

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

ESTUDO QUANTITATIVO DA PRODUÇÃO DE FULIGEM EM CHAMAS LAMINARES DE  
ETILENO NÃO PRÉ-MISTURADAS E PARCIALMENTE PRÉ-MISTURADAS

por

Thiago Gardin Fernandes

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, dezembro de 2016.

ESTUDO QUANTITATIVO DA PRODUÇÃO DE FULIGEM EM CHAMAS LAMINARES DE  
ETILENO NÃO PRÉ-MISTURADAS E PARCIALMENTE PRÉ-MISTURADAS

por

Thiago Gardin Fernandes

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. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Dr. Eng. Fernando Marcelo Pereira

Co-Orientador: Prof. MSc. Eng. Diego Soares

Comissão de Avaliação:

Prof<sup>a</sup>. Dra. Adriane Prisco Petry

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin

Prof<sup>a</sup>. Dra. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, dezembro de 2016.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, acima de tudo, a toda minha família, meu pai Silvio dos Santos Fernandes, minha mãe Neida Gardin Fernandes e minha irmã Marília Gardin Fernandes, por todo o amor, carinho, e suporte que me deram durante todos esses anos de graduação, enfrentando junto comigo a distância que nos separou do convívio diário, e também são merecedores desta conquista.

Agradeço ao meu orientador Fernando Marcelo Pereira pelo acompanhamento e por todos os ensinamentos durante o decorrer deste projeto, assim como no período em que fui seu aluno de iniciação científica no Laboratório de Combustão.

Agradeço ao meu co-orientador Diego Soares, que auxiliou no meu aprendizado durante o período de iniciação científica no Laboratório e Combustão, e me acompanhou no desenvolvimento da teoria e da técnica no decorrer deste trabalho.

Agradeço a Isaiás Mortari, Bruno Exner, Amanda Celli Cascaes e a todos os integrantes do Laboratório de Combustão pelas contribuições que fizeram no desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso.

Agradeço a todos meus amigos de Tapera, de Porto Alegre e da turma do intercâmbio em Montreal, que foram parte importante no meu desenvolvimento durante todo o período que estive na graduação.

Agradeço à UFRGS e ao Laboratório de Combustão por toda sua estrutura e professores, que contribuíram para minha formação através de seus conhecimentos e experiências.

Agradeço a todas as pessoas as quais conheci e convivi durante os últimos seis anos e que contribuíram direta ou indiretamente para minha formação como Engenheiro Mecânico.

FERNANDES, T. G. **Estudo Quantitativo da Produção de Fuligem em Chamas Laminares de Etileno Não Pré-Misturadas e Parcialmente Pré-Misturadas**. 2016. 27 páginas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

## **RESUMO**

Sabe-se que partículas de fuligem, provenientes da combustão incompleta de combustíveis fósseis, podem provocar impactos na saúde dos seres humanos e no meio ambiente. Deste modo, mostra-se pertinente o estudo para quantificação da produção desses particulados em chamas de gases derivados do petróleo. No presente trabalho, foi feita a aplicação da técnica de extinção de luz para a determinação da quantidade de fuligem produzida em chamas laminares não pré-misturadas e parcialmente pré-misturadas de etileno. Os resultados para uma estimativa da distribuição radial destas partículas em torno do eixo de simetria da chama foram determinados através de um modelo matemático utilizando a transformada de Abel, calculados numericamente. Foi feita a comparação com dados obtidos na literatura, provenientes de estudos realizados utilizando-se os mesmos parâmetros das chamas e das técnicas para quantificação e distribuição da fração volumétrica de fuligem. Os resultados apresentaram um bom comportamento qualitativo em comparação à literatura, atestando a correta aplicação da transformada de Abel, assim como os resultados quantitativos, contemplando todos os objetivos do trabalho.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fuligem, Extinção de luz, Transformada de Abel, Chamas laminares.

FERNANDES, T. G. **Quantitative Study of Soot production in non-Pre-Mixed and Partially Pre-Mixed Ethylene Laminar Flames**. 2016. 27 pages. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

## **ABSTRACT**

It is known that soot particles from incomplete combustion of fossil fuels can induce an impact on human beings health and on the environment. In this sense, the study for quantification of the production of these particulates in flames of gases coming from petroleum is relevant. In the present work, the technique of light extinction was applied for the determination of the amount of soot present in non-premixed and partially premixed ethylene laminar flames. The results for an estimation of radial distribution of these particles around the flame axis of symmetry were determined by a mathematical model using a numerically calculated Abel transform. A comparison with data obtained in literature, from studies conducted using the same flame parameters and the same techniques for quantification and distribution of soot volumetric fraction, was done. The results presented a good qualitative behavior compared to the literature, attesting the correct application of the Abel transform, as well as the quantitative results, reaching all work objectives.

**KEYWORDS:** Soot, Light extinction, Abel transform, Laminar flames.

## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVO .....	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	1
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	2
4.1. Tipos de chamas .....	2
4.2. Fuligem.....	3
4.3. Extinção de luz .....	4
4.4. A transformada de Abel .....	5
5. MÉTODO .....	7
5.1. Aparato experimental.....	7
5.2. Parâmetros experimentais .....	8
5.3. Medições .....	9
6. RESULTADOS .....	10
7. CONCLUSÕES .....	15
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	16
APENDICE A – Código numérico em MATLAB para cálculo da transformada de Abel .....	17
APÊNDICE B – Resultados de fração volumétrica de fuligem para $\varnothing = 24$ , $\varnothing = 15$ e $\varnothing = 10$ .....	17
APÊNDICE C – Comparação dos resultados normalizados de fração volumétrica de fuligem .	20
APÊNDICE D – Análise de incertezas.....	21

## 1. INTRODUÇÃO

Com o início da Revolução Industrial, em meados do século XVIII, os combustíveis fósseis passaram a ser utilizados amplamente como meio de fornecer energia para a movimentação das primeiras máquinas a vapor das indústrias. Inicialmente, o carvão foi utilizado como matriz energética, mas com o avanço da indústria petrolífera, em meados do século XIX, muitos derivados do petróleo e o gás natural passaram a ser empregados na geração de energia em diversos segmentos da indústria e da sociedade. Hoje, biocombustíveis vêm ganhando cada vez mais espaço na matriz energética mundial, sendo um dos principais caminhos na transição para uma economia sustentável. A queima de forma incompleta de combustíveis gera fuligem como subproduto, provocando impactos na sociedade. É sabido que partículas de fuligem menores do que 300 nm penetram profundamente nos alvéolos dos pulmões e, devido a suas propriedades físico-químicas, geram um impacto negativo sobre a saúde humana, podendo gerar problemas respiratórios e até ensejar o desenvolvimento de cânceres [Wilson, 1996]. Tais partículas também contribuem para a ocorrência mudanças climáticas em nosso planeta, tendo em vista o seu papel na formação de nuvens de alta altitude, assim como promovem o derretimento acentuado das calotas polares, com a deposição destas partículas sobre o gelo, alterando a relação entre a luz absorvida e refletida nos polos. Por tais razões, a legislação de emissões de poluentes tem se intensificado sobre os processos de queima de combustíveis em todo o mundo, e temas como a formação e oxidação da fuligem e sua interação com os processos e o meio têm sido foco de pesquisas [Jacobson, 2001]. Neste trabalho, realizou-se um estudo experimental para quantificação da fuligem formada em chamas de etileno. As aplicações de estudos como este visam a aperfeiçoar o entendimento sobre a produção de fuligem e contribuir para o banco de dados utilizáveis para a validação de modelos numéricos.

## 2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é a aplicação da transformada de Abel para uma estimativa da distribuição radial da fuligem em torno do eixo de simetria, aplicado à chamas laminares não pré-misturadas e parcialmente pré-misturadas de etileno. Para tal, é utilizada a técnica de extinção de luz, a qual fornece dados quantitativos e independentes de calibração, porém, sem resolução espacial.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Santoro *et al*, 1983, realizaram medições de frações volumétricas de fuligem em chamas difusivas de etileno em diversas alturas acima do queimador, em um queimador do tipo Santoro, variando-se a vazão do combustível. O trabalho apresentou, também, estudos para determinação do tamanho médio das partículas de fuligem e a caracterização da região de crescimento da partícula e da zona de reação, utilizando a teoria de Rayleigh para a dispersão da luz através da absorção de partículas.

Smith *et al*, 1988, detalharam a transformada de Abel e a reformulação desta através das transformadas de Fourier e Hekel, apresentando cada termo da transformação. Demonstraram, também, como reduzir os efeitos do ruído nos dados das medições, como determinar o eixo de simetria e como espelhar os dados sobre o eixo determinado. O trabalho faz também uma comparação de resultados experimentais e numéricos.

Mcenally *et al*, 1998, realizaram um estudo experimental e computacional em chamas difusivas de etileno com diluição com gás nitrogênio. O queimador utilizado tem o bico injetor de combustível com diâmetro de 4 mm, cercado por um tubo de 50mm de diâmetro, que forma a cortina de ar responsável por estabilizar a chama. Um modelo matemático de produção e

crescimento de fuligem foi detalhado pelos autores com a finalidade de investigar a formação de fuligem nessas chamas. Técnicas óticas (Rayleigh e LII) foram utilizadas para fins de medição da temperatura, espécies de gases e as frações volumétricas de fuligem.

Arana *et al*, 2004, realizaram um estudo qualitativo da produção de fuligem em chamas não pré misturadas e pré-misturadas de etileno. Os dados foram obtidos por meio do emprego da técnica de extinção de luz e as medições foram realizadas varrendo-se a chama em planos horizontais em diversas alturas acima do queimador. A transformada de Abel foi aplicada para projeção da distribuição radial da fração volumétrica de fuligem. Os resultados foram demonstrados variando-se o coeficiente adimensional de extinção, para fins de comparação com a literatura já existente.

Sapmaz, 2006, em sua tese de doutorado, fez o estudo da fração volumétrica de fuligem em chamas difusivas não pré-misturadas de etileno, estáveis e pulsantes, através da técnica LII, em um queimador do tipo Santoro. A calibração, para quantificação da técnica LII, foi feita pelo emprego da técnica de extinção de luz, combinada com a aplicação da transformada de Abel, para projeção da distribuição radial da fração volumétrica de fuligem.

Jans, 2008, em sua dissertação de mestrado, aplicou a técnica de extinção de luz na queima de biocombustíveis líquidos vaporizados em uma câmara de alta pressão, e a distribuição espacial da fração volumétrica de fuligem foi realizada através da transformada de Abel. Os resultados foram validados com dados obtidos através da técnica de LII (*Laser Induced Incandescence*) e calculados através de modelagem numérica.

Soares, 2016, em sua dissertação de mestrado, aplicou a técnica LII, para a obtenção de resultados qualitativos da produção de fuligem em chamas laminares não pré-misturadas de gás natural diluídas com nitrogênio ou dióxido de carbono, em um queimador do tipo Santoro. Obteve também resultados quantitativos da fração volumétrica de fuligem em chamas laminares pré-misturadas de etileno e ar, em um queimador do tipo McKenna, utilizando a técnica LII e a técnica de extinção de luz.

