foram realizadas empregando a técnica de extinção de luz laser. A relação da mistura ar/combustível foi variada, a fim de avaliar as frações em volume de fuligem produzidas em diferentes configurações de chama. O comportamento da produção de fuligem para diferentes alturas ao longo da chama, a partir da superfície do queimador, também foi analisada. Os resultados das medições indicam que a fração em volume de fuligem aumenta em regiões mais altas da chama, assim como para a relação de equivalência da mistura. Porém, tendem a se estabilizar para os valores mais altos de ambos, tanto para a razão de equivalência quanto para altura da chama. Os resultados serão incorporados ao banco de dados experimentais para calibração de técnicas de medição e, também, para validação de modelos computacionais de formação de fuligem em desenvolvimento pelo grupo de combustão da UFRGS.

PALAVRAS-CHAVE: Fuligem, Extinção de Luz, Chama Plana, Relação de Equivalência.

SOARES, D. **Analysis of soot production of premixed natural gas combustion**. 2013. 18. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ABSTRACT

Soot emission has been the focus of numerous studies due to applications in industry, as well as to the harmful effects caused to the environment. Thus, the purpose of this work is to analyze the soot production in a flat flame burner using premixed natural gas and air. These flames has unidimensional characteristics, which allow a direct comparison for models validation. The measurements were performed by light extinction technique. The air/fuel equivalence ratio was varied to assess the soot volume fractions for different flame configurations. Soot production along the flame was also analyzed by measurements at different heights from the burner surface. The results indicate that soot volume fraction increases to higher regions of the flame, as was observed for the equivalence ratio of the mixture. However, these values tend to stabilize for both higher values , equivalence ratio and flame height. The results will be incorporated into the experimental database for measurement techniques calibration and also for computational models validation of soot formation by UFRGS combustion development group.

KEYWORDS: Soot, Light Extinction, Flat Flame, Equivalence Ratio.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJETIVOS.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1. A TÉCNICA DE EXTINÇÃO DE LUZ.....	2
2.2. MÉTODO EXPERIMENTAL UTILIZANDO A TÉCNICA DE EXTINÇÃO DE LUZ.....	2
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
3.1. FORMAÇÃO E OXIDAÇÃO DA FULIGEM.....	4
3.2. RELAÇÃO DE EQUIVALÊNCIA.....	4
3.3. LEI DE BEER-LAMBERT.....	4
4. METODOLOGIA	5
4.1. BANCADA EXPERIMENTAL.....	5
4.1.1. QUEIMADOR.....	6
4.1.2. SISTEMA DE ILUMINAÇÃO.....	6
4.1.3. SISTEMA DE DETECÇÃO.....	7
4.1.4. COMBUSTÍVEL.....	7
4.2. APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE EXTINÇÃO DE LUZ.....	7
4.3. TRATAMENTO ESTATÍSTICOS DOS RESULTADOS.....	7
4.4. ANÁLISE DAS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO.....	8
4.4.1. INCERTEZAS DA MEDIÇÃO DE f_v	8
4.4.2. INCERTEZAS NA DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO DE EQUIVALÊNCIA DA MISTURA.....	8
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	9
5.1. COMPORTAMENTO DE f_v EM RELAÇÃO À ALTURA MEDIDA NA CHAMA.....	9
5.2. COMPORTAMENTO DE f_v EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO DE EQUIVALÊNCIA DA MISTURA.....	10
5.3. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM A LITERATURA.....	11
6. DIFICULDADES ENCONTRADAS.....	12
7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	12
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	13
APÊNDICE I.....	16
APÊNDICE II.....	16
APÊNDICE III.....	17
ANEXO I.....	18
ANEXO II.....	18

1. INTRODUÇÃO

A fuligem pode ser definida como o material particulado sólido proveniente da combustão [Glassman, 1987]. O processo de formação da fuligem consiste na conversão de uma molécula de combustível constituído por átomos de carbono ligados a átomos de hidrogênio. O processo de aglomeração de milhões desses átomos de carbono é extremamente complicado. Este processo não está totalmente esclarecido, grande parte devido ao fato da reação ocorrer em velocidades muito elevadas, o que impede a observação dos passos do processo [Appel et al., 1996].

A fuligem é um assunto de grande interesse em engenharia, pois a formação em processos de combustão aumenta a transferência de calor por radiação térmica, o que pode ser benéfico ou não para o sistema proposto. A presença de material particulado em excesso em motores movidos por combustão interna, sobretudo os alimentados por diesel, é um exemplo onde a fuligem é prejudicial. O particulado resultante do processo de combustão inadequado pode se alojar junto à sede de válvulas, impedindo a correta vedação da câmara de combustão, havendo, por consequência, perda de compressão no cilindro. Outro exemplo ocorre em turbinas de gás, onde a presença de material particulado afeta a vida útil das pás devido ao desgaste por abrasão gerado pelo contato com a fuligem.

A emissão deste tipo de material particulado para a atmosfera causa um grande dano ao ambiente, visto que há uma importante degradação na qualidade do ar. Isto pode causar problemas respiratórios em seres humanos, além de estar associada à ocorrência de câncer.

Por outro lado, em equipamentos térmicos industriais, tal como uma caldeira, a presença de fuligem incrementa a troca térmica por radiação da chama com as paredes do sistema, considerando que o material sólido resultante do processo absorve e emite radiação em todos os comprimentos de onda [Barreta, 2010]. Assim, onde uma grande e uniforme troca térmica é requerida, a presença de fuligem na combustão é propositalmente induzida.

Para controlar a emissão de fuligem em sistemas reais de combustão é necessário entender os mecanismos de formação e oxidação da fuligem. A base deste conhecimento está no desenvolvimento de modelos que visam prever o controle da formação de material particulado. A validação destes modelos requer informações sobre a fração de volume de fuligem (f_v), a densidade e o tamanho das partículas. Para tanto, são empregadas técnicas óticas a fim de realizar a medição destas grandezas. Estas técnicas são não-intrusivas e têm sido usadas na maioria dos trabalhos contidos na literatura nas últimas três décadas [Vander Wal et al., 1994].

A necessidade destas informações para o estudo da combustão motivou a realização do presente trabalho, o qual foi desenvolvido a fim de produzir resultados importantes para calibração de técnicas de medição de fuligem. Além disso, os resultados servem também para validação de modelos teóricos que estão sendo desenvolvidos pelo grupo de combustão da UFRGS.

1.1. OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é analisar a produção de fuligem a partir de chamas planas laminares pré-misturadas de gás natural e ar.

Os objetivos específicos são:

- Construir uma bancada experimental para medição de fuligem a partir da técnica de extinção de luz laser;
- Medir a fração de volume de fuligem em diferentes posições da chama, a partir da superfície superior do queimador;
- Medir a fração de volume de fuligem em chamas de diversas relações de equivalência;
- Comparar os resultados deste trabalho com os resultados, experimentais e teóricos, contidos na literatura.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A determinação das propriedades das partículas da fuligem é de fundamental importância, tanto pelos efeitos na transferência de calor e eficiência de conversão da energia térmica, quanto para os efeitos nocivos à saúde humana e ao meio ambiente.

Nos subcapítulos a seguir constam informações presentes na literatura que são de interesse ao objetivo deste trabalho. Primeiramente, é apresentada uma revisão abordando a técnica de extinção de luz e sua evolução. A importância do método para calibração de outras técnicas de medição, assim como para a validação de modelos numéricos, é ressaltada em seguida. Para tal, os trabalhos estão dispostos em ordem cronológica, os quais utilizaram a técnica de extinção de luz laser para a determinação da fração de volume de fuligem em diversas configurações de chama.

2.1. A TÉCNICA DE EXTINÇÃO DE LUZ

Segundo Zhang 2011, os efeitos de dispersão de luz por partículas têm sido alvo de estudos por mais de um século, iniciando 1861, antes mesmo de Maxwell ter proposto a teoria do eletromagnetismo. Lord Rayleigh aplicou as equações de Maxwell e formalmente estabeleceu a teoria da dispersão de Rayleigh, em 1881. Outros cientistas notáveis que contribuíram para esta linha de pesquisa incluem Lorenz, em 1890, Mie, em 1908, e Debye, em 1909. Estes dois últimos estenderam a teoria de Rayleigh para incorporar partículas grandes e não-esféricas.