## 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1. Tipos de chamas

As chamas podem ser divididas em dois grupos distintos: chamas pré-misturadas e chamas não pré-misturadas. O grupo de chamas pré-misturadas distingue-se por apresentar o combustível e o oxidante já previamente misturados à nível molecular. Este grupo de chamas tem uma dada razão de equivalência da mistura  $\phi$ , definida pela Equação 4.1.

$$\phi = \frac{\left(\frac{n_c}{n_{ox}}\right)}{\left(\frac{n_c}{n_{ox}}\right)_{estequiométrico}} \quad (4.1)$$

onde  $n_c$  é o número de moles do combustível e  $n_{ox}$  é o número de moles do oxidante presentes na mistura, como definido por Turns, 2000. Em casos onde o  $\phi > 1$ , há um excesso de combustível, caracterizando uma mistura “rica” em combustível. Em casos onde o  $\phi < 1$ , há um excesso de oxidante, caracterizando uma mistura “pobre” em combustível. Por sua vez, o grupo de chamas não pré-misturadas caracteriza-se pelo fato de o combustível ser injetado separadamente do oxidante. À medida que o combustível escoar ao longo do eixo da chama, este se difunde para o meio oxidante (no caso mais comum o ar), e o oxidante difunde-se radialmente para dentro da chama. Deste modo, as chamas desse grupo são denominadas difusivas e a zona de reação se forma onde ocorre o encontro do combustível com o oxidante, formando zonas ricas e zonas pobres no interior da chama. Estas chamas não apresentam uma razão de equivalência de mistura  $\phi$  predefinida [Turns, 2000].



## 4.2. Fuligem

A presença de fuligem é uma característica marcante em chamas difusivas. A incandescência destas partículas consistiu em uma das primeiras formas de fornecer luminosidade para as sociedades que utilizavam, por exemplo, lampiões à diesel como fonte de luz [Turns, 2000]. A formação da fuligem desenvolve-se em chamas ricas em combustível, provenientes de uma mistura rica em hidrocarbonetos ( $\phi > 1$ ). Coelho e Costa, 2007, definem que a formação de fuligem é uma característica predominante em chamas difusivas de hidrocarbonetos, assim como em chamas pré-misturadas, com razão de equivalência acima de um valor crítico,  $\phi_{crit}$ . A Tabela 4.1 traz  $\phi_{crit}$  de alguns combustíveis.

Tabela 4.1 - Valores de  $\phi_{crit}$  para a formação de fuligem em chamas de pré-misturadas

Combustível	$\phi_{crit}$
Etano	1,67
Propano	1,56
Iso-octano	1,45
Etileno	1,82
Propeno	1,67
Benzeno	1,43
Tolueno	1,33

O carbono proveniente deste excesso de combustível, que não é oxidado em virtude da indisponibilidade de oxidante, é convertido em partículas de fuligem [Hadeff, 2004]. A fuligem é composta de partículas agregadas, aproximadamente esféricas, cujos diâmetros variam entre 10 e 40nm, podendo ser observados agregados de até 500 nm [Lahaye, 1990]. A formação das partículas acontece a partir da decomposição química do combustível, e então, procede para o início da pirólise do combustível em temperaturas entre 1300 K e 1600 K [Turns, 2000]. Posteriormente, é observada a formação dos anéis aromáticos, os quais dão origem aos precursores das partículas de fuligem, denominados hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, PAH's (*Polycyclic Aromatic Hydrocarbon*), que são intermediários entre a molécula de combustível e as partículas primárias de fuligem [Glasmann, 1988]. O próximo passo é denominado nucleação, onde ocorre o crescimento planar dos aromáticos policíclicos e a coagulação em partículas esféricas, devido à colisão de dois ou mais núcleos. Na sequência, ocorre a etapa de crescimento superficial destas partículas, devido à coalisão de diferentes espécies de hidrocarbonetos formados no processo que reagem com a superfície da partícula de fuligem [Frenklach, 1990]. É importante frisar que a coagulação e o crescimento superficial acontecem paralelamente, mas apresentam propriedades diferentes, uma vez que a coagulação reduz a densidade do número de partículas, sem afetar a fração volumétrica, ao contrário do que ocorre no crescimento superficial da partícula [Law, 2006]. A Figura 4.1 é uma representação de algumas etapas que ocorrem durante o processo de formação da fuligem.

A emissão de fuligem na chama depende muito do tempo de residência do processo. Ao mesmo tempo em que novas partículas vão sendo formadas no interior da chama, outras já estão em processo de oxidação por gases presentes no meio, como  $O_2$ ,  $O$  e  $OH$ , assim como vapores de água e  $CO_2$ . Dessa forma, dependendo dos parâmetros empregados na queima, como, por exemplo, o tipo e a velocidade do combustível e a razão de equivalência, o processo de combustão pode ou não emitir particulados para o meio ambiente [Law, 2006].

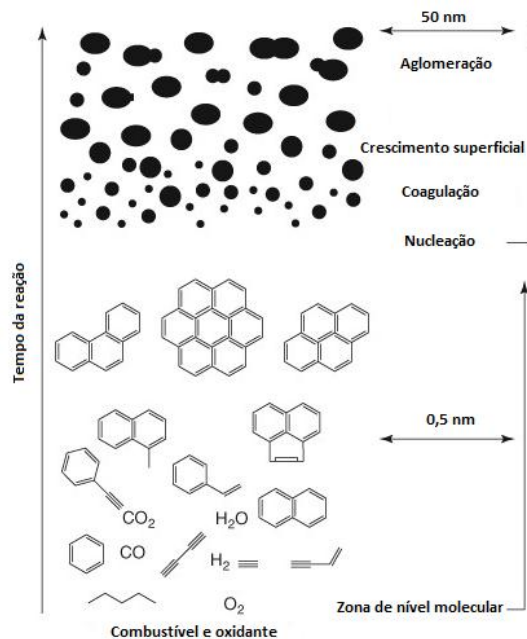


Figura 4.1 - Etapas de formação da fuligem [adaptado de Bockhorn, 1994]

A emissão de fuligem na chama depende muito do tempo de residência do processo. Ao mesmo tempo em que novas partículas vão sendo formadas no interior da chama, outras já estão em processo de oxidação por gases presentes no meio, como  $O_2$ ,  $O$  e  $OH$ , assim como vapores de água e  $CO_2$ . Dessa forma, dependendo dos parâmetros empregados na queima, como, por exemplo, o tipo e a velocidade do combustível e a razão de equivalência, o processo de combustão pode ou não emitir particulados para o meio ambiente [Law, 2006].

A caracterização da fuligem pode ser feita através do cálculo da fração volumétrica, conforme mostra a Equação 4.2,

$$f_v = N \frac{\pi D_p^3}{6} \quad (4.2)$$

onde  $f_v$  é a fração volumétrica de fuligem,  $D_p$  é o diâmetro das partículas primárias e  $N$  é a densidade do número de partículas, considerando as partículas primárias sendo esféricas [Law, 2006]. A quantificação dessas variáveis pode ser feita através de técnicas experimentais como, por exemplo, a captação de partículas por sonda termoforética, com análise em microscopia eletrônica de transmissão, demonstrada em Peng, 2015, e pela técnica de extinção de luz, acompanhada pela técnica LII (*Laser Induced Incandescence*), como aplicada em Soares, 2016.

### 4.3. Extinção de luz

A técnica de extinção de luz é um método empregado para quantificar a intensidade com que uma substância absorve a luz num determinado comprimento de onda, em uma dada densidade em massa ou concentração molar, respectivamente, e assim realizar estudos para determinar populações, concentrações, etc. A aplicação desta técnica, na área da combustão, busca determinar a quantidade de fuligem presente na chama, medindo-se a atenuação do sinal de luz conforme a chama é varrida longitudinalmente pelo feixe de luz laser. A técnica de extinção de luz, visando quantificar a fração volumétrica de fuligem, consiste na detecção da intensidade incidente da luz proveniente do laser ( $I_0$ ) antes de percorrer a chama, e na

detecção da intensidade transmitida ( $I$ ), varrendo-se a chama para diferentes alturas. A Equação de Beer-Lambert (4.3), que relaciona a absorção de luz com as propriedades do meio atravessado por esta, permite o cálculo da fração volumétrica da fuligem no meio.

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -Ke \cdot L \cdot \frac{f_v}{\lambda} \quad (4.3)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda da luz do laser em nm, o  $Ke$  é o coeficiente adimensional de extinção, o  $L$  é o comprimento do percurso em que o feixe de laser percorre dentro da chama e o  $f_v$  é a fração volumétrica das partículas de fuligem no caminho percorrido dentro da chama em partes por milhão (ppm).

O valor do coeficiente adimensional de extinção,  $Ke$ , apresenta grande dispersão em diferentes fontes da literatura. O valor atribuído a esta variável influencia proporcionalmente a transformação da intensidade do sinal medido experimentalmente em fração volumétrica de partículas de fuligem na chama. Santoro, 1983, define o coeficiente adimensional de extinção como na Equação 4.4.

$$Ke = 6\pi E(m) \quad (4.4)$$

Segundo Hadeef *et al.*, 2010, o valor da função de absorção  $E(m)$  depende do índice de refração da fuligem. Este índice apresenta algumas incertezas, uma vez que pode diferir significativamente entre a fuligem de diferentes chamas ou quando comparados diferentes grupos, locais de medição, diferentes combustíveis e tipos de diagnósticos. No entanto, em um estudo abrangente, Krishnan *et al.*, 2000, verificou uma fraca dependência entre tipos de combustíveis e comprimentos de onda. Entre 400 e 1064 nm, os dados para  $E(m)$  encontrados por Krishnan *et al.*, tomando os seus valores e valores obtidos na literatura, voltado para processos utilizando gás etileno ( $C_2H_4$ ), convergem para uma expressão linear, como é atribuído na Equação 4.5, onde o valor da variável  $E(m)$  é definido como

$$E(m) = 0.232 + 1.2546 \times 10^5 \lambda \quad (4.5)$$

Seguindo o cálculo da Equação 4.5, para um comprimento de onda de 633 nm, o valor de  $E(m) = 0,311$  e o coeficiente adimensional de extinção  $Ke = 5,86$ , conforme a Equação 4.4. Na literatura é possível encontrar diversos valores para o  $Ke$ . Choi *et al.*, 1995, determina o valor de  $Ke = 8.6 \pm 1,5$ , obtido através de medições óticas em chamas pré-misturadas de etileno e ar, com  $\varnothing = 2.5$ . Choi *et al.* sugerem que valores no intervalo  $7,1 < Ke > 10,1$  são válidos para fuligem gerada a partir de uma grande gama de hidrocarbonetos e para comprimentos de onda da luz visível e na região do infravermelho. Já Arana *et al.*, 2004, utilizam dois coeficientes de extinção na determinação da fração volumétrica em seus experimentos. O primeiro deles é  $Ke = 4,9$ , que consiste no valor clássico obtido a partir da teoria de Mie. O segundo valor utilizado é  $Ke = 7,1$ , que é correspondente ao limite inferior sugerido por Choi *et al.*, 1995. Segundo Arana *et al.*, 2004, os valores de fração volumétrica obtidos a partir da utilização de  $Ke = 7,1$  estão em melhor acordo com os resultados de Santoro *et al.*, 1983., dentro da tolerância de  $\pm 10\%$ .

Como o índice de refração é uma importante limitação da técnica de extinção de luz, o valor de  $Ke$  deve ser verificado com cautela. A determinação deste interfere diretamente no cálculo da fração volumétrica de fuligem.

#### 4.4. A transformada de Abel

A transformada de Abel é uma forma matemática para converter a integração de uma projeção ou sinal, em uma distribuição em um campo com simetria axial. Enunciada por Niels

Henrik Abel, sua formulação tem relação com as transformadas de Radon, de Hankel e de Fourier, determinando parâmetros em meios com simetria esférica ou axial. Os primeiros estudos feitos, utilizando esta transformação integral, tinham a finalidade de estimar a distribuição de massa em astros presentes na galáxia, obtida a partir da ocultação de ondas de rádio transmitidas pela Terra. Assim, a projeção do sinal sobre um eixo unidimensional pôde ser usada para determinar a sua estrutura radial bidimensional [Binney, 1987].

No estudo com chamas difusivas laminares, o objetivo da utilização da transformada de Abel é obter a distribuição espacial da fração volumétrica da fuligem ao longo do raio da chama. Entretanto, como ocorrem com a maioria dos problemas inversos, as condições experimentais para adquirir os dados geram incertezas quanto ao resultado após a aplicação do método de inversão [Smith, 1988]. Para expressar essa integração da intensidade em certo valor de  $y$ , aplica-se a formulação demonstrada em Smith *et al.*, 1988, e desenvolvida no trabalho de Jans, 2008. Assim, pode-se expressar a função da projeção do sinal integrado, na linha varrida pelo feixe de laser, como mostra a Equação 4.6, onde  $x$  e  $y$  são os eixos do queimador, como apresentados na Figura 4.2.

$$P(y) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\sqrt{x^2 + y^2}) dx \quad (4.6)$$

A Figura 4.2 demonstra a obtenção de pontos para a determinação da função  $P(y)$ , que consiste na função resultante da projeção da integração do sinal em certo valor de  $y$ .

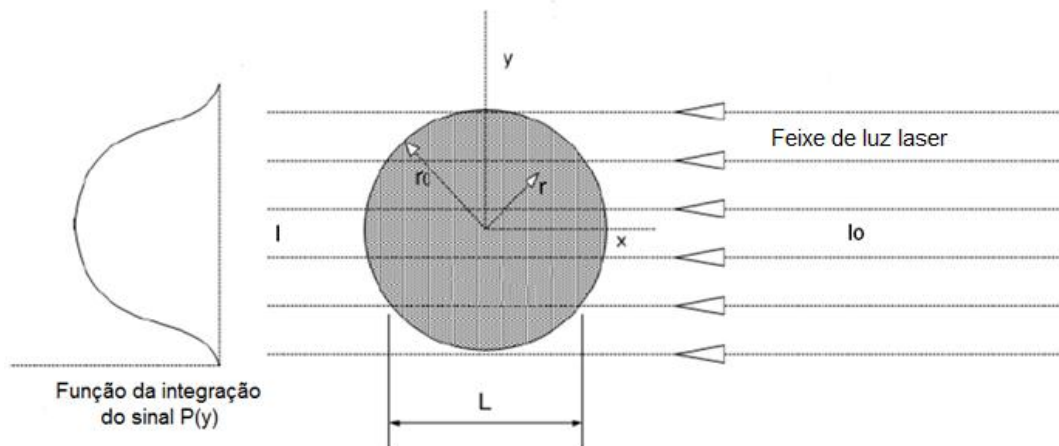


Figura 4.2 - Esquemático das medições através da técnica de extinção de luz [adaptado de Jans, 2008]

Para este caso, utiliza-se a Equação 4.7 para definição de  $P(y)$ , aplicando-se o logaritmo natural no quociente entre a intensidade transmitida e a intensidade inicial.

$$P(y) = \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (4.7)$$

Assim, tem-se a definição completa do modelo matemático, no qual a integração da fração volumétrica de fuligem em uma direção na chama é equivalente ao logaritmo natural da atenuação da luz laser, modulado pelos parâmetros da luz e do meio ( $\lambda/K_e$ ), como demonstrado na Equação 4.8.

$$\int_0^L f_v \cdot dx = \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \frac{\lambda}{K_e} \quad (4.8)$$

Reformulando a Equação 4.6 para os limites finitos da chama e alterando-a para coordenadas cilíndricas, para adequação às medições feitas no presente trabalho, tem-se a Equação 4.9, onde  $r$  é o raio da chama a partir do eixo de simetria.

$$P(y) = 2 \int_{r=y}^{r=r_{max}} \frac{F(r)r}{\sqrt{r^2-y^2}} dr \quad (4.9)$$

Para resolver espacialmente a fração volumétrica de fuligem, aplica-se a seguinte transformada inversa (transformada de Abel), como mostrado na Equação 4.10. Para este cálculo, faz-se necessário calcular a derivada da função  $P(y)$ , e para tanto, é importante observar se a função irá gerar descontinuidades na sua derivação.

$$F(r) = -\frac{1}{\pi} \int_{y=r}^{y=y_i+y_{step}} \frac{P'(y)}{\sqrt{y^2-r^2}} dy \quad (4.10)$$

Como em determinadas funções, suas derivadas podem resultar em números complexos, esta integral, mostrada na Equação 4.10, pode ser resolvida analiticamente para cada segmento da função  $P(y)$ , aplicando-se a Equação 4.11, onde  $y_i$  é a posição do eixo  $y$  instantâneo e  $y_{step}$  é o intervalo entre dois passos de medição no eixo  $y$ .

$$F(r) = \sum_{y_i=r}^{y_i=y_{max}} -\frac{1}{\pi} P'(y_i) \ln \left\{ \frac{y_i+y_{step} + \sqrt{(y_i+y_{step})^2 - r^2}}{y_i + \sqrt{y_i^2 - r^2}} \right\} \quad (4.11)$$

A função  $F(r)$ , multiplicada pelo comprimento de onda do raio laser,  $\lambda$ , e dividida pelo coeficiente adimensional de extinção,  $Ke$ , resulta na distribuição radial da quantidade de fuligem, em ppm. Assim, a aplicação da transformada de Abel apresenta-se como uma ferramenta para facilitar a quantificação da distribuição espacial da fuligem, em um campo axissimétrico na chama, por meio de medições feitas ao longo do eixo solidário ao feixe do laser.

## 5. MÉTODO

### 5.1. Aparato experimental

O aparato experimental utilizado na técnica de extinção de luz é composto por um queimador, um laser contínuo, um sensor de intensidade luminosa para detecção do feixe laser, um filtro ótico para comprimento de onda 632,8 nm, uma lente plano-convexa, um difusor de luz, três controladores de vazão, um osciloscópio digital para leitura do sinal do sensor, como demonstrado na Figura 5.1. A movimentação horizontal e vertical do queimador é feita através de duas mesas de posicionamento.

O queimador utilizado no presente trabalho é do tipo Santoro, como detalhado em Santoro *et al.*, 1983, composto por dois tubos de latão concêntricos, sendo o interno de 11,1 mm de diâmetro e o externo de 101,6 mm de diâmetro. O combustível escoia através do tubo interno e o ar através do tubo anular formado entre os tubos interno e externo, formando uma cortina de ar (*coflow*), que tende a estabilizar a chama e minimizar as interferências causadas pelo ambiente. O combustível e o ar passam por um leito de esferas de vidro de 3,0 mm e por uma sequência de telas (malhas 40 e 70). O ar de proteção passa ainda por uma colmeia cerâmica e o tubo interno estende-se 4 mm para além do plano de saída da colmeia.

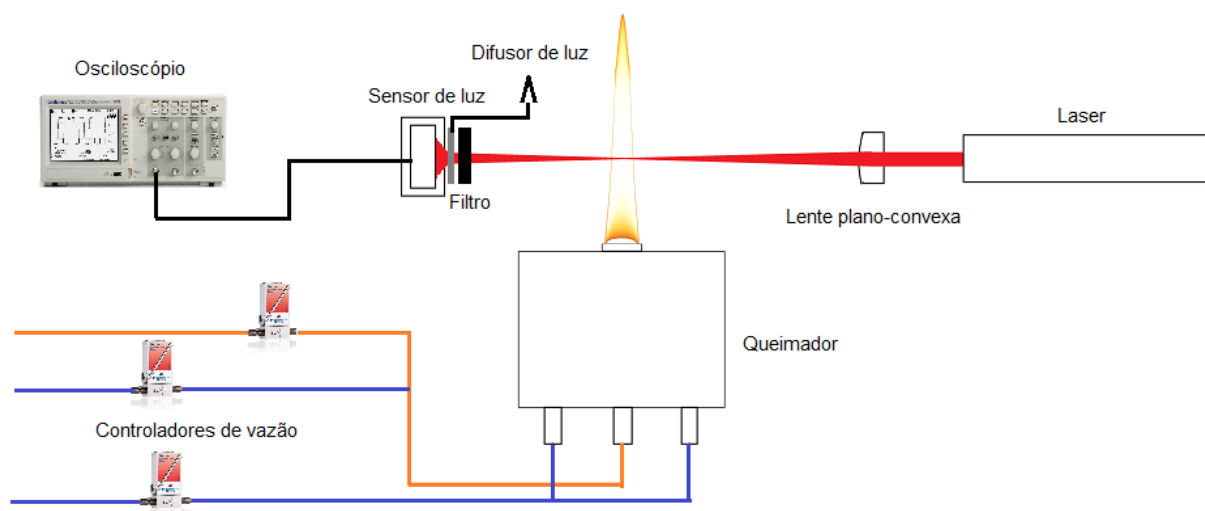


Figura 5.1 – Ilustração do aparato experimental utilizado na realização da técnica de extinção de luz

O laser utilizado no experimento é de gás HeNe, marca Reo, modelo R-30990, com comprimento de onda da luz de 632,8 nm. O diâmetro do feixe é de 0,8 mm e a potência máxima de saída é de 10 mW. O sensor de detecção fotovoltaico é do modelo 818-SL, fornecido pela Newport. Este sensor é empregado para a detecção de luz com comprimentos de onda entre 400 nm e 1100 nm. O osciloscópio utilizado é da marca Tektronix, modelo TDS-2022C. Os controladores de vazão mássica são da série EL 200, fabricados pela Bronkhorst. Cada controlador é calibrado para um tipo de gás, sendo possível a sua utilização com outros gases empregando-se um fator de conversão. Como são utilizados controladores de vazão com calibração para o gás metano ( $\text{CH}_4$ ), foi utilizado o banco de dados do FLUIDAT® para correção dos valores de vazão para etileno e ar. A movimentação da mesa no sentido vertical foi controlada por um paquímetro preso ao sistema, com resolução de 0,01 mm, para determinar em que altura acima do queimador estavam sendo feitas as medições. Já a mesa de posicionamento horizontal continha um fuso embutido no sistema, com resolução de 0,1 mm, para dimensionar a varredura no plano horizontal da chama. A alimentação dos equipamentos foi realizada através de uma fonte elétrica estabilizada, a fim de minimizar os efeitos das oscilações e perturbações nas medições. O ar utilizado foi filtrado e desumidificado através de filtros instalados na linha.