Estudos prévios aplicaram a teoria de Rayleigh para monitorar a concentração de massa do particulado de fontes como, por exemplo, motores diesel. Autores como Roessler e Faxvog (1979), Jennings e Pinnik (1980), Japar e Szkarlat (1981) e Scherer et al. (1982), propuseram que o coeficiente de extinção para partículas sólidas eram dependentes somente do comprimento de onda, baseados no critério de Rayleigh. Este critério afirma que o particulado de carbono produzido é pequeno, homogêneo e com altos índices de absorção em diferentes faixas do espectro, como no visível e no infravermelho próximo.

Nas últimas duas décadas diversos pesquisadores têm anunciado resultados sobre o coeficiente de extinção, a partir de estudos utilizando combustíveis com hidrocarbonetos e submetidos às mais diversas condições de combustão. Estes resultados são validados a partir do emprego da técnica de extinção de luz. Mulholland, 2002, resumiu alguns destes trabalhos, envolvendo ainda outras técnicas.

A técnica de extinção de luz laser é utilizada tanto para estudos que contemplam diretamente a região da chama, como para regiões fora dela. Para medições que englobam a chama, a medição da fração de volume de fuligem é a informação principal no estudo do desenvolvimento do material particulado na combustão [Santoro et al., 1987]. Além disto, segundo Klassen e Gore, 1993, a medição da fração do volume de fuligem através de métodos como o de extinção de luz é de suma importância no estudo do transporte da radiação em sistemas de combustão.

De acordo com Choi et al., 1995, a determinação da fração do volume de fuligem a partir de medições com extinção de luz laser é viável. Este método é empregado na comunidade que investiga a combustão, visto que os resultados obtidos são apoiados em medições não intrusivas e que produzem informações instantâneas.

2.2. MÉTODO EXPERIMENTAL UTILIZANDO A TÉCNICA DE EXTINÇÃO DE LUZ

O método da extinção de luz é amplamente utilizado para obter a fração de volume de fuligem produzida durante a combustão, pois várias técnicas óticas de medição são calibradas através deste método, como, por exemplo, a técnica LII.

Santoro et al., 1983, utilizaram o método de extinção de luz para validar os resultados de fração de volume de fuligem obtidos através da técnica LII 2D em sistemas de combustão

com chamas laminares de difusão. O método LII apresentou dispersão na ordem de 5 a 10%, provavelmente devido à diferença do tamanho das partículas.

Mulholland e Bryner, 1994, contestam os resultados apresentados na literatura para o índice de refração das partículas de fuligem, parâmetro esse que é essencial na determinação do coeficiente de extinção. Medidas foram realizadas para os comprimentos de onda de 450, 630 e 1.000 nm, utilizando como combustível petróleo cru. Os resultados mostram que o coeficiente de extinção para os três comprimentos de onda foi constante, mesmo que a concentração do número de partículas variasse por um fator de 24 devido à aglomeração.

Choi et al., 1995, apresentaram resultados acerca da combustão do acetileno, em uma chama pré-misturada. Medidas utilizando simultaneamente extinção de luz e gravimetria foram realizadas. A fração de volume de fuligem obtida pelo método da extinção de luz foi o dobro da obtida quando o método foi calibrado usando a gravimetria. Após a calibração, um coeficiente de extinção de 8,6 foi encontrado e o autor afirma que este número pode ser aplicado como coeficiente de extinção para a fuligem gerada em diversos combustíveis, para sistemas de iluminação que contemplam o espectro do visível. Os autores concluem que métodos simultâneos de medição devem ser empregados para resultados mais apurados do coeficiente de extinção.

Zhao e Ladommatos, 1998, utilizaram a técnica extinção de luz laser para verificar a formação de fuligem dentro do cilindro de motores diesel. Os resultados foram comparados com outras técnicas, tais como LII e o método de emissão em duas cores, onde dois comprimentos de ondas distintos são capturados para se obter um coeficiente de extinção com menor incerteza.

Santos, 2001, estudou a influência do oxigênio e da velocidade do ar na formação de fuligem, empregando a técnica de extinção de luz laser em uma chama difusiva de acetileno, com injeção coaxial de oxigênio e ar anular. O autor conclui que o enriquecimento de oxigênio provoca um aumento na produção de fuligem, da mesma forma que o uso de velocidades de injeção de ar maiores que a de combustível. Assim, um controle do teor de oxigênio injetado e da velocidade do ar podem ser ferramentas úteis para o controle da fuligem gerada.

Yang e Koylu, 2005, mediram a concentração de fuligem em uma chama turbulenta não pré-misturada de etileno. Os resultados foram obtidos pela técnica de extinção e de espalhamento de luz. Os autores mediram a fração de volume de fuligem em diversos locais da chama, na direção radial e axial. Contudo, foi encontrado um volume máximo de fração de volume de fuligem de 1 ppm entre todas as medições.

Tran et al., 2012, usaram a técnica de extinção de luz para obter valores quantitativos da fração de volume de fuligem. Na configuração utilizada, chamas de biodiesel vaporizado foram estudadas. Medições através da técnica LII foram calibradas por meio dos valores obtidos a partir do método de extinção de luz, os quais apresentaram discrepância máxima de 10% entre os resultados.

Além disto, modelos numéricos podem ser validados através de resultados experimentais medidos a partir da técnica de extinção e luz. Autores como Appel et al., 2001 e D'Anna et al., 2008, utilizaram esta técnica para validar modelos teóricos de formação de fuligem, utilizando como combustível metano e acetileno, respectivamente.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. FORMAÇÃO E OXIDAÇÃO DA FULIGEM

De forma resumida, a transformação do combustível em material particulado após a combustão acontece em cinco etapas. A figura 3.1 demonstra estes processos, na ordem em que ocorrem:

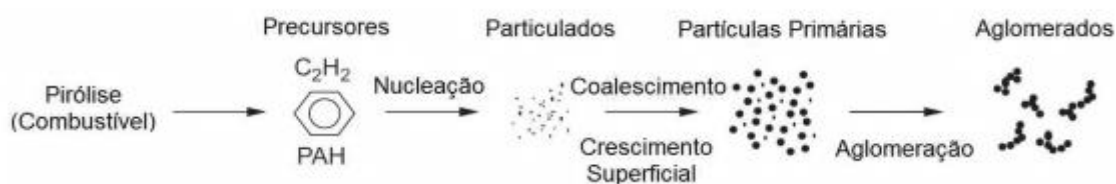


Figura 3.1 – Etapas do processo de formação de fuligem [adaptado de Strik, 2010].

Durante a pirólise ocorrem os processos de craqueamento, coqueificação e ciclização, formando Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (PAH), os quais são compostos por etano (C₂H₂). A nucleação ocorre quando uma molécula grande precipita, formando uma partícula sólida, cujo formato pode ser considerado como uma esfera. No processo de coalescimento, duas partículas se unem para formar uma partícula maior. O crescimento superficial acontece quando a partícula absorve outros componentes, aumentando ainda mais de tamanho. Por último, a aglomeração consiste na reunião de várias dessas partículas formadas anteriormente, o que resulta em um conglomerado sólido.

3.2. RELAÇÃO DE EQUIVALÊNCIA

A relação de equivalência da mistura entre combustível e oxidante, ϕ , também conhecida por razão de mistura ou traduzida diretamente como razão de equivalência, é um parâmetro importante nos processos de reação em geral, pois interfere diretamente nas características dos produtos da combustão. Turns, 2000, afirma que a razão de equivalência é definida pela divisão da fração entre ar e combustível em condições operacionais da mistura, $(A/C)_{mist}$, pela fração entre ar e combustível em condições estequiométricas, $(A/C)_{esteq}$, de acordo com a Equação (3.1).

$$\phi = \frac{(A/C)_{mist}}{(A/C)_{esteq}} \quad (3.1)$$

Para misturas estequiométricas, ou seja, $\phi=1$, todo o conteúdo dos reagentes se transforma em produtos da combustão. Quando há pouco combustível envolvido no processo, a mistura pobre ($\phi<1$), parcelas de O₂ se fazem presente nos produtos da combustão. Quando há combustível em excesso, a chamada mistura rica ($\phi>1$), toda a parcela de O₂ dos reagentes é consumida. Neste caso, componentes derivados do carbono e hidrogênio, assim como o combustível que não reagiu, podem ser encontrados nos produtos da combustão.