## 5.2. Parâmetros experimentais

Para fins de comparação com estudos previamente feitos por Arana *et al.*, 2004, e Santoro *et al.*, 1983, o presente trabalho utiliza os mesmos parâmetros experimentais destes autores para a vazão de combustível, a vazão de ar no *coflow* e as razões de equivalência de pré-mistura. Estas informações foram obtidas no banco de dados do *International Sooting Flame Workshop*, onde resultados de diversos autores estão disponíveis publicamente. O gás utilizado no processo é o etileno ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ), com 99,5% de pureza. São estudadas chamas laminares não pré-misturadas (NPM) e parcialmente pré-misturadas, com diferentes razões de equivalência ( $\phi = 24$ ,  $\phi = 15$  e  $\phi = 10$ ). As medições nas chamas são realizadas através de varreduras, no plano horizontal, com intervalo de 0,25 mm e em diversas alturas acima do queimador (20, 30, 40, 50 e 60 mm), como demonstrado na Figura 5.2.

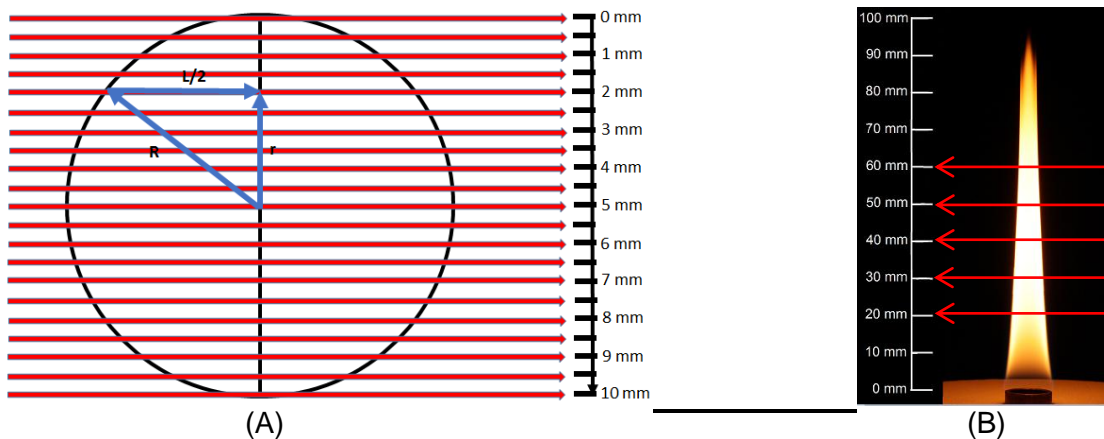


Figura 5.2 - Ilustração das medições realizadas nas chamas, no plano horizontal (A) e nas alturas acima do bico do queimador (B)

Para a construção das chamas, a vazão de combustível ( $V_{comb}$ ) utilizada foi de 0,231 l/min (3,85 cm<sup>3</sup>/s e velocidade de 3,98 cm/s), e mantida constante para todas as chamas. A vazão de ar no *coflow* é de 42,7 l/min (713,3 cm<sup>3</sup>/s e velocidade de 8,90 cm/s) e as vazões de ar na pré-mistura, para cada razão de equivalência, são demonstradas na tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Vazões de combustível e ar para cada razão de equivalência estudada

$\phi$	$V_{comb}$ (l/min)	$V_{ar}$ (l/min)
NPM	0,231	0
24	0,231	0,143
15	0,231	0,228
10	0,231	0,342

### 5.3. Medições

O procedimento de medição consistiu na obtenção do valor da intensidade inicial da luz do laser ( $I$ ) e da intensidade transmitida ( $I_0$ ), nas diferentes alturas anteriormente descritas, varrendo-se a chama horizontalmente com intervalo de 0,25 mm. Para cada condição da razão de equivalência, foi mensurada a influência da luminosidade da chama medida pelo sensor de luz, e os valores referentes a esta luminosidade foram subtraídos dos valores de  $I$  e  $I_0$ . O uso do filtro ótico para comprimento de onda 632,8 nm, assim como o uso de um dispositivo com orifício de 1 (um) mm de diâmetro à frente do sensor de luz, contribuiu para minimizar a influência de oscilações e interferências causadas pela luminosidade da chama. Para cada razão de equivalência, deixou-se o queimador operando durante cinco minutos antes do início das medições, para possibilitar uma estabilização da temperatura no sistema. Utilizou-se um exaustor de ar no ambiente, entre uma varredura e outra, para a retirada de partículas que se dispersam no ar durante as medições, e que poderiam interferir no resultado atenuando a intensidade obtida pelo sensor de luz. Os valores para  $I$  e  $I_0$  foram determinados a partir da média de 128 valores obtidos pelo osciloscópio, após a estabilização da chama devido à movimentação da mesa de posicionamento horizontal. O coeficiente de extinção foi mantido constante para o calculo, em todos os casos, estabelecido o valor de  $Ke = 7,1$ , como indica Arana *et al.*, 2004.

O trabalho dividiu-se em duas etapas. A primeira etapa consistiu em medições nas chamas não pré-misturada e parcialmente pré-misturadas ( $\phi = 24$ ,  $\phi = 15$  e  $\phi = 10$ ) de etileno e ar. O aparato experimental e os parâmetros utilizados durante essa primeira etapa estão descritos nos itens 5.1 e 5.2 deste trabalho, respectivamente. Após a verificação de

inconsistências nos resultados obtidos nesta primeira configuração, foram feitas modificações no aparato experimental. Adicionou-se uma lente convergente (plano-convexa), com distância focal de 200 mm, para proporcionar a diminuição do diâmetro do laser no interior da chama. Em uma segunda bateria de medições, mantiveram-se os mesmos parâmetros de medição utilizados anteriormente. Nesta etapa, foram feitas medições apenas na chama não pré-misturada.

A comparação visual entre as diferentes chamas apresentadas no trabalho é feita através de fotografias, assim como a determinação da espessura da chama ( $L$ ) atravessada pelo laser, utilizando-se uma câmera digital Canon EOS Rebel T5i. Os parâmetros da câmera para todas as fotos obtidas, tanto das chamas como do paquímetro para dimensionar e padronizar as fotos, foram mantidos. A posição da câmera permaneceu estática durante a realização de todas as fotos. A velocidade do obturador foi mantida em 4 (quatro) ms e o ISO da câmera foi estabelecido em 800.

Os resultados obtidos pela técnica de extinção de luz, somados aos parâmetros experimentais e aos raios das chamas em cada altura acima do queimador, resultantes das imagens obtidas pela câmera, foram inseridos no código numérico em MATLAB, para obtenção dos resultados da distribuição espacial da quantidade de fuligem nas chamas através da transformada de Abel. Os dados de extinção obtidos foram ajustados à curvas, utilizando-se o *Curve Fitting*, do próprio MATLAB, todas com  $R^2 > 0,98$ , para determinação da função  $P(y)$ .

## 6. RESULTADOS

Primeiramente, para efeito de comparação visual entre as chamas e, também, para fins de tomada de alguns parâmetros essenciais para o cálculo da fração volumétrica, foram capturadas imagens de alta resolução de cada uma das chamas estudadas nesse trabalho (chama não pré-misturada e chamas parcialmente pré-misturadas, com  $\varnothing = 24$ ,  $\varnothing = 15$  e  $\varnothing = 10$ ). Os parâmetros obtidos através destas fotografias foram: a altura de cada plano varrido pelo laser acima do queimador e o diâmetro nominal correspondente a cada altura de medição, para determinação do raio. Todas as fotografias foram obtidas mantendo-se os mesmos parâmetros de captura da câmera (como definido no item 5.3 deste trabalho), assim como a posicionamento desta, e as chamas foram dimensionadas através de uma imagem feita de um paquímetro, posicionado no eixo central do queimador, mantendo-se as mesmas condições de posicionamento da câmera. As fotografias de cada chama, devidamente dimensionadas, são apresentadas na Figura 6.1.

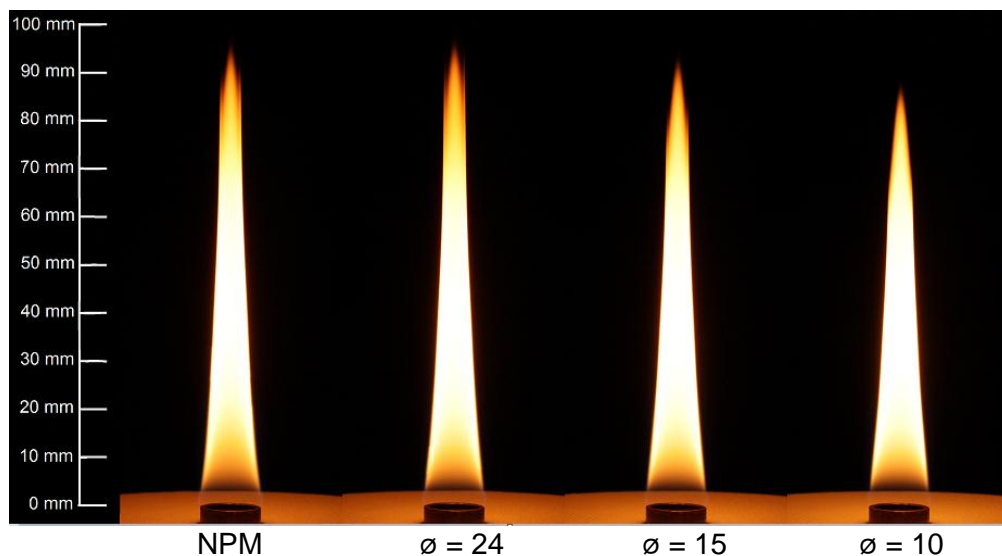


Figura 6.1 - Fotografia das chamas estudadas, com parâmetro dimensional.

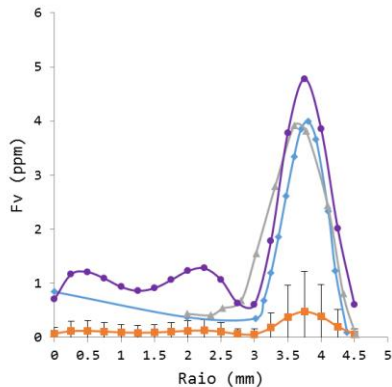


Os raios da chama correspondente a cada altura foram atribuídos através da contagem de *pixels*. Assim, utilizando a imagem feita com o paquímetro, determinou-se que cada 177 *pixels* correspondiam a 10 mm. Assim, com a escala dimensional, contou-se para cada altura acima do queimador (AAQ) a diferença entre o primeiro e último pixel com iluminação clara (em contraste com o fundo preto), determinando-se o diâmetro da chama em cada ponto. Dividindo-se este valor à metade, determinou-se o raio da chama, apresentados na tabela 6.1, para serem aplicados no cálculo da fração volumétrica de fuligem, como demonstra a Equação 4.11.

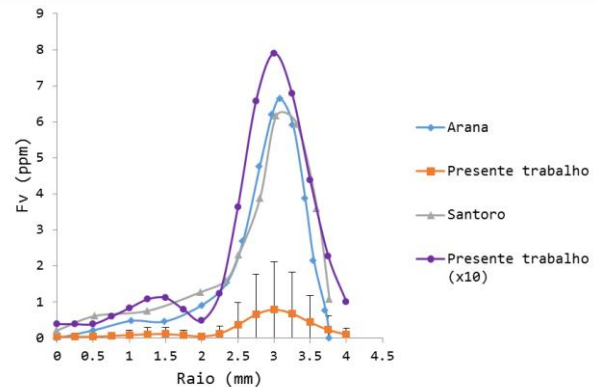
Tabela 6.1 - Raio das chamas para cada altura acima do queimador (AAQ)

AAQ (mm)	r ( $\varnothing = \text{NPM}$ )	r ( $\varnothing = 24$ )	r ( $\varnothing = 15$ )	r ( $\varnothing = 10$ )
20	4,63 mm	4,63 mm	4,60 mm	4,57 mm
30	4,03 mm	4,03 mm	4,01 mm	4,01 mm
40	3,58 mm	3,53 mm	3,52 mm	3,50 mm
50	3,11 mm	3,02 mm	3,02 mm	2,95 mm
60	2,68 mm	2,68 mm	2,67 mm	2,65 mm

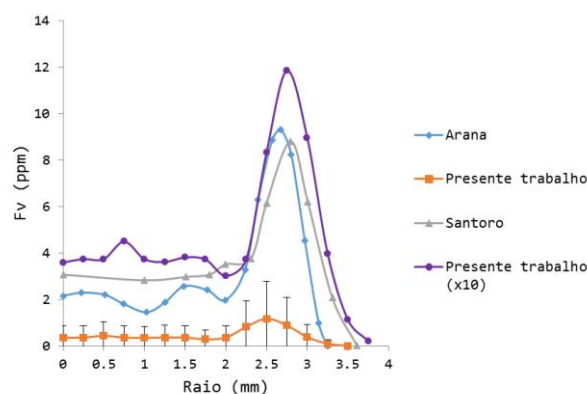
Realizada a primeira bateria de medições, utilizando o aparato experimental conforme ilustrado na Figura 5.1, mas sem a utilização da lente convergente a frente do laser e sem o difusor de luz a frente do sensor, obtiveram-se os seguintes resultados de fração volumétrica de fuligem ( $f_v$ ) para cada altura acima do queimador, como mostrado na Figura 6.2, que apresenta resultados para a chama não pré-misturada. Valores de  $f_v$  para as chamas com razão de equivalência  $\varnothing = 24$ ,  $\varnothing = 15$  e  $\varnothing = 10$  encontram-se no APÊNDICE B (Figuras B.1, B.2 e B.3, respectivamente).



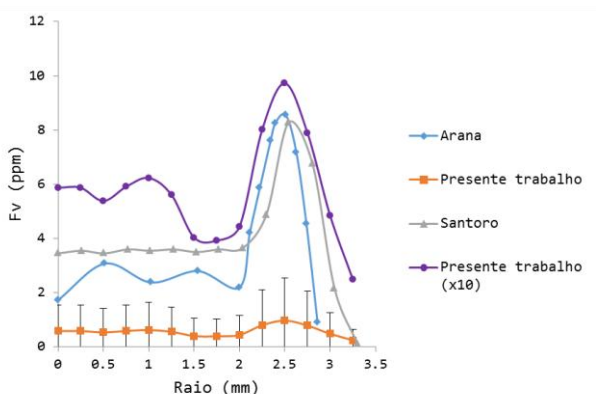
(a)



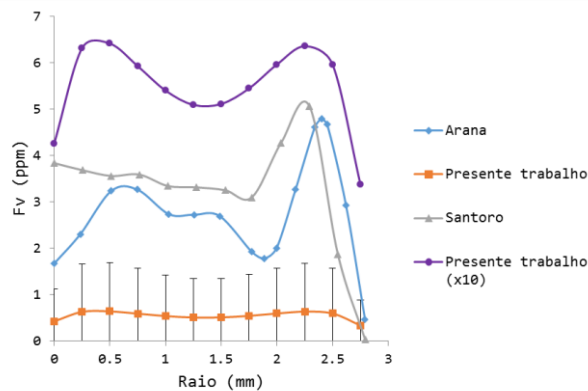
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 6.2 - Comparação da fração volumétrica de fuligem para uma chama não pré-misturada com a de Santoro *et al*, 1983 e Arana *et al*, 2004, em diferentes alturas acima do queimador (AAQ). De (a) até (e) correspondem respectivamente a AAQ = 20, 30, 40, 50 e 60 mm.

Os resultados obtidos para fração volumétrica de fuligem, ao longo do raio da chama através da aplicação do modelo numérico para cálculo da transformada de Abel (detalhado no APÊNDICE A), divergiram em uma escala aproximadamente 10 vezes menor em relação aos descritos na literatura (Santoro *et al*, 1983 e Arana *et al*, 2004). Mesmo com o cálculo das incertezas, demonstrado no APÊNDICE D e através das barras de erro nos gráficos, os valores encontrados para  $f_v$  por Santoro *et al*, 1983 e Arana *et al*, 2004 não ficaram inseridos no intervalo de incerteza para os valores encontrados neste trabalho. Devido a isto, verificaram-se os possíveis parâmetros que poderiam estar influenciando a obtenção de resultados congruentes com a literatura durante o processo experimental. Primeiramente, fez-se a verificação do código numérico, para que se tivesse a clareza de que os resultados não estavam sendo calculados erroneamente, observando-se as unidades de conversão e as etapas de cálculo para determinação do resultado da fração volumétrica de fuligem. A fim de comparar e validar os resultados obtidos, foram analisados dados experimentais apresentados por Jans, 2008, (captados via *software WebPlotDigitizer*), pois tal trabalho utiliza o mesmo método de cálculo e detalha os resultados da extinção e os resultados de  $f_v$  calculados através da transformada de Abel, para cada um de seus experimentos. A comparação entre os resultados apresentados por Jans, 2008, e os resultados deste calculados pelo código numérico deste trabalho, para uma mesma atenuação do sinal de luz do laser, dispostos no gráfico da Figura 6.3.

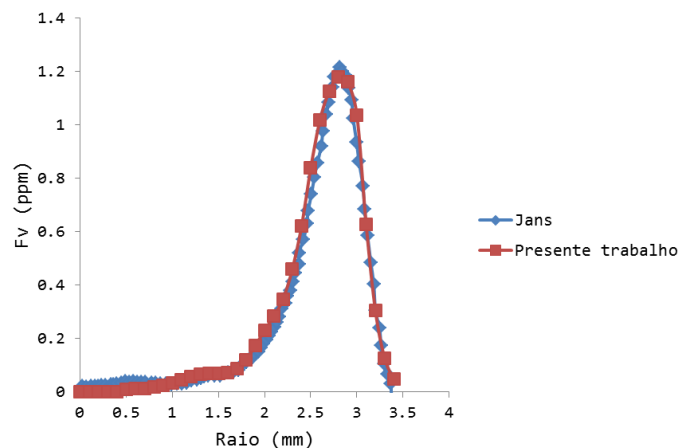
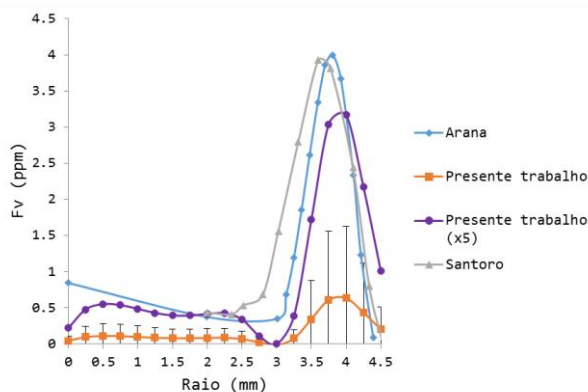


Figura 6.3 - Comparação entre os resultados apresentados por Jans, 2008, e os resultados de extinção de Jans, 2008, calculados pelo código numérico deste trabalho.

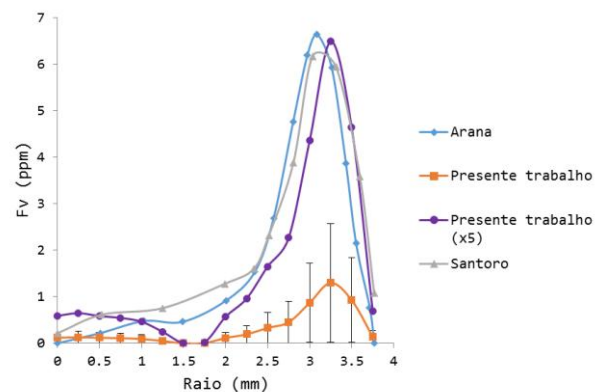
Como demonstrado na Figura 6.3, os resultados de ambos os códigos convergem para uma resposta muito próxima, atestando que eventual falha não está relacionada ao método matemático aplicado computacionalmente.

Descartando-se, portanto, a possibilidade de terem ocorridos erros na modelagem numérica, a segunda suposição para a possível falha reside no fato de que o diâmetro do laser, de 0,8 mm, cobre quase toda a região de interesse onde ocorre o pico de concentração de fuligem. Como o cálculo da transformada de Abel pondera linearmente o resultado pela derivada da curva  $P(y)$  (Equação 4.7), multiplicando o valor desta diretamente a cada ponto da curva, a atenuação do sinal na região onde ocorre o pico de concentração de partículas de fuligem, resulta em uma média dos valores varrido pelo feixe de laser. Assim, com esta disposição do aparato experimental, não foi possível refinar esta região de interesse, e obter resultados pontuais de atenuação do sinal da luz do laser, para que houvesse um ponto de alta atenuação do feixe de luz, resultando em uma grande derivada entre dois pontos próximos.