3.3. LEI DE BEER-LAMBERT

A Lei de Beer-Lambert é uma relação empírica que, na física ótica, relaciona a absorção de luz com as propriedades do meio por ela transmitido. Segundo Choi et al., 1995, quando aplicada à técnica de extinção de luz, para regiões no interior da chama, segue a seguinte relação:

$$\frac{I}{I_0} = \exp\left(-\frac{x f_v k_e}{\lambda}\right) \quad (3.2)$$

onde I_0 é a intensidade total de luz emitida por um laser, I é a quantidade de luz transmitida, x é a espessura da chama que a luz laser atravessa, f_v a fração de volume de fuligem produzida, k_e o coeficiente de extinção de luz e λ o comprimento de luz laser.

4. METODOLOGIA

4.1. BANCADA EXPERIMENTAL

A bancada experimental é composta basicamente por sistema de iluminação, detecção e controle, além do queimador, conforme mostra a Figura (4.1). Uma imagem *in loco* da configuração geral do aparato pode ser vista no Apêndice III. Esta bancada foi construída de forma que todos os dispositivos que a constituem estejam unidos em uma mesma estrutura, a fim de garantir o alinhamento entre os componentes do sistema de iluminação e de detecção.

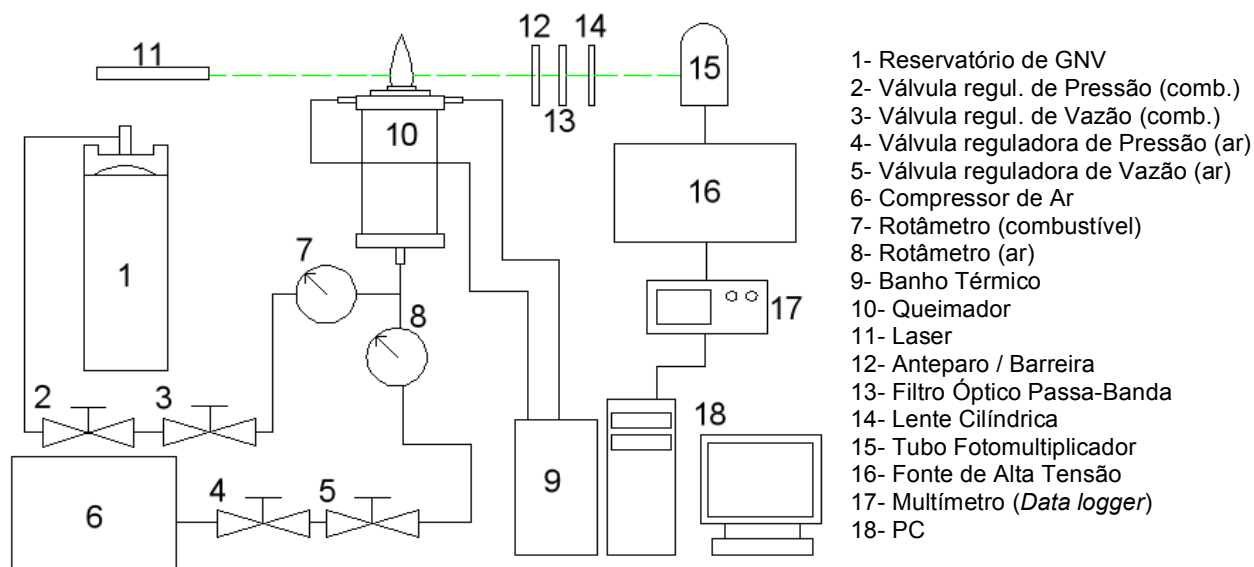


Figura 4.1 – Esquema de montagem do aparato experimental.

Foram utilizados dois rotômetros para o controle das vazões de ar e combustível, a fim de determinar a relação de equivalência da mistura para cada chama estudada. A linha de gás proveniente do reservatório de GNV, com pressão de 4 bar, é conectada ao rotômetro de controle do combustível. A linha de ar comprimido fornece pressão de 3 bar e é ligada ao rotômetro de ar.

O rotômetro utilizado para medir a vazão de combustível possui escala de 0,2 NI/min até 2 NI/min e o de ar possui escala de 1 até 10 NI/min, ambos da marca Conaut, modelo 420 e incerteza de fundo de escala de 5%.

Um anteparo foi utilizado para evitar que a luminosidade da chama interfira nos sinais capturados pelo tubo fotomultiplicador. Este dispositivo é constituído de uma barreira sólida, dotado de um orifício de diâmetro ligeiramente menor que o diâmetro do feixe de luz emitido pelo laser. Como o ângulo de divergência do laser utilizado é considerável em relação à distância do detector, este orifício elimina a divergência da luz, limitando a dimensão do feixe.

Além disso, um filtro óptico passa-banda, centrado em 532 nm, com uma janela de ± 25 nm, foi utilizado para complementar a redução da transmissão de luz ambiente e da chama. Desta forma, apenas a luz laser incide sobre o fotodetector.

Por fim, uma lente cilíndrica foi posicionada após o filtro para permitir que toda a área do fotodetector seja iluminada de maneira homogênea.

4.1.1. QUEIMADOR

O estudo foi realizado em um queimador concebido segundo o projeto proposto por Bosschaart, 2002. O dispositivo, disponível no laboratório, é resultado do trabalho realizado por

Schmidt, 2012, o qual foi construído para a medição de velocidade de chamas planas pré-misturadas.

Na porção inferior, o queimador admite ar e combustível. Na porção superior, a mistura sai através de um disco de 32 mm de diâmetro, o qual possui 1639 orifícios de 0,5 mm de diâmetro, dispostos em um padrão hexagonal. Água a 85°C proveniente de um banho térmico percorre todo o perímetro do disco perfurado, a fim de anular a troca de calor entre a chama e o corpo do queimador, garantindo condições adiabáticas na base da chama. Esta configuração permite produzir chamas planas unidimensionais.

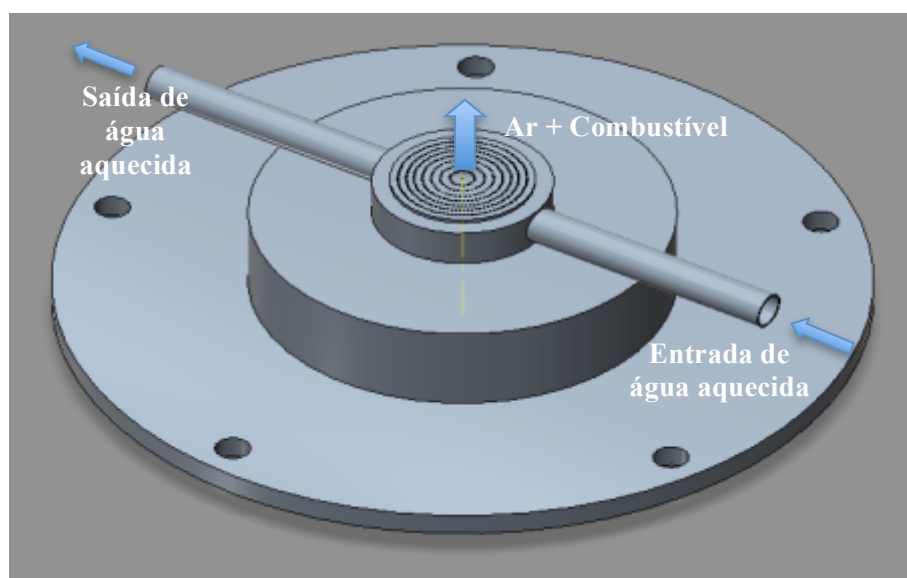


Figura 4.2 – Configuração da porção superior do queimador.