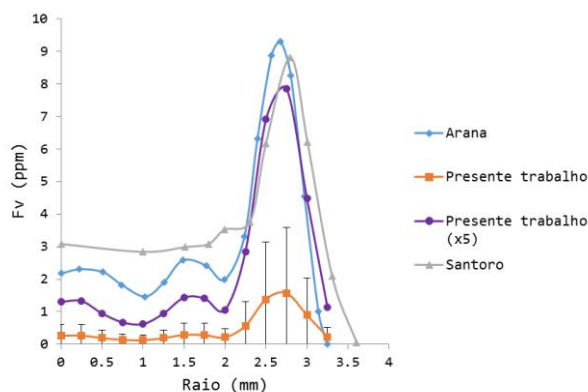
Devido à hipótese exposta acima, para a segunda tomada de medições, utilizou-se no aparato experimental uma lente plano-convexa no caminho entre o laser e o queimador, como descrito no item 5.3 deste trabalho, para convergir o feixe de luz no centro do queimador e diminuir o diâmetro do feixe de laser que passa pela chama. Assim, o diâmetro do feixe do laser no interior do queimador ficou na faixa de 22  $\mu\text{m}$ . Foram feitas novas medições, desta vez somente na chama não pré-misturada, na tentativa de validar esta hipótese. Com a redução do diâmetro do feixe de laser que passa no interior da chama, mantendo-se os mesmos parâmetros de medições descritos no item 5.2 deste trabalho, foram obtidos os seguintes resultados para a fração volumétrica de fuligem, demonstrados na Figura 6.4.



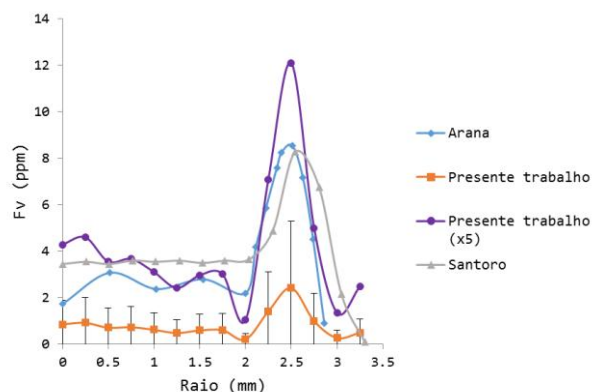
(a)



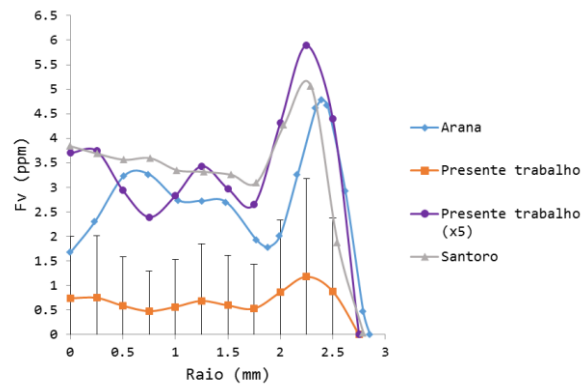
(b)



(c)



(d)

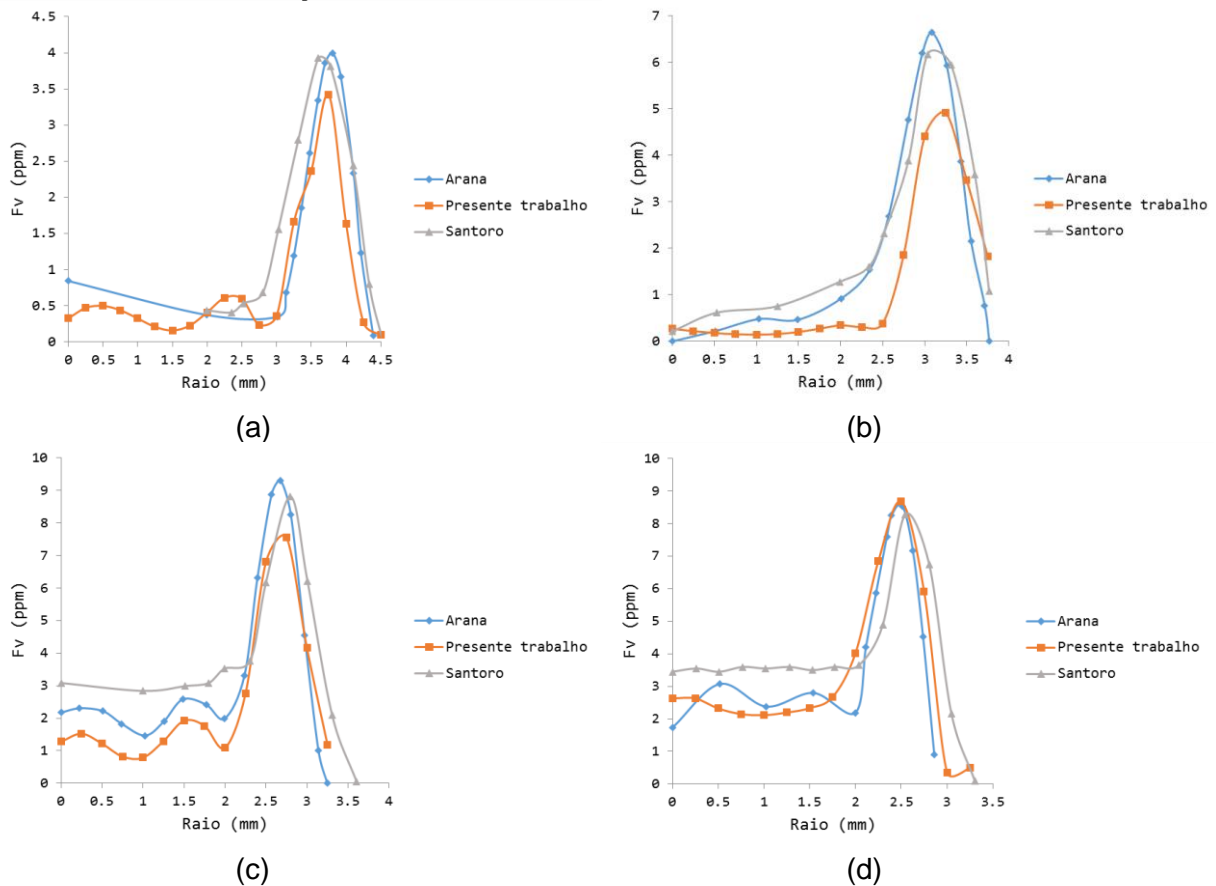


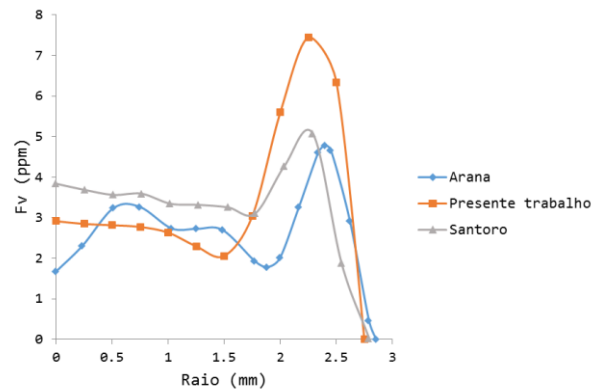
(e)

Figura 6.4 - Comparação da fração volumétrica de fuligem para uma chama não pré-misturada com a de Santoro *et al*, 1983 e Arana *et al*, 2004, em diferentes alturas acima do queimador (AAQ). De (a) até (e) correspondem respectivamente a AAQ = 20, 30, 40, 50 e 60 mm.

Os valores, que anteriormente apresentavam discrepância na ordem de 10 (dez) vezes menores, após a modificação no aparato experimental com a aplicação da lente, divergiram em valores na faixa de 5 (cinco) vezes menores em comparação com a literatura. Quando comparados os dados normalizados deste trabalho com os da literatura, também normalizados (APÊNDICE C), encontra-se uma concordância para a distribuição radial de fuligem.

Para a terceira etapa de medições, colocou-se um difusor de luz a frente do sensor, como mostra a Figura 5.1, para que uma maior área do sensor de luz fosse iluminada. O intuito dessa modificação foi dissipar a energia do laser para que nenhum ponto do sensor saturasse e dificultasse a leitura da luminosidade da luz do laser. Os resultados encontrados após esta terceira bateria de medições são mostrados na Figura 6.5.





(e)

Figura 6.5 - Comparação da fração volumétrica de fuligem para uma chama não pré-misturada com a de Santoro *et al*, 1983 e Arana *et al*, 2004, em diferentes alturas acima do queimador (AAQ). De (a) até (e) correspondem respectivamente a AAQ = 20, 30, 40, 50 e 60 mm.

## 7. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos durante as duas primeiras baterias de testes, mesmo com a limitação dos equipamentos e montagem, apresentaram um comportamento qualitativamente condizente para a fração volumétrica de fuligem, quando comparados com os dados de Santoro *et al*, 1983 e Arana *et al*, 2004, como mostram os dados normalizados apresentados no APÊNDICE C, assim como na ocasião em que foi aplicado o fator de multiplicação 10 vezes, no experimento sem a lente convergente, quanto na ocasião em que o fator de multiplicação de 5 vezes foi empregado no experimento com a lente convergente. Isso demonstra que a aplicação da transformada de Abel foi realizada com êxito e o desvio nos resultados é fruto da imprecisão experimental. Já os resultados, após a terceira etapa de medições, com a colocação do difusor de luz no aparato experimental, apresentaram valores congruentes aos da literatura para quantificação de fuligem, além do comportamento similar para a distribuição radial da fuligem no raio da chama. Apesar dos desafios encontrados, pontos positivos podem ser extraídos do presente trabalho, como a proposta da construção de uma bancada experimental com maior grau de precisão e o emprego de equipamentos que proporcionem parâmetros que venham a contribuir para a solução das falhas verificadas durante a realização deste projeto.

## 8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

É fundamental a utilização de um par de lentes convergentes iguais (de mesma distância focal), ou até mesmo um colimador (esta seria a melhor opção), para que seja possível a diminuição do diâmetro do feixe de laser, permitindo assim, um refinamento das regiões no interior das chamas, visto que mudanças bruscas nas concentrações de fuligem ocorrem em um espaço de milésimos de milímetros.

Indica-se, ainda, a utilização de uma lente difusiva na entrada do sensor, para que a área iluminada deste seja a maior possível, visto que o fabricante indica que há uma melhor captação e resolução dos resultados com o aumento da área iluminada do sensor fotovoltaico.