4.1.2. SISTEMA DE ILUMINAÇÃO

O sistema de iluminação do experimento é constituído por um laser de diodo, contínuo, o qual emite um feixe de luz com comprimento de onda na ordem de 532 ± 10 nm e potência de 1W, com incerteza de mais ou menos 10 mW.

4.1.3. SISTEMA DE DETECÇÃO

Para o sistema de detecção foi utilizado um tubo fotomultiplicador como fotodetector, da marca HAMAMATSU, modelo 931A. O dispositivo apresenta uma eficiência quântica de aproximadamente 3,75% para o comprimento de onda de 532 nm, com incerteza de 2%. A eficiência quântica máxima é de 18% para o comprimento de onda de 375 nm, conforme Anexo I.

O tubo fotomultiplicador foi acoplado a uma fonte de alta tensão marca Fluke, modelo 415B, a qual fornece uma diferença de potencial na ordem de 1.000 V, a fim de amplificar a intensidade do sinal.

Por fim, o sinal do tubo fotomultiplicador é capturado por um multímetro digital, *data logger*, da marca Agilent, conectado a um microcomputador. O programa HP BenchLink Data Logger é responsável pela interface entre o sistema, o que permite o controle da frequência e do tempo de captura do sinal elétrico do fotodetector.

As medidas foram arquivadas em formato de planilha eletrônica, CSV, as quais foram processadas utilizando o programa iWork Numbers, da Apple, a fim de produzir os resultados de f_v .

4.1.4. COMBUSTÍVEL

O combustível utilizado no queimador foi o gás natural veicular GNV, o qual pode ser facilmente encontrado em postos de combustíveis. Segundo o fornecedor, este gás é composto de 91% de CH_4 (metano), 6,1% de C_2H_2 (etano), 1,1% de C_3H_2 (propano), 0,4% de CO_2 e 1,4% de N_2 . O poder calorífico do GNV é da ordem de $38,8 \cdot 10^6 \text{ J/Nm}^3$.

A tabela a seguir contém as configurações das chamas utilizadas no experimento. As vazões estão corrigidas para a pressão das linhas de ar e combustível, de 3 e 4 bar, respectivamente.

Tabela 5.1 – Configuração das diferentes chamas utilizadas no experimento.

Configuração da Chama	\dot{V}_{ar} (l/min)	\dot{V}_{comb} (l/min)	ϕ	Re	U_{global} (m/s)
1	8,32	1,13	1,5	707,58	0,49
2	8,32	1,51	2	736,46	0,51
3	8,32	1,88	2,44	765,34	0,53
4	8,32	2,66	4	823,1	0,57
5	8,32	3,58	5,3	889,95	0,62
6	8,32	5,37	8	1023,82	0,71

Para todas as configurações de chama utilizadas, o número de Reynolds ficou abaixo de 2100, valor este que, segundo Fox et al., 2004, é o limite superior para escoamentos laminares.

4.2. APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE EXTINÇÃO DE LUZ

A técnica de extinção de luz é baseada na medição da intensidade de luz laser que atravessa uma chama, onde parte dessa luz é absorvida, atenuada e espalhada devido à presença de material particulado.

Para a medida da intensidade de luz transmitida, I , foi utilizado o aparato demonstrado na Figura 4.1. O queimador foi posicionado entre o sistema de iluminação e o sistema de detecção, em um suporte, a fim de permitir a medição em diferentes alturas. A primeira medida foi realizada em 5 mm, acima da base da chama. As medidas subsequentes foram realizadas em intervalos de 5 mm.

As medidas para I_0 foram obtidas da mesma maneira que para I , com a diferença que a luz laser incidiu diretamente sobre o tubo fotomultiplicador, sem atravessar a chama. Para tal, o queimador foi deslocado na direção transversal até que o feixe laser não incidisse na chama. Assim, a medida da intensidade total de luz laser pôde ser capturada, considerando também que o ruído causado pela luminosidade da chama esteve sempre presente nas medidas.

Para os valores correspondentes à espessura da chama onde a luz laser é transmitida, x , foram utilizadas imagens digitais de cada configuração de chama utilizada. Estas imagens foram processadas com o programa Adobe Photoshop CS5. A espessura da chama, em cada altura onde foram realizadas as medidas, foi medida a partir da comparação com uma dimensão real conhecida presente na imagem. O processo consiste em comparar o número de pixels que compõem a chama com o número de pixels que compõem a superfície de dimensão real conhecida.

Assim, a partir dos dados de I e I_0 obtidos experimentalmente, com o valor de λ conhecido e tomando por base $k_e = 8,6$ [Choi et al., 1995], os valores de f_v para os pontos analisados na chama e para as diferentes variações da razão de equivalência da mistura foram obtidos, a partir da Equação 3.2.

O tamanho das partículas de fuligem foi considerado como sendo menor que o comprimento de onda do laser utilizado. Assim, a configuração de todas as chamas está no

regime de Rayleigh, onde a seção de absorção é muito maior que a de espalhamento, o que possibilita a aplicação da técnica de extinção de luz. Além disso, segundo Frencklach et al., 1995, a absorção da luz ocorre basicamente pelas partículas de fuligem, não sendo verificada influência por parte de outros produtos da combustão.

4.3. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS RESULTADOS

Os valores de I e I_0 são dados pelo sinal elétrico que é medido pelo *data logger*, em termos de tensão, Volts. Estes resultados foram submetidos ao critério de Chauvenet para identificar valores que extrapolam a tendência dominante. Segundo Taylor, 1997, o critério especifica que um valor medido pode ser rejeitado se a probabilidade de obter o desvio em relação à média é menor que $0,5n$. Sendo que n é o número de medições realizadas para cada relação de equivalência avaliada. Mais detalhes sobre a aplicação deste método podem ser encontrados no Apêndice I.

4.4. ANÁLISE DAS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

A análise da incerteza experimental (u) causada por erros aleatórios (resultado do somatório de pequenos erros independentes e incontroláveis, tais como os erros dos instrumentos de medição) foi realizada através da aplicação do método de propagação de erros independentes proposto por Kline-McClintock. Segundo Holman, 1994, o método é dado pela equação a seguir:

$$u = \pm \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{dY}{di} u_i \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.1)$$

onde Y , a grandeza medida, é função de outras grandezas, ou seja, $Y=f(i...n)$. Esta ferramenta indica quantitativamente os resultados obtidos e serve de parâmetro para análise da qualidade dos dados obtidos.

4.4.1 INCERTEZAS DA MEDIÇÃO DE f_v

O método de Kline-McClintock foi aplicado aos resultados de volume de concentração de fuligem. A expressão abaixo foi obtida a partir do uso da Equação 4.1, onde, neste caso, Y corresponde a f_v , que é função das grandezas I , I_0 , λ , x e k_e :

$$u_{f_v} = \pm \sqrt{\left[\left(\frac{df_v}{dx} \right) u_x \right]^2 + \left[\left(\frac{df_v}{dk_e} \right) u_{k_e} \right]^2 + \left[\left(\frac{df_v}{dI_0} \right) u_{I_0} \right]^2 + \left[\left(\frac{df_v}{dI} \right) u_I \right]^2 + \left[\left(\frac{df_v}{d\lambda} \right) u_\lambda \right]^2} \quad (4.2)$$

As derivadas dos termos da Equação 4.2 estão descritas no Apêndice II deste trabalho. Para o erro referente à medida da largura da chama atravessada pela luz laser, foi considerado $u_x = \pm 3 \times 10^{-6}$ m. Este valor está de acordo com a incerteza na medição do tamanho do pixel durante a análise das imagens da chama. O erro do fator de extinção de luz foi considerado $u_{k_e} = \pm 1,5$ (mais detalhes em Choi et al., 1995). O erro para os valores obtidos na aquisição da intensidade de luz foram considerados como sendo $u_{I_0} = u_I = \pm 6$ V, obtidos através da razão entre o maior valor da amplitude do sinal medido, *RMS*, e a média deste sinal. A incerteza referente ao comprimento de onda emitido pelo laser foi considerando $u_\lambda = \pm 10$ nm, de acordo com informações do fabricante.