Com a utilização de uma mesa de posicionamento, tanto horizontal quanto vertical, de alta precisão e automatizada, que já está em processo de construção para o Laboratório de Combustão, espera-se a obtenção de resultados mais promissores e precisos na repetição deste experimento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arana, C.P., Pontoni, M., Sen, S., Puri, I.K., **“Field Measurements of Soot Volume Fractions in Laminar Partially Premixed Coflow Ethylene/Air Flames”**, Combustion and Flame 138 (2004), p. 362–372.
- Binney, J. and Tremaine, S., **“Galactic Dynamics”**, Princeton, NJ: Princeton University Press, p. 651, 1987.
- Bockhorn, H. **Soot formation in Combustion**. Berlin: Springer-Verlag, 1994.
- Coelho, M., Costa, M., **Combustão**, Edições Orion, 1ª edição, 714 p. 2007.
- Choi, M., Mulholland, G.W., Hamins, A., Kashiwagi, T. **Combust. Flame** 102 (1995) p. 161.
- Frenklach, M., Wang, H. **“Detailed Modeling of Soot Particle Nucleation and Growth”**, Twenty-Third Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, 1990/pp. 1559-1566.
- Glassman, I. **“Soot Formation in Combustion Processes”**, Symposium (International) on Combustion, v. 22, n. 1, p. 295-311, 1988.
- Hadef, R.; Geigle, K. P.; Meier, W.; Aigner, M. **“Soot Characterization with Laser Induced Incandescence Applied to a Laminar Premixed Ethylene-air Flame”**. International Journal of Thermal Sciences, v. 49, p. 1457-1467, 2010.
- Jacobson, M.Z., **“Strong Radiative Heating Due to the Mixing State of Black Carbon in Atmospheric Aerosol”**, Nature 409 (2001), 695 E 697.
- Jans, G.T., **“Development of an Experimental Setup for Soot Volume Fraction Measurements in Laminar Diffusion Flames of Gaseous and Liquid (Bio)-Fuels”**, thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, October 2008.
- Krishnan, S.S., Lin, K.C., Faeth, G.M. **“Optical Properties in the Visible of Overfire Soot in Large Buoyant Turbulent Diffusion Flames”**, Journal of Heat Transfer 122 (2000) 517e524.
- Lahaye, J. Mechanisms of Soot Formation, Polymer Degradation and Stability 30 (1990) pp. 111-121.
- Law, C. K. **Combustion Physics**. New York: Cambridge University Press, 2006, p. 26-28.
- Mcenally, C. S., Schaffer, A. M., Long, M. B., Pfefferle, L. D., Smooke, M. D., Colket, M. B., Hall, R. J., **“Computational and Experimental Study of Soot Formation in a Coflow, Laminar Ethylene Diffusion Flame”**, Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, 1998, pp. 1497–1505.
- Peng, F. B. **“Projeto e construção de sistema de captação de partículas por sonda termofóretica para análise morfológica da fuligem produzida em chamas de difusão”**, 2015, Monografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.
- Santoro, R. J., Semerjian, H. G., Dobbins, R. A., **“Soot Particle Measurements in Diffusion Flames”**, Combustion and Flame 51 (1983), pp 203-218.
- Sapmaz, H. S., **“Soot Measurements in Steady and Pulsed Ethylene/Air Diffusion Flames Using Laser-Induced Incandescence”**, Florida International University, Electronic Theses and Dissertations, Paper 31, 2006.
- Smith, L. M., Keefer, D. R., Sudharsanan, S. I., **“Abel Inversion Using Transform Techniques”**, J. Quant. Spectrosc. Radial Transfer, Vol. 39, No. 5, pp. 367-373, 1988.
- Soares, D., **“Estudo Experimental da Produção de Fuligem em Chamas Laminares”**, Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Fevereiro de 2016.
- Turns, S.R. **“An Introduction to Combustion: Concepts and Applications”**, McGraw-Hill Education, 2 edition, 676 p., 2000.
- Wilson, R., Spengler, J. D. **“Particles in our Air: Concentrations and Health Effects”**, Harvard University Press, Cambridge, USA, 1996.

## APENDICE A – Código numérico em MATLAB para cálculo da transformada de Abel

O Código numérico abaixo é uma adaptação do código desenvolvido por Jans, 2008, e constam dados de um dos experimentos realizados durante este trabalho, para exemplificar a atribuição da função que define os pontos obtidos através da técnica de extinção de luz ( $P(y)$ ).

```

clc;
clear all;
close all;
% Parâmetros
lambda = 632.8;           % Comprimento de onda do laser em nm
ke = 7.1;                 % Coeficiente adimensional de extinção
R = 4.25;                 % Raio da chama em mm
ybegin = 0;               % Começo dos dados em y
ystep = 0.25;            % Passo em y em mm
ymax = R;                 % Valor máximo de y
y1 = (ybegin:ystep:ymax)'; % Número de dados no vetor x
%Função P(y1)
P = %%Função P(y1) dos pontos obtidos na extinção%%
yas = [ystep:ystep:ymax]; % Número de dados no vetor y
h = length(yas);         % Número de pontos medidos
rmax = ymax;             % Máximo raio da chama
rstep = ystep;           % Passo na direção do raio
Der = diff(P)/ystep;     % Derivada da função P(y)
for i = [1:floor(rmax/rstep)] % Número de termos em r
r(i) = i.*rstep;         % r real para a função i
dF = 0;
for ii=[round(r(i)./ystep):floor(ymax./ystep)] % y=r
y = ii.*ystep;           % y real para a função ii
dF = dF + (-Der(ii)./pi).*(log((y + ystep + sqrt((y+ystep).^2-r(i).^2))./(y)
+ sqrt((y).^2-r(i).^2))));
% Transformada de Abel inversa
end
F(i) = (dF);              % Distribuição especial
end
F1 = (lambda./ke).*F;     % cálculo da fração volumétrica de fuligem
r1 = r; % radial axis
d = diff(P);
% Resultado final
Ar1 = r1;
AF1 = F1;
plot(Ar1,AF1,'k','Linewidth',1.5);
xlabel('Raio[mm]')
ylabel('Fv [ppm]')
title('Fração volumétrica de fuligem')

```

## APÊNDICE B – Resultados de fração volumétrica de fuligem para $\varnothing = 24$ , $\varnothing = 15$ e $\varnothing = 10$

Os gráficos dispostos abaixo, com resultados de fração volumétrica, correspondem às medições feitas nas chama parcialmente pré-misturadas, com  $\varnothing = 24$ ,  $\varnothing = 15$  e  $\varnothing = 10$ , durante a primeira etapa de medições feitas nesse trabalho. Foi possível obter dados da literatura para comparação apenas para as razões de equivalência  $\varnothing = 24$  e  $\varnothing = 10$ . Assim, o gráfico para  $\varnothing = 15$  apresenta somente os valores obtidos neste presente trabalho.

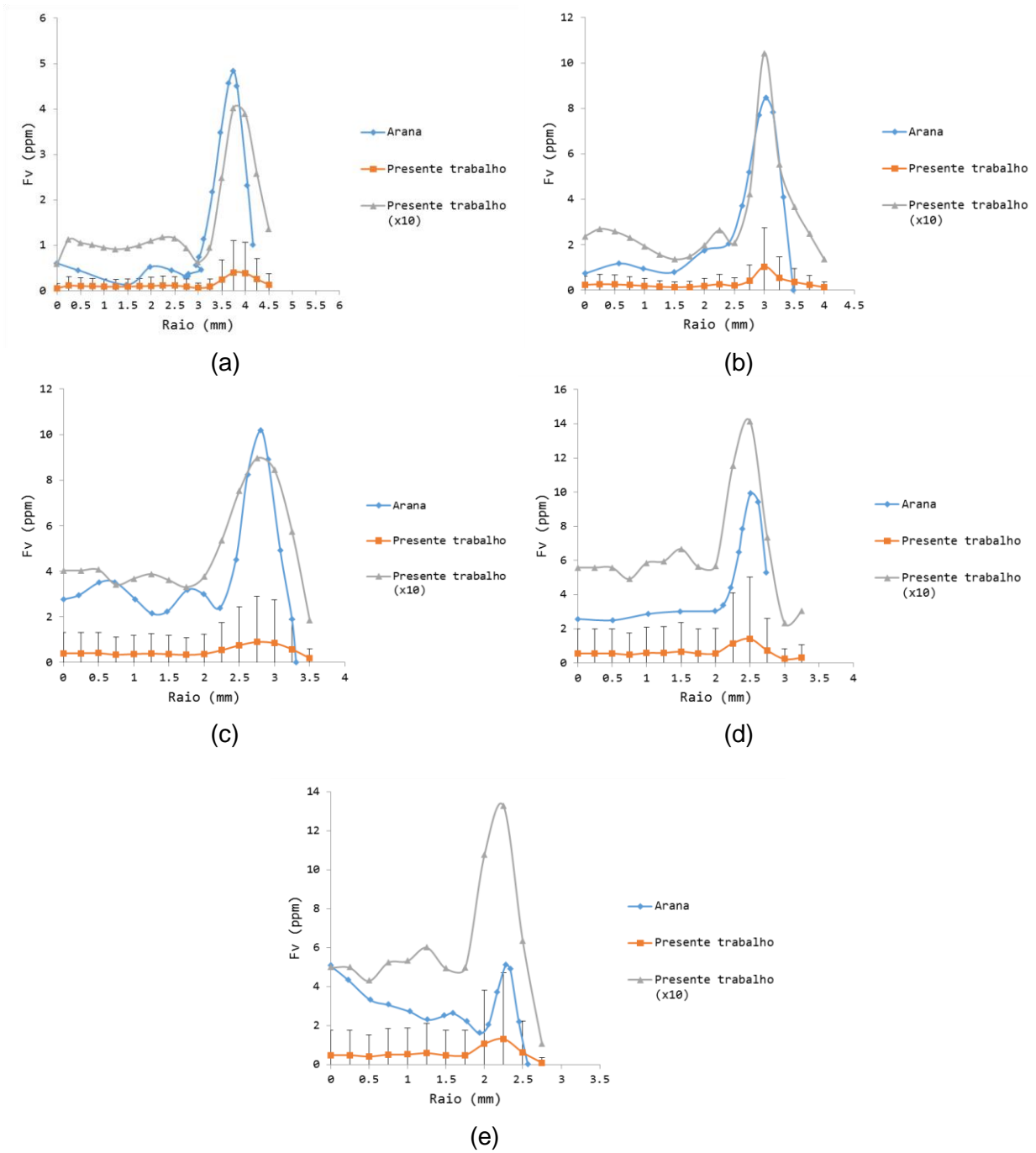


Figura B.1 - Comparação da fração volumétrica de fuligem para uma chama parcialmete pré-misturada ( $\varnothing = 24$ ) com a de Arana *et al*, 2004, em diferentes alturas acima do queimador (AAQ). De (a) até (e) correspondem respectivamente a AAQ = 20, 30, 40, 50 e 60 mm.