Dessa forma, a incerteza máxima nas medições de f_v são da ordem de 7,9% para os resultados deste trabalho.

4.4.2 INCERTEZAS NA DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO DE EQUIVALÊNCIA DA MISTURA

O cálculo da relação de equivalência da mistura foi realizado a partir da Equação 3.1. A fração $(A/C)_{esteq}$ é conhecida, então a proporção ar/combustível nas condições do experimento pôde ter a incerteza determinada, a partir da incerteza dos rotâmetros. Para tanto, o método de Kline-McClintock também foi utilizado, tal como expresso na equação a seguir:

$$u_{\phi} = \pm \sqrt{\left[\left(\frac{d\phi}{d\dot{V}_{ar}} \right) u_{\dot{V}_{ar}} \right]^2 + \left[\left(\frac{d\phi}{d\dot{V}_{comb}} \right) u_{\dot{V}_{comb}} \right]^2} \quad (4.3)$$

A incerteza de fundo de escala para os rotâmetros é de 5%. Dessa forma, a incerteza associada ao rotâmetro de ar para a maior vazão utilizada é de 0,2 l/min e a incerteza do rotâmetro de combustível é de 0,15 l/min. Assim, a incerteza de medição devido ao valor da relação de equivalência da mistura ar/combustível é de 7,2%. As derivadas dos fatores levados em consideração na Equação 4.3 são apresentadas no Apêndice II deste trabalho.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. COMPORTAMENTO DE f_v EM RELAÇÃO À ALTURA MEDIDA NA CHAMA

As medições foram realizadas de acordo com o procedimento descrito na seção 4.1. Os valores de f_v obtidos em diferentes alturas, h , a partir da base da chama, estão expressos em ppm e as alturas, em milímetros. A Figura 5.1 apresenta um infográfico que mostra os valores de f_v ao longo da chama para diferentes relações de equivalência:

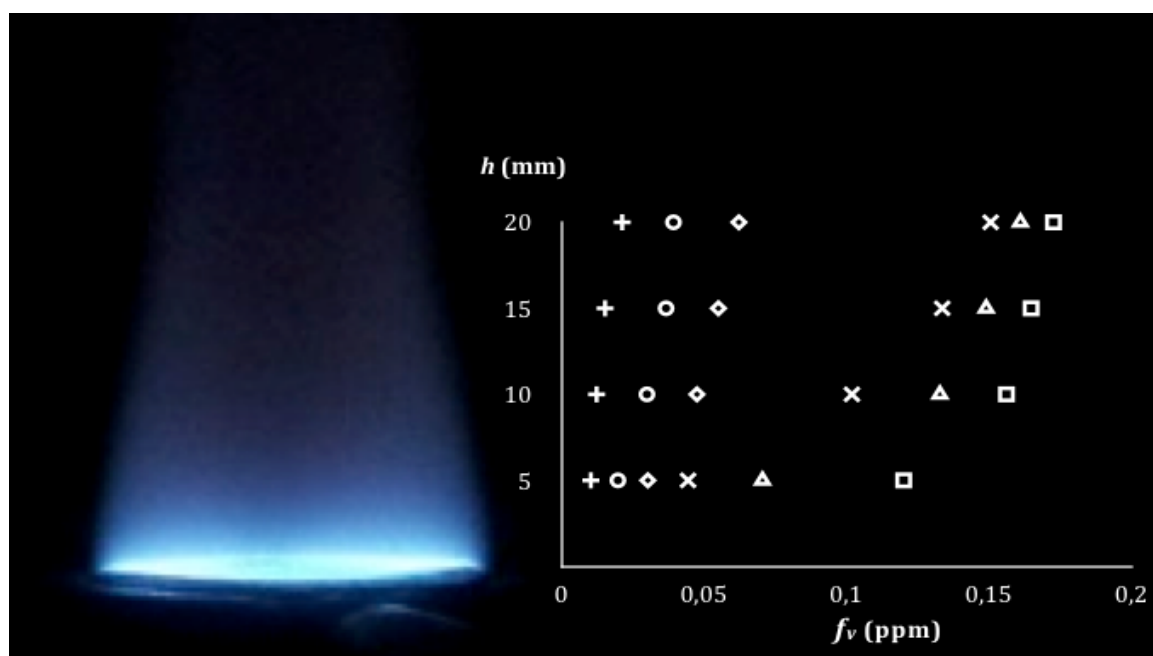


Figura 5.1 – Valores de f_v em relação à h , medidas a partir da base da chama. O símbolo (+) corresponde a $\phi=1,5$, (●) a $\phi=2$, (◇) a $\phi=2,44$, (x) a $\phi=4$, (Δ) a $\phi=5,3$ e (□) a $\phi=8$.

As medidas não foram possíveis na base das chamas, $h=0$, devido à baixa concentração de fuligem. Isto corrobora com o fato da queima ser estequiométrica nesta região.

O valor de f_v apresentou variação ao longo da chama, aumentando de acordo com a altura, a partir da base em que foi realizada a medição. Um crescimento mais acentuado de f_v foi notado até $h \approx 15$ mm, onde a quantidade de fuligem aumenta até 300% para relações de equivalência acima de 4. A partir desta altura o aumento no valor de f_v não passa de 20%. Isto se deve ao fato de que a fuligem produzida na base da chama, em maior parte, passa a ser oxidada, ou seja, consumida no topo da chama.

O comportamento observado pode ser entendido considerando que a alta temperatura dos gases provenientes da combustão causa a coagulação das moléculas de carbono. Este fenômeno acarreta na formação dos precursores da fuligem (PAH), os quais passam em seguida pelo processo de nucleação, formando assim o material particulado. O processo de geração de fuligem observado no experimento obedece os passos descritos na Figura 3.1.

O maior valor de f_v , 0,172 ppm, é observado para a chama de relação de equivalência $\phi=8$, o qual foi obtido na maior altura de medição considerada, de 20 mm. Esta tendência se repetiu para todas as configurações de chama.

5.2. COMPORTAMENTO DE f_v EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO DE EQUIVALÊNCIA DA MISTURA

Nesta seção os resultados de f_v medidos para as diferentes relações de equivalência da mistura são considerados. A Figura 5.2 ilustra o comportamento da quantidade de fuligem produzida em diferentes posições ao longo das chamas:

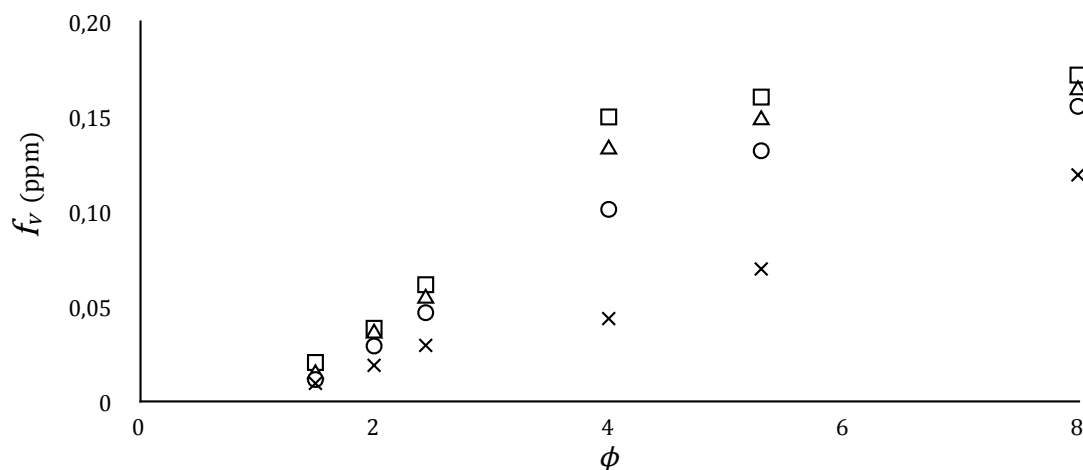


Figura 5.2 – Relação entre a f_v formada para cada ϕ utilizado. O símbolo (x) representa as alturas de medição à 5 mm, (O) 10 mm, (Δ) 15 mm e (\square) 20 mm, a partir da base da chama.

Valores de ϕ menores que 1,5 são considerados críticos (ϕ_c), pois praticamente não há formação de fuligem, conforme a literatura [D'Anna et al., 2008; Melton et al., 1998]. Portanto, medições de f_v foram realizadas para $\phi \geq 1,5$. Os valores de f_v para esta faixa de relação de equivalência resultaram, de fato, em valores muito baixos e, conseqüentemente, com incertezas muito altas.

Em chamas com relação de equivalência de $\phi \approx 2$ até $\phi \approx 4$ foi observado um aumento brusco nos valores de f_v . Este aumento foi maior tanto quanto o h tomando na medição foi incrementado. Este comportamento era esperado e está de acordo com o resultado apresentado na seção anterior. Isto ocorre devido ao excesso de combustível em quantidades

cujas condições da chama são capazes de converter as moléculas de carbono contidas no combustível gasoso em partículas de fuligem.

A partir de valores de relação de equivalência $\phi \approx 4$ há uma redução na taxa crescimento de f_v , assim como observado para a altura de medição, porém, por efeitos diferentes dos de oxidação. Este comportamento é atribuído às configurações da chama, as quais não atingem potência, área e temperatura suficientes para a produção de fuligem. O restante do combustível é liberado na forma de gases não queimados na exaustão.

A afirmação sobre a diminuição do crescimento de f_v para chamas muito ricas foi baseada nas características do queimador e no cheiro proveniente do combustível presente durante as medições para essas configurações de chama. Um analisador de gás ou uma técnica de mapeamento de combustível seria útil para confirmar esta afirmação, porém tais alternativas não estão disponíveis no laboratório.

5.3. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM A LITERATURA

Os resultados de f_v obtidos neste trabalho foram comparados com trabalhos relacionados disponíveis na literatura, os quais realizaram estudos experimentais e/ou modelagens numéricas. Os resultados de f_v foram normalizados para permitir a comparação devido ao fato de não haver publicações com as mesmas condições e/ou combustível utilizado neste trabalho.

Além disso, como foi discutido na seção anterior, existe um valor crítico para a relação de equivalência da mistura, ϕ_c . Somente a partir deste valor que a formação de fuligem começa a ser observada. Este valor crítico foi utilizado para expressar as relações de equivalência dos diferentes trabalhos em termos absolutos.

Os trabalhos selecionados para a comparação de resultados experimentais foram Melton et al., 1988, D'Anna et al., 2008 e Hadeef et al., 2010. O primeiro utilizou etileno como combustível e os outros dois, metano. Porém, em configurações de chama diferentes às do presente trabalho.

O trabalho de Pinto, 2013, também foi utilizado como base de comparação. Este desenvolveu um modelo de formação de fuligem em um reator de mistura perfeita, utilizando como combustível o n-heptano.

A Figura 5.3 ilustra os resultados normalizados de f_v , em relação à relação de equivalência da mistura, $\phi - \phi_c$, em valores absolutos. Foram utilizados sempre os valores máximos de f_v .

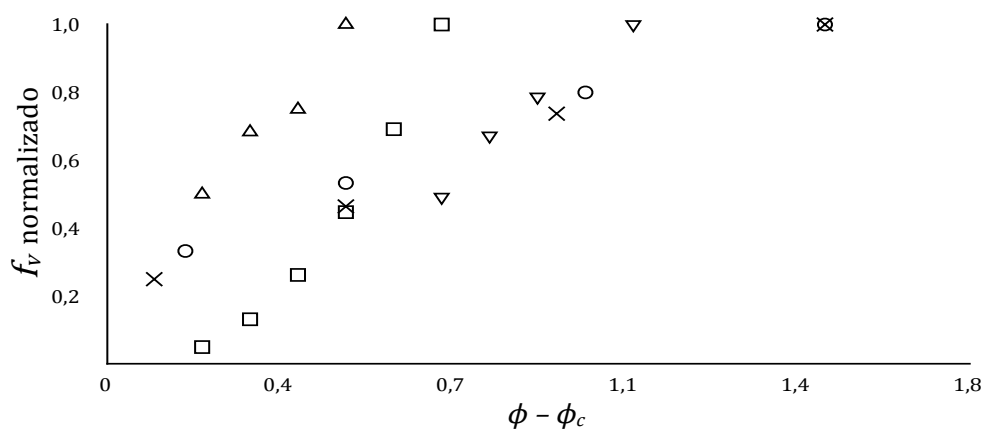


Figura 5.3 – Valores de f_v normalizados em função da relação de equivalência ($\phi - \phi_c$) medidos neste trabalho (x), em comparação aos resultados de D'Anna et al., 2008 (Δ), Hadeef et al., 2010 (□), Melton et al., 1998 (∇) e Pinto, 2013 (○).

O comportamento é semelhante em todos os trabalhos, onde a fração de volume de fuligem aumenta à medida que há incremento na relação de equivalência da mistura.

O aumento de f_v ocorreu de forma mais brusca nos resultados experimentais obtidos por Melton et al., 1988, D'Anna et al., 2008 e Hedef et al., 2010. Este comportamento é devido à configuração das chamas. Os trabalhos da literatura utilizaram queimadores do tipo McKenna em seus experimentos. Este queimador é capaz de produzir chamas de alta potência, a partir de elevadas vazões de combustível. Esta característica forma chamas concentrada em um pequeno volume e atingem altas temperaturas, o que favorece a formação de fuligem. Ao contrário, o queimador disponível para este trabalho gera chamas de baixa potência, porém importantes para a validação de modelos. Assim, não há condições propícias para a formação de fuligem, nem mesmo para as relações de equivalência mais altas, como 8.

Os resultados de f_v deste trabalho foram comparados aos resultados de Pinto, 2013. Um comportamento muito semelhante foi observado, apesar das condições distintas em que foram obtidos. O coeficiente de correlação entre os resultados é de 99%.

A curva contendo o comportamento dos resultados medidos neste trabalho, os quais podem ser vistos na Figura 5.3, pode ser descrita pela equação a seguir, com o coeficiente de ajuste $R^2=0,95$:

$$f_v = 0,26e^{0,98(\phi-\phi_c)} \quad (5.1)$$

A Equação 5.1 pode ser utilizada para o cálculo de valores intermediários ou em pontos além da faixa de medição utilizadas neste trabalho, a fim de servir de base para estudos futuros que visam simular a produção de fuligem no mesmo queimador empregado neste experimento.

6. DIFICULDADES ENCONTRADAS

O laser disponível para as medições apresentou variação na intensidade da luz emitida, provavelmente pelo fato de ser alimentado por uma fonte que não garantiu total estabilidade durante seu uso.

A forte presença de poeira no laboratório foi outro motivo que causou incertezas na medição, pois como o feixe de luz laser sofre interferência no caminho óptico, a intensidade medida é diferente da emitida.

Outro fator a ser considerado é o queimador. O dispositivo utilizado gera chamas de pouca potência, o que contribui para a baixa formação de fuligem. Isto dificulta as medidas de f_v e impede uma comparação direta com estudos realizados por outros autores.

Também foi observado que as chamas geradas pelo queimador apresentaram grande tendência a se tornarem difusivas, fugindo assim das características de chama propostas a serem estudadas neste trabalho. Este fato, aliado a presença de correntes de ar no laboratório, dificultaram as medições da espessura da chama.

Além das medições de f_v utilizando GNV como combustível, estudos comparativos queimando acetileno eram previstos. Estas configurações de chama não puderam ser estudadas devido à falta de equipamento necessário para garantir a segurança. Válvulas anti-retorno de chama pela linha não estavam disponíveis, assim a integridade do queimador quando utilizado o acetileno não pode ser garantida, devido às altas temperaturas geradas na combustão deste combustível.

7. CONCLUSÕES

A técnica de extinção de luz laser é um meio viável para a medição da fração de volume de fuligem produzida em chamas planas pré-misturadas.

Não houve incidência de formação de fuligem para medições realizadas na base da chama, pois a combustão é estequiométrica nesta região.