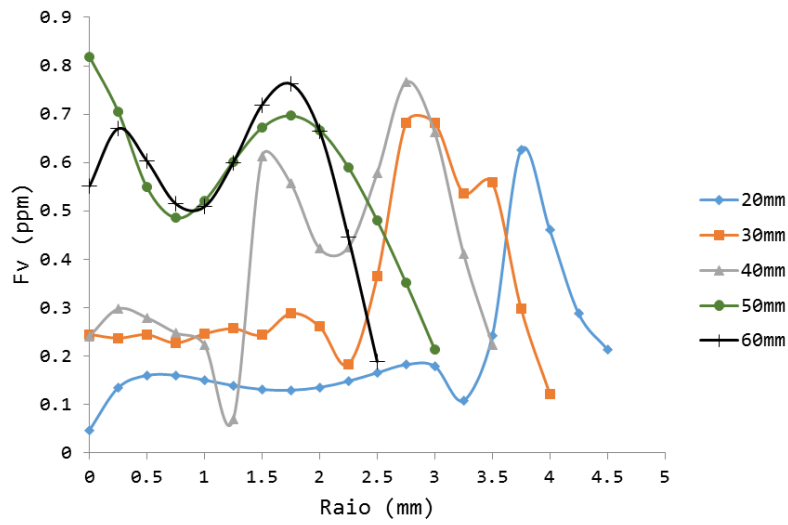
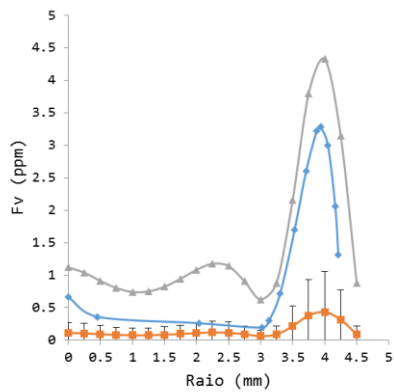
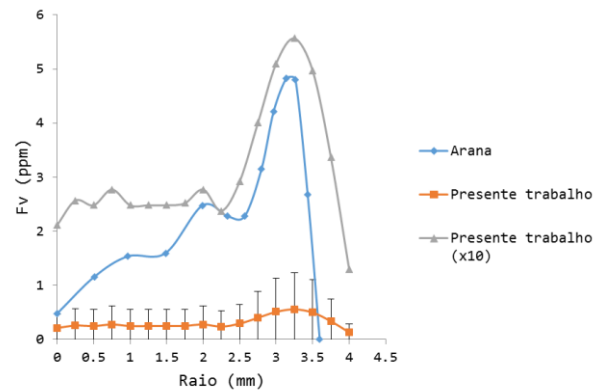


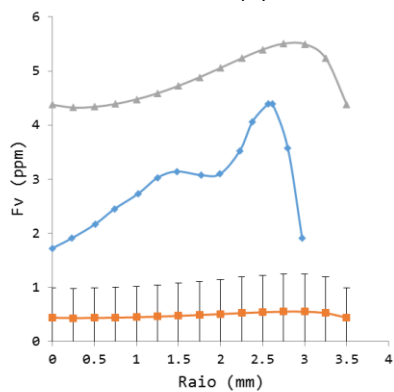
Figura B.2 - Comparação da fração volumétrica de fuligem obtidas neste trabalho para uma chama parcialmente pré-misturada ( $\varnothing = 15$ ), nas diferentes alturas acima do queimador (AAQ)



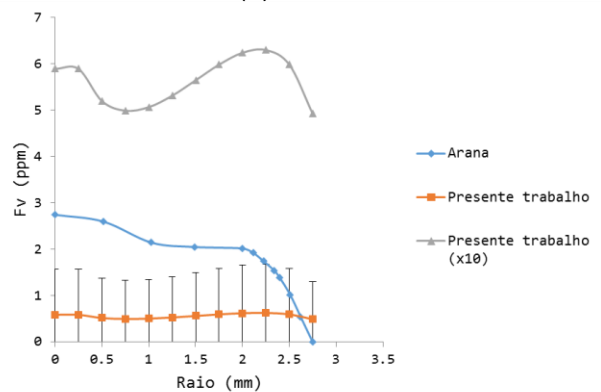
(a)



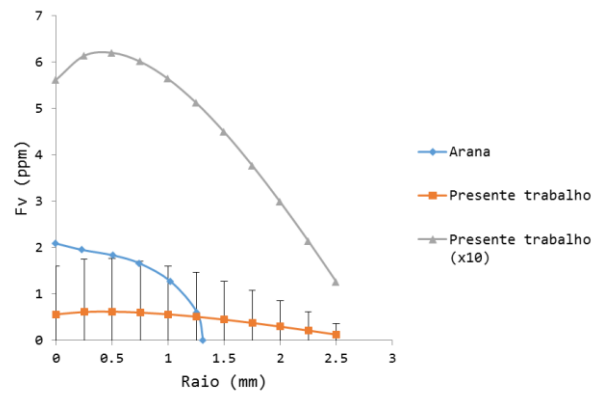
(b)



(c)



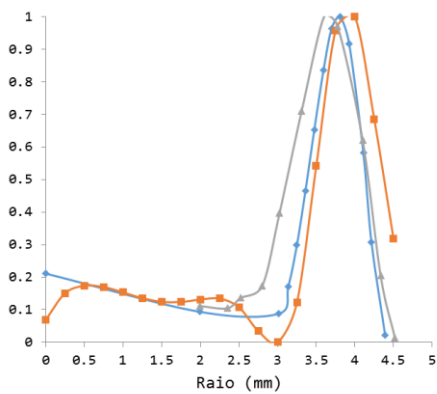
(d)



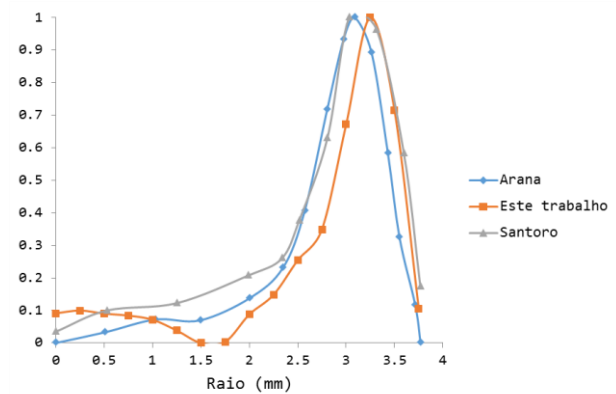
(e)

Figura B.3 - Comparação da fração volumétrica de fuligem para uma chama parcialmete pré-misturada ( $\phi = 10$ ) com a de Arana *et al*, 2004, em diferentes alturas acima do queimador (AAQ). De (a) até (e) correspondem respectivamente a AAQ = 20, 30, 40, 50 e 60 mm.

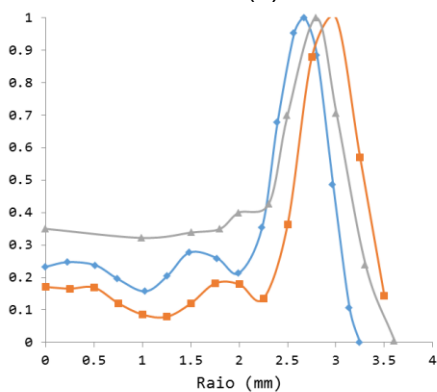
APÊNDICE C – Comparação dos resultados normalizados de fração volumétrica de fuligem



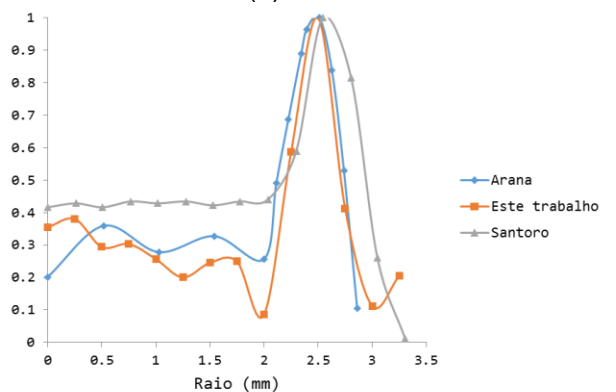
(a)



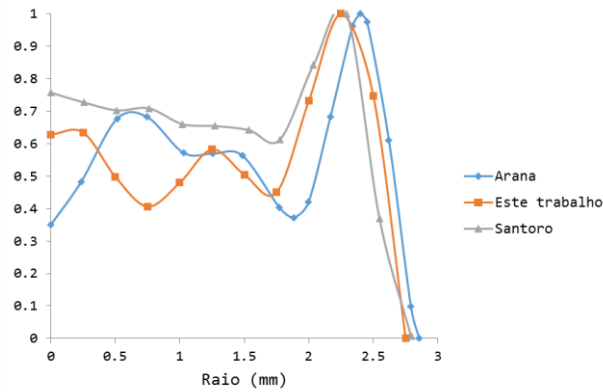
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura C.1 - Comparação dos resultados de fração volumétrica de fuligem com os de Santoro *et al*, 1983 e Arana *et al*, 2004, normalizados, para a chama não pré-misturada, em diferentes alturas acima do queimador (AAQ). De (a) até (e) correspondem respectivamente a AAQ = 20, 30, 40, 50 e 60 mm.

#### APÊNDICE D – Análise de incertezas

Para a análise de incertezas dos resultados apresentados no presente trabalho, foi utilizado o método proposto por Kline-McClintock, que determina a incerteza experimental  $u$ , causada por erros aleatórios resultante do somatório de erros independentes e incontrolláveis. O cálculo dessas incertezas é dado pela Equação D.1,

$$u = \pm \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{dY}{dk_i} u_{zi} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (D.1)$$

onde  $Y$  é a variável independente,  $k_i$  é o parâmetro independente e  $n$  é o número de parâmetros.

Para os resultados de fração volumétrica de fuligem, conforme Soares, 2016,  $Y$  corresponde à  $f_v$ , e é função das grandezas  $I, I_0, \lambda, L$  e  $E(m)$ . Considerando que o laser não apresenta incertezas quanto à  $\lambda$  e  $E(m)$ , A correlação matemática obtida é demonstrada na Equação D.2,

$$u_{f_v} = \pm \left[ \frac{df_v}{dL} u_L \right]^2 + \left[ \frac{df_v}{dI_0} u_{I_0} \right]^2 + \left[ \frac{df_v}{dI} u_I \right]^2 \quad (D.2)$$

onde o erro referente à  $L$  é  $u_L = \pm 0,01$ , dado pela resolução do paquímetro, os erros referentes à  $I$  e  $I_0$  são dados por  $u_I = u_{I_0} = \pm 1 \text{ mV}$ , referentes a oscilação do sinal (pico a pico). Assim, as derivadas para cada grandeza são dadas por

$$\frac{df_v}{dL} = \frac{\lambda}{6\pi E(m) L^2} \ln \left( \frac{I}{I_0} \right) \quad (D.3)$$

$$\frac{df_v}{dI_0} = \frac{\lambda}{6\pi E(m) L I_0} \quad (D.4)$$

$$\frac{df_v}{dI} = - \frac{\lambda}{6\pi E(m) L I} \quad (D.5)$$