Os valores de f_v aumentaram substancialmente para medições realizadas em alturas de até 15 mm, a partir da superfície do queimador. Este comportamento é coerente com os mecanismos de formação da fuligem. Para valores de h maiores que 15 mm, o crescimento de f_v tende a estabilizar, devido à oxidação do material particulado gerado.

Os resultados sobre a relação de f_v com a relação de equivalência das misturas mostraram que a quantidade de fuligem aumenta de maneira exponencial com a riqueza da mistura. Este comportamento ocorreu para valores de relação de equivalência até aproximadamente 4.

Para misturas com relação de equivalência maior que 4, o excesso de combustível não queimado é liberado nos gases de exaustão, justificando a tendência de estagnação na produção de material particulado para misturas muito ricas.

O uso da técnica de extinção de luz laser para a determinação da fração de volume de fuligem mostrou comportamento semelhante aos resultados obtidos experimentalmente por Melton et al., 1988, D'Anna et al., 2008 e Hedef et al., 2010, quando comparados por meio de valores normalizados.

Na comparação ao modelo teórico desenvolvido por Pinto, 2013, a tendência do aumento de f_v em relação à mistura utilizada apresentou resultados coerentes. A correlação entre os resultados dos dois estudos é de 99%.

Uma equação representativa do comportamento da formação de fuligem em função da relação de equivalência da mistura obtida neste trabalho foi proposta. Os resultados a partir desta equação apresentam um fator de correlação de 0,95. As próximas pesquisas que necessitem dos valores de f_v intermediários ou além da faixa de medida neste trabalho poderão utilizar a relação, considerando a incerteza de 5%.

As medições de f_v deste trabalho servirão de base para outros estudos do grupo de combustão da UFRGS, tal como a validação do modelo numérico de formação de fuligem que está sendo desenvolvido em parceria com uma universidade na Holanda, pelo aluno de doutorado Leonardo Zimmer.

Além disso, trabalhos de simulação numérica num reator de mistura perfeita utilizando gás natural como combustível podem se beneficiar dos resultados deste trabalho para validação dos modelos. São recomendados para trabalhos futuros a utilização do método de extinção de luz para a medição de fuligem por outros combustíveis e em queimadores do tipo McKenna, a fim de permitir uma comparação direta dos valores de f_v com a literatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Appel J., Jungfleisch B., Marquardt M., Suntz R. e Bockhorn H.; **“Assessment of Soot Volume Fractions from Laser-Induced Incandescence by Comparison with Extinction Measurements in Laminar, Premixed, Flat Flames”**, Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, p. 2387–2395, 1996.

Appel J., Bockhorn H., Wulkow M.; **“A detailed numerical study of the evolution of soot particle size distributions on laminar premixed flames”**, Chemosphere 42, p. 635-345, 2001.

Barreta L. G.; **“Imaging of Laser-Induced Fluorescence in an Ethanol Atmospheric Flame”**, XXX Encontro Nac. de Física da Matéria Condensada, 2007.

Bosschaart, K.J.; **“Analysis of the heat flux method for measuring burning velocities”**, Technische Universiteit Eindhoven, 2002.

Choi M. Y., Mulholland G. W., Hamins A., Kashiwagi T.; **“Comparison of the Soot Volume Fraction using Gravimetric and Light Extinction Techniques”**, Combustion and Flame, 102, p.161-169, 1995.

D’Anna, A., Sirignano, M., Commodo, M., Pagliara, R. e Minutolo, P.; **“An Experimental and Modelling Study of Particulate Formation in Premixed Flames Burning Methane”**, Combustion and Science Technology, 180, p. 950-958, 2008.

Fox, R.W.; McDonald, A.T. and Pritchard, P.J.; **“Introduction to Fluid Mechanics”**, John Wiley & Sons, INC. 6th edition, 2004.

Frencklach, M., Clary, D.W. e Remachandra, M.K.; **“Shock Tube Study of the Fuel Structure Effects on the Chemicals Kinectical Mechanisms Responsible for Soot Formation”** Part II, NASA Contract. Rep. No. 174880, 1995.

Glassman, I.; **“Combustion”**, 2nd ed, Academic Press Inc., p. 360-385, 1987.

Hadef, R., Geigle, K.P, Meier, W. e Aigner, M.; **“Soot characterization with laser induced incandescence applied to a laminar premixed ethylene-air flame”**, International Journal of Thermal Sciences 49, p. 1457-1467, 2010.

Holman, J.P.; **“Experimental Methods for Engineers”**, McGraw-Hill Int. Editions, 6 ed. Sigapure, p. 616, 1994.

Japar S.M., Szkarlat A.C.; **“Measurement of diesel vehicle exhaust particulate using photoacoustic spectroscopy”**, Combustion Science and Technology 24, p. 215–219, 1981.

Jennings S.G., Pinnick R.G.; **“Relationships between visible extinction, absorption and concentration of carbonaceous smoke”**, Atmospheric Environment 14, p.1123–1129, 1980.

Klassen, M., Gore J.P.; **“Temperature and soot volume fraction statistics in toluene-fired pool fires”**, Combust. Flame, p. 270–278, 1993.

Melton, T. R., Vincitore, A. M. e Senkan, S. M.; **“The Effects os Equivalence Ratio on the Formation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Soot in Premixed Methane Flames”**, Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, p. 1631–1637, 1998.

Mulholland G.W.; **“Smoke production and properties”**, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, vol. 2. NFPA, p. 2-258–2-268, 2002.

Mulholland, G. W., Henzel, V., e Babrauskas, V.; **“Proceedings of the Second International Symposium on Fire Safety Science Hemisphere”**, New York, p. 347, 1989.

Mulholland, G.W. e Bryne,r N.P.; **“Comparison of a Fractal Smoke Optics Model with Light Extinction Measurements”**, Atmospheric Enviroment Vol. 28, p. 889-897, 1994.

Pinto, O. O. **“Estudo Teórico da Formação de Fuligem na Combustão do N-heptano”** Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

Roessler D.M., Faxvog F.R.; **“Opacity of black smoke: calculated variation with particle size and refractive index”**, Applied Optics 18, p. 1399–1403, 1979.

Taylor, J. R.; **“An Introduction to Error Analysis”**. 2nd edition, University Science Books, p. 166- 168, 1997.

Santoro, R. J., Yeh, T.T., Horvath J. J. e Semerjian, H.G.; **“The transport and growth of soot particles in laminar diffusion flames”**, Combust. Sci. Technol. 53, p. 89–115, 1987.

Santoro, R. J., Semerjin, H.G., Dobbins, R.A.; **“Soot particle measurements in diffusion flames”**, Combustion and Flame 51, p. 203-218, 1983.

Santos A. A. B.; **“Influência do Teor de O₂ e da Velocidade do Ar na Formação da Fuligem em Chmas Difusas de Acetileno com Escoamento Anular Paralelo do Oxidante”**, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 144p. Dissertação (Mestrado), 2001.

Scherer, H.C., Kittalson, Dolan D.F.; **“Light absorption measurements of diesel particulate matter”**, SAE Paper 810181, Society of Automotive Engineers, 1982.

Schmidt, I. A.; **“Análise Experimental para Medição de Velocidades de Chama de Gases à Pressão Atmosférica”**. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

Strik, J.; **“Flamelet Generated Manifolds to Model Auto-ignition, Combustion and Pollutants in HDDI Diesel Engines”**, Master Thesis, Eindhoven University of Technology, 2010.

Tran M.K., Dunn-Rankin D., Pham T.K.; **“Characterizing sooting propensity in biofuel–diesel flames”**, Combustion and Flame 159, p. 2181–2191, 2012.

Yang B., Koylo U. O., **“Detailed soot field in a turbulent non-premixed ethylene/air flame from laser scattering and extinction experiments”**, Combustion and Flame 141, p. 55-65, 2005.

Zhao H., Ladommatos N.; **“Optical diagnostics for soot and temperature measurement in diesel engines”** Progress in Energy and Combustion Science 24, Issue 3, p. 221-255, 1998.

APÊNDICE I

Aplicação do método de Chauvenet - a média (\bar{X}) e o desvio padrão (S_x) dos resultados foram calculados através das equações abaixo:

$$\bar{X} = \sum_{i=0}^n \frac{x_i}{n} \quad (1.1)$$

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (1.2)$$

O desvio absoluto (S) foi calculado por:

$$S = x_i - \bar{X} \quad (1.3)$$

O valor d_{lim} foi calculado através da equação a seguir. O valor de $(d/s)_{crítico}$ é tabelado e pode ser consultado no Anexo II deste trabalho.

$$d_{lim} = S_x \times (d/s)_{crítico} \quad (1.4)$$

Se $S \leq d_{lim}$, a medida não foi considerada discrepante; se $S > d_{lim}$, a medida foi rejeitada e uma nova média e desvio padrão foram obtidos.

APÊNDICE II

Para o cálculo da incerteza das medições de f_v , as derivadas dos termos utilizados na Equação (4.2) estão abaixo relacionadas:

$$\frac{df_v}{dx} = \frac{\lambda}{k_e x^2} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (II.1)$$

$$\frac{df_v}{dk_e} = \frac{\lambda}{k_e^2 x} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (II.2)$$

$$\frac{df_v}{dI_0} = \frac{\lambda}{k_e x} \ln\left(\frac{1}{I_0}\right) \quad (II.3)$$

$$\frac{df_v}{dI} = -\frac{\lambda}{k_e x} \ln\left(\frac{1}{I}\right) \quad (II.4)$$

$$\frac{df_v}{d\lambda} = \frac{1}{k_e x} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (II.5)$$

Para o cálculo da incerteza de medição de ϕ , as derivadas dos termos utilizados na Equação (4.3) estão dispostos a seguir:

$$\frac{d\phi}{d\dot{V}_{ar}} = \frac{1}{\dot{V}_{comb}} \quad (\text{II.5})$$

$$\frac{d\phi}{d\dot{V}_{comb}} = -\frac{\dot{V}_{ar}}{\dot{V}_{comb}^2} \quad (\text{II.6})$$

APÊNDICE III

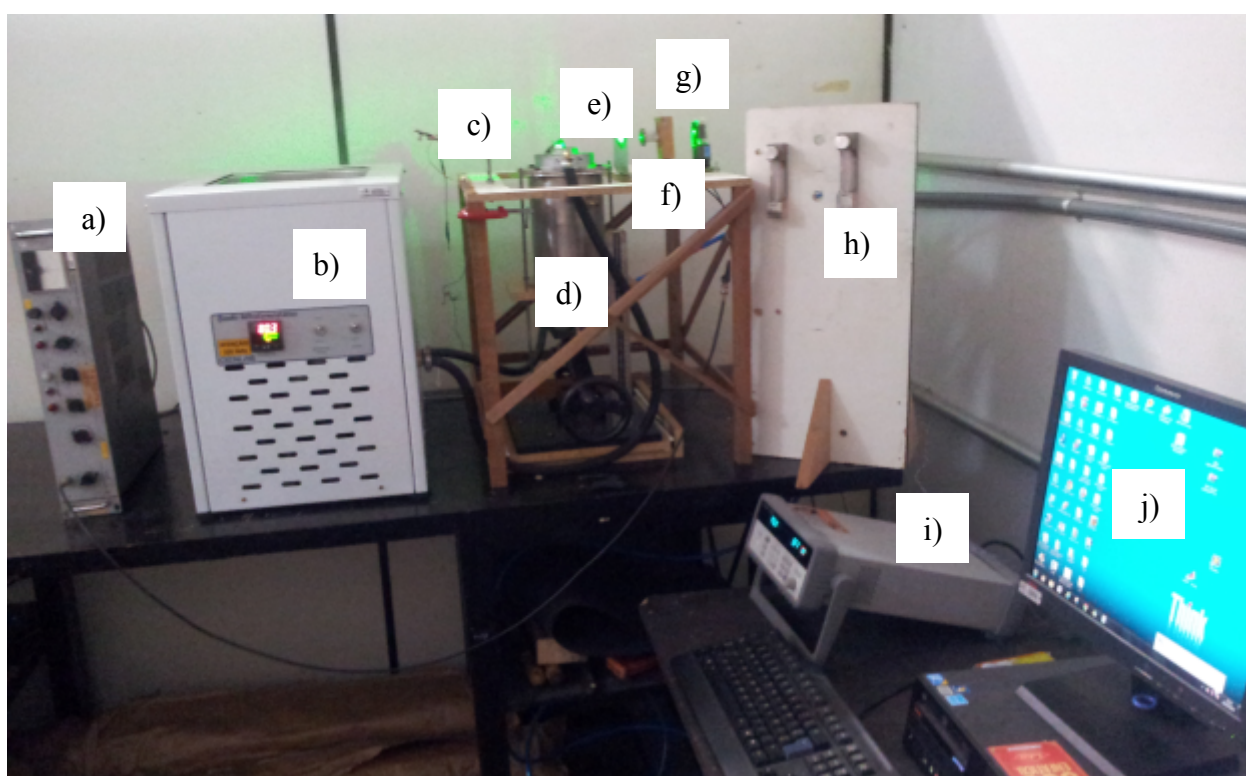


Figura (III.1) – Imagem *in loco* do aparato experimental, onde: a) fonte de alta tensão, b) banho térmico para aquecimento de água, c) laser, d) queimador, e) anteparo, f) lente cilíndrica, g) tubo fotomultiplicador, h) rotômetros, i) *data logger* e j) computador.

ANEXO I

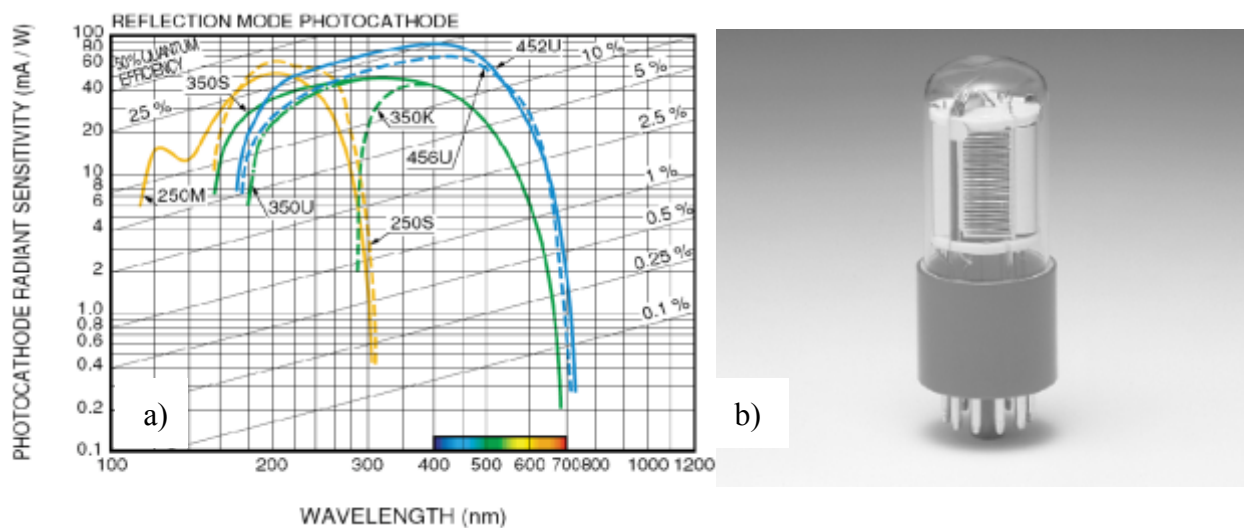


Figura (I.1) – a) gráfico da eficiência radiante do tubo fotomultiplicador e b) imagem do tubo fotomultiplicador.

ANEXO II

Tabela I.1 – Valores de $(d/s)_{\text{crítico}}$ utilizados na aplicação do método de Chauvenet [adaptado de Uberti, 2006].

n	$(d/s)_{\text{crítico}}$	n	$(d/s)_{\text{crítico}}$
5	1,65	20	2,24
6	1,73	22	2,28
7	1,80	24	2,31
8	1,86	26	2,35
9	1,92	30	2,39
10	1,96	40	2,50
12	2,03	50	2,58
14	2,00	100	2,80
16	2,06	200	3,02
18	2,20	500	3,